

Tagungsband zur Konferenz
Stuttgart, 25. Mai 2023

Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2023

Katharina Hölzle, Matthias Kreimeyer, Daniel Roth, Thomas Maier, Oliver Riedel (Hrsg.)

Mitveranstalter

KTD Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart

iWA
UNI STUTT GART



Universität Stuttgart
Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT

Konferenz

SSP | 2023



Alle eingereichten Beiträge für das Stuttgarter Symposium 2023 wurden mindestens von 2 unabhängigen Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats begutachtet.

Dieses Werk unterliegt den Schutzrechten der Berner Übereinkunft und den allgemeinen internationalen Urheberrechten.

Programmausschuss

Prof. Dr. Katharina Hölzle, IAT der Universität Stuttgart/Fraunhofer IAO
Prof. Dr. Matthias Kreimeyer, Universität Stuttgart (IKTD)
Dr. Daniel Roth, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Andreas Nicola, Universität Stuttgart (IMA)
Dr. Manfred Dangelmaier, IAT der Universität Stuttgart/Fraunhofer IAO

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Albert Albers, Karlsruher Institut für Technologie (IPEK)
Prof. Dr. Philipp Berendes, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Hansgeorg Binz (i. R.), Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Herbert Birkhofer (i. R.), Technische Universität Darmstadt (pmd)
Prof. Dr. Lucienne Blessing, Massachusetts Institute of Technology
Prof. Dr. Nikola Bursac, Technische Universität Hamburg
Dr. Manfred Dangelmaier, IAT der Universität Stuttgart/Fraunhofer IAO
Prof. Dr. Hans-Georg Enkler, Hochschule Furtwangen
Prof. Dr. Frank Flemisch, RWTH Aachen University (IAW)
Prof. Dr. Jens Göbel, TU Kaiserslautern (VPE)
Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, Karlsruher Institut für Technologie (IMI)
Prof. Dr. Günter Höhne (i. R.), Technische Universität Ilmenau
Prof. Dr. Katharina Hölzle, IAT der Universität Stuttgart/Fraunhofer IAO
Hon.-Prof. Alfred Katzenbach, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Eckhard Kirchner, Technische Universität Darmstadt (pmd)
Prof. Dr. Matthias Kreimeyer, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Jens Krzywinski, Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Roland Lachmayer, Leibniz Universität Hannover (IPeG)
Prof. Dr. Udo Lindemann (i. R.), Technische Universität München
Prof. Dr. Thomas Maier, Universität Stuttgart (IKTD)

Prof. Dr. Frank Mantwill, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg (MRP)
Prof. Dr. Sven Matthiesen, Karlsruher Institut für Technologie (IPEK)
Prof. Dr. Alexander Müller, Hochschule Esslingen
Prof. Dr. Andreas Nicola, Universität Stuttgart (IMA)
Prof. Dr. Kristin Paetzold-Byhain, Technische Universität Dresden (VPE)
Prof. Dr. Stefan Pfeffer, Hochschule Furtwangen
Prof. Dr. Wolfram Remlinger, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Oliver Riedel, IAT der Universität Stuttgart/Fraunhofer IAO
Dr. Daniel Roth, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Christian Schindler, RWTH Aachen University (IFS)
Prof. Dr. Benjamin Schleich, Technische Universität Darmstadt (PLZM)
Prof. Dr. Martin Schmauder, Technische Universität Dresden (TLA)
Prof. Dr. Rainer Stark, Technische Universität Berlin (IIT)
Prof. Dr. Michael Vielhaber, Universität des Saarlandes (LKT)
Prof. Dr. Thomas Vietor, Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Sandro Wartack, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (KTmfk)
Prof. Dr. Robert Watty, Technische Hochschule Ulm
Prof. Dr. Christian Weber (i. R.), Technische Universität Ilmenau
Dr. Christian Wölfel, Technische Universität Dresden (TD)

Vorwort der Veranstalter

Das Stuttgarter Symposium (SSP) findet dieses Jahr zum siebten Mal statt und richtet sich an Fachexpertinnen und -experten aus Wissenschaft und Wirtschaft. In logischer Weiterführung und -entwicklung der erfolgreichen Symposien in den Jahren 2011 bis 2023 gibt die diesjährige Konferenz einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu Methoden, Lösungsansätzen und Technologien in der Produktentwicklung.

Die wissenschaftliche Konferenz bietet Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eine Plattform zur Präsentation und Diskussion ihrer neuesten Forschungsergebnisse und fördert den interdisziplinären Wissenstransfer.

Wir freuen uns außerordentlich, dass dieses Konzept nach wie vor so gut in der wissenschaftlichen Community angenommen wird und die sehr beachtenswerte Anzahl von 69 Beiträgen eingereicht wurde, von denen 41 zur Präsentation ausgewählt wurden.

Schwerpunkthemen der diesjährigen Konferenz stellen unter anderem Advanced Systems Engineering/Model-Based Systems Engineering, Digital Engineering, Nachhaltige Produktentwicklung, Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design, Produktkomplexität, Zuverlässige Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken sowie Design-Technik-Konvergenz dar. Die Fachtagung DES=ING wurde nun dauerhaft in das Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung integriert und beschäftigt sich mit den interdisziplinären Gestaltungsprozessen, in denen Designerinnen und Designer sowie Ingenieurinnen und Ingenieure eine Hauptrolle spielen.

Die Vorbereitung und Durchführung dieses Symposiums bedarf tatkräftiger Unterstützung vieler Personen. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang dem Organisationsteam unter der Leitung von Herrn Dr. Daniel Roth.

Wir freuen uns auf die vielen, sicherlich interessanten Vorträge und Diskussionen.



Prof. Dr. rer. oec.
Katharina Hölzle



Prof. Dr.-Ing.
Matthias Kreimeyer



Dr.-Ing.
Daniel Roth



Prof. Dr.-Ing.
Thomas Maier



Prof. Dr.-Ing.
Oliver Riedel

Veranstaltungsprogramm

Konferenz | Stuttgart, 25. Mai 2023

- 08:30 Uhr Begrüßung und Einführung** Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Oliver Riedel
Chair: Prof. Dr. Matthias Kreimeyer
- 08:45 Uhr Key-Note 1** Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Matthias Kreimeyer
Dr. Martin Kratzer, Mercedes-Benz AG
- 09:15 Uhr Best-Paper** Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Thomas Maier
- 09:45 Uhr Kaffeepause** Ort: Foyer
- 10:15 Uhr Key-Note 2** Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Thomas Maier
Prof. Dr. Florian Kauf und Dr. David Allaverdi,
PricewaterhouseCoopers GmbH, Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

10:50 Uhr Parallelstream

Session 1

12:20 Uhr Mittagessen Ort: Foyer

13:15 Uhr Key-Note 3 Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Andreas Nicola und
Michael Falkensteiner, PTC

13:50 Uhr Parallelstream

Session 2

15:00 Uhr Kaffeepause Ort: Foyer

15:20 Uhr Parallelstream

Session 3

16:35 Uhr Elevator-Pitches und Abschluss Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Andreas Nicola

**Track 1: Virtuelle
Produktentwicklung**

Digital Engineering

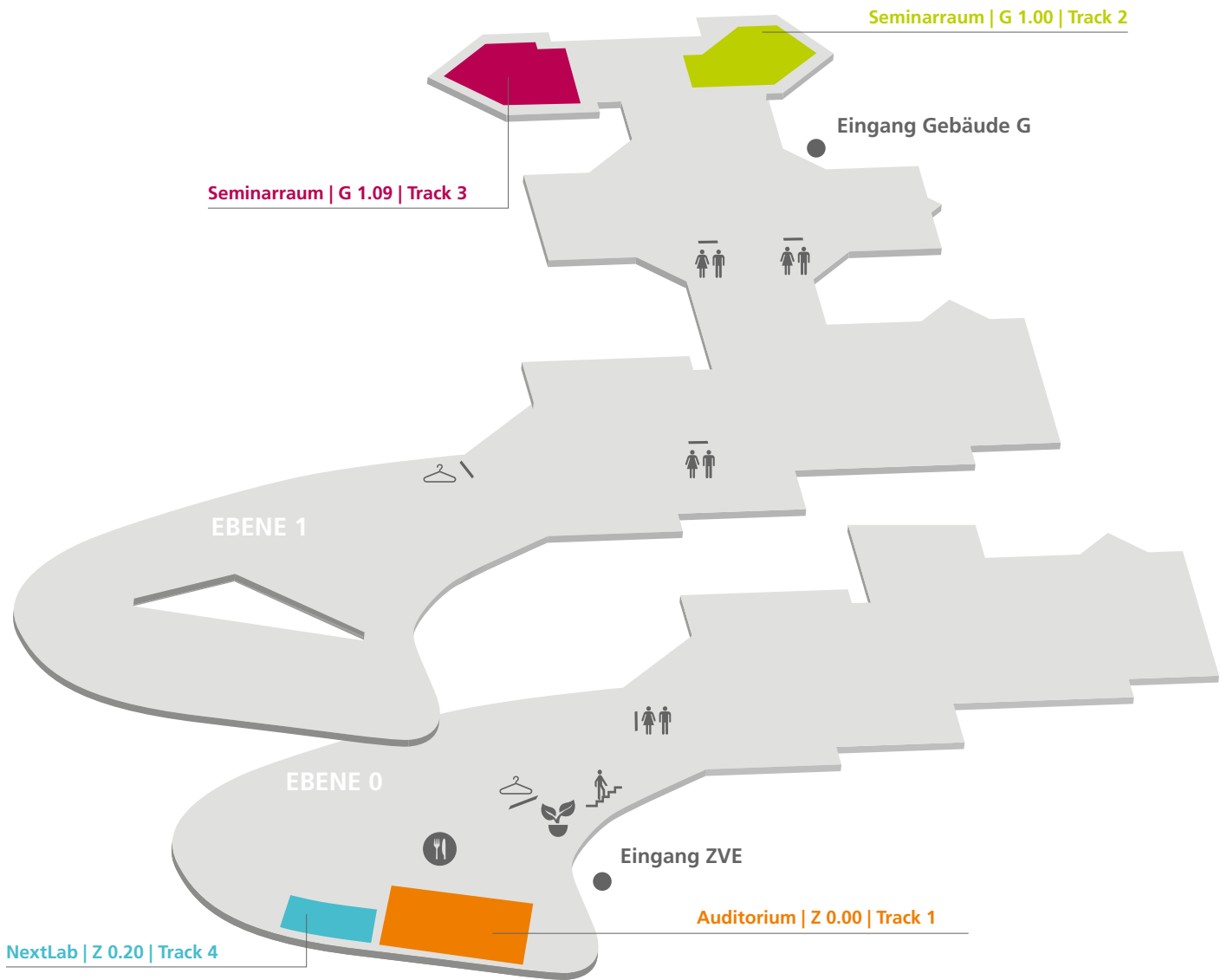
Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Oliver Riedel

**Digital Engineering and
Advanced Systems Engineering
(ASE)/Model-Based Systems
Engineering**

Ort: Auditorium ZVE
Chair: Nikolas Zimmermann

**Advanced Systems
Engineering (ASE)/Model-
Based Systems Engineering**

Ort: Auditorium ZVE
Chair: Prof. Dr. Katharina Hölzle



Track 2: Methoden und Prozesse der Produktentwicklung

Konstruktionsmethodiken / Leichtbau in der Produktentwicklung und Agile Produktentwicklung

Ort: G1.00
Chair: Prof. Dr. Philipp Berendes

Nachhaltige Produktentwicklung

Ort: G1.00
Chair: Prof. Dr. Matthias Kreimeyer

Produktkomplexität

Ort: G1.00
Chair: Prof. Dr. Matthias Kreimeyer

Track 3: Technologiemanagement und Zuverlässigkeitstechnik

Innovations- und Technologiemanagement

Ort: G1.09
Chair: Prof. Dr. Katharina Hölzle

Innovations- und Technologiemanagement und Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Ort: G1.09
Chair: Dr. Manfred Dangelmaier

Zuverlässige Produktentwicklung

Ort: G1.09
Chair: Prof. Dr. Andreas Nicola

Track 4: Nutzerzentriertes Design und DES=ING

Nutzerzentriertes Design

Ort: NextLab
Chair: Prof. Dr. Thomas Maier

Nutzerzentriertes Design und Adaptive Bedienung für automatisiertes Fahren

Ort: NextLab
Chair: Prof. Dr. Wolfram Remlinger

Design-Technik-Konvergenz

Ort: NextLab
Chair: Prof. Dr. Thomas Maier

Key-Notes

Vorträge im Plenum

Donnerstag, 25. Mai 2023, 08:45 – 09:45 Uhr

Stichworte: Digitalisierung, CAD, Automobilindustrie, Produktentwicklung

Konzeption und Bereitstellung eines autarken CAD-Ökosystems für den weltweiten Einsatz innerhalb der Mercedes-Benz AG

Dr.-Ing. Martin Kratzer

Mercedes-Benz AG, 71032 Böblingen,
martin-kratzer@mercedes-benz.com

Steigende gesetzliche Anforderungen in Bezug auf Nachhaltigkeit, neue Technologien und verändertes Kundenverhalten führen zu einem sehr dynamischen Marktumfeld in der Automobilindustrie. Die daraus folgende Transformation hin zu Elektromobilität und einem deutlich höheren Softwareanteil im Fahrzeug führt auch zu neuen Herausforderungen in der Engineering IT in Bezug auf Prozesse, Methoden und Tools. Um Schritt halten zu können, müssen bestehende Produktentwicklungsprozesse nachhaltig digitalisiert, um neue Technologien erweitert und zukunftsgerecht in Bezug auf Entwicklungszeit, Produktqualität und Kosten optimiert werden. Für die mechanische Produktentwicklung bildet das CAD-Ökosystem das Fundament für alle digitalen Prozesse, von der Erzeugung der 3D-Produktgeometrien hin zur digitalen Absicherung.

Ziel ist die Gestaltung eines autarken und effizienten CAD-Ökosystems, das in Bezug auf vier identifizierte Handlungsfelder weiterentwickelt wird: Software-Qualität, Entwicklungsgeschwindigkeit, Neue Features & Infrastruktur. Alle Handlungsfelder werden mittels datenbasierter Analysen auf Potenziale hin untersucht, sodass abgeleitete Maßnahmen zielgerichtet sind und ein direkter Mehrwert für den Kunden in der Entwicklung garantiert ist.

Keywords: Digitalization, CAD, Automotive Industry, Product Development

Design and provision of a self-sufficient CAD ecosystem for worldwide use within Mercedes-Benz AG

Dr.-Ing. Martin Kratzer

Mercedes-Benz AG, 71032 Böblingen,
martin-kratzer@mercedes-benz.com

Increasing legal requirements with regard to sustainability, new technologies and changing customer behavior are leading to a very dynamic market environment in the automotive industry. The resulting transformation towards electro mobility and the shift to a significantly higher proportion of software in the vehicle lead to new challenges for the engineering IT in terms of processes, methods and tools. In order to keep pace, existing product development processes must be digitized, incorporated with new technologies and optimized for the future in terms of development time, product quality and costs. For mechanical product development, the CAD ecosystem forms the foundation for all digital processes, from generating 3D product geometries to digital validation.

The aim is to design of a self-sufficient and efficient CAD ecosystem, which is developed further in four identified areas of action: Software quality, development speed, new features & infrastructure. All areas of action are investigated for potentials using data-based analyses, so that derived measures are targeted and directly guarantee added value for the customer in the development department.

Themen: Konstruktionsmethodiken, Produktkomplexität

Stichworte: Schallschutz, Ventilator, Strömungsoptimierung

Experimentelle Entwicklung effektiver Schallschutzmaßnahmen für schnell drehende Hochdruckventilatoren

Stefan Recker

Elektrotor airsystems GmbH, 73760 Ostfildern

Zur Reduktion hoher Geräuschemission bei Ventilatoren sind Schallschutzmaßnahmen zur Luftschalldämmung und -dämpfung erforderlich. Diese Arbeit untersucht effektive neue Schallschutzlösungen für kompakte schnell drehende Ventilatoren, die mit in der Praxis bewährten Ausführungen ihren Raumvorteil einbüßen würden. Aufgrund fehlender analytischer Methoden zur Schallvorhersage wird ein mehrstufiger experimenteller Entwicklungsansatz gewählt, der durch wiederholte Evaluation der Messergebnisse schrittweise zum Ziel führt.

Wirksame Lösungen ergeben sich durch Integration von Strömungsumlenkungen in eine konstruktiv durchdachte Schalldämmhaube mit Augenmerk auf die Abdichtung der Schallwege. Die Untersuchungen bewegen sich stets im Zielkonflikt zwischen akustischer Optimierung, Druckverlustreduzierung und thermischer Beanspruchung, weshalb im Rahmen einer gegebenen Bauraum- und Kostensituation der bestmögliche Kompromiss gefunden wird. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf andere lufttechnische Applikationen übertragen, des Weiteren werden allgemeingültige Erkenntnisse für andere Maschinen abgeleitet.

Topics: Design Methodologies, Product Complexity

Keywords: Noise Protection, Fan, Flow Optimization

Experimental development of effective noise control measures for high-speed high-pressure fans

Stefan Recker

Elektrotor airsystems GmbH, 73760 Ostfildern

To reduce high noise emissions from fans, sound insulation measures in the form of sound insulation and sound absorbing elements are required. This work investigates effective new sound insulation solutions for compact, high-speed fans that would lose their space advantage with field-proven designs. Due to the lack of analytical methods for sound prediction, a multi-stage experimental development approach is chosen, which leads step-by-step to the goal through repeated evaluation of the measurement results.

Effective solutions result from the integration of flow deflections into a well-designed silencer box with attention to the sealing of the sound paths. The investigations always involve a conflict of objectives between acoustic optimization, pressure loss reduction and thermal stress. For this reason the best possible compromise is found within the framework of a given installation space and cost situation. The knowledge gained can also be transferred to other ventilation applications, and generally applicable solutions are derived for other machines.

Track 1: Virtuelle Produktentwicklung

Session 1: Digital Engineering

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Digital Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Produktionsgerechtes Gestalten, Bedingungserfüllungsproblem, Tailored forming, Wissensbasierte Systeme

Topics: Digital Engineering, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Design for Manufacturing, Constraint Satisfaction Problem, Tailored Forming, Knowledge-based systems

Prozesskettenorientierte Herstellbarkeitsanalyse von Produkten durch die Nutzung eines Constraint-Satisfaction-Problems

Kevin Herrmann¹, Felix Pusch¹, Stefan Plappert¹, Behrend Bode¹, Iryna Mozgova², Paul Christoph Gembarski¹, Roland Lachmayer¹
¹Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

²Universität Paderborn, Fachgruppe Datenmanagement im Maschinenbau

Process chain-oriented manufacturability assessment of products by using a constraint satisfaction problem

Kevin Herrmann¹, Felix Pusch¹, Stefan Plappert¹, Behrend Bode¹, Iryna Mozgova², Paul Christoph Gembarski¹, Roland Lachmayer¹
¹Leibniz University Hannover, Institute of Product Development and Tools Engineering

²University of Paderborn, Department of Data Management in Mechanical Engineering

Dieser Beitrag stellt eine rechnergestützte Modellierungsstrategie vor, um Prozesskettenwissen, wie die Gestaltung der Fertigungsstufen, prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen oder Fertigungshilfsmittel, für die Produktgestaltung zu formalisieren und im Kontext des Design for Manufacturing für Produkt- und Prozessgestaltungsentscheidungen bereitzustellen. Dabei werden am Beispiel einer Tailored-Forming-Prozesskette die Herstellungsschritte einer Multimaterial-Welle mittels eines Constraint-Satisfaction-Problems (CSP) modelliert, indem die geometrischen Transformationen einzelner Fertigungsstufen sowie Fertigungsrestriktionen in Form von Constraints und Fertigungsstufen sowie Fertigungshilfsmittel über Parameter in den CSP-Variablen formuliert werden. Das CSP ist damit in der Lage, ausgehend von einem Geometriemodell eines Bauteils eine prozesskettenorientierte Restriktionsprüfung zur Herstellbarkeitsbewertung durchzuführen und automatisiert Fertigungsstufen sowie Fertigungshilfsmittel zu konfigurieren.

This paper presents a computer-aided modeling strategy to formalize process chain knowledge, such as the design of manufacturing stages, cross-process manufacturing constraints or manufacturing tools, for product design and to provide it for product and process design decisions in the context of design for manufacturing. Using the example of a tailored forming process chain, the manufacturing steps of a multi-material shaft are modeled by means of a constraint satisfaction problem (CSP) by formulating the geometric transformations of individual manufacturing steps as well as manufacturing restrictions in the form of constraints, and manufacturing steps as well as manufacturing resources via parameters in the CSP variables. The CSP is thus able to perform a process-chain-oriented restriction check for manufacturability evaluation based on a geometry model of a component and to automatically configure manufacturing stages and manufacturing resources and tools.



Themen: Digital Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Verarbeitung natürlicher Sprache, Anforderungsmanagement, Digital Engineering

Potentiale von NLP-basierten Assistenzsystemen im Anforderungsmanagement

Judith van Remmen, Dennis Horber, Jessica Pickel, Stefan Goetz, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Die Anwendung und Integration bestehender NLP-basierter Ansätze in das Anforderungsmanagement wird derzeit durch verschiedene Faktoren, darunter mangelndes Expertenwissen und Know-how, gehemmt. Motiviert durch das Fehlen einer Entscheidungshilfe für die Konzeptionierung NLP-basierter Assistenzsysteme fokussiert der vorliegende Beitrag die Entwicklung einer systematischen Handlungsempfehlung zur Potentialidentifikation und Risikominimierung. Die Entscheidungshilfe berücksichtigt dabei die Unternehmensdefinition hinsichtlich der Art des Unternehmens, dessen Produkttypologie und Referenzsysteme. Sie dient dazu, potentiell kritische Anforderungen zu identifizieren und daraus Voraussetzungen für die Umsetzung des NLP-unterstützten Soll-Prozesses abzuleiten. Die qualitative Anforderungserfüllung kann dabei als Indikator für das Potential oder Risiko in der Entscheidungsfindung genutzt werden. Diesbezüglich können bereits Herausforderungen für die eigene Implementierung des konzeptionierten Assistenzsystems oder die Beauftragung eines Softwarezulieferers abgeleitet und klar kommuniziert werden. Das entwickelte Konzept wird anhand eines akademischen Beispiels kritisch diskutiert.

Topics: Digital Engineering, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Natural Language Processing, Requirements Engineering, Digital Engineering

Potentials of NLP-based Assistance System in Requirements Management

Judith van Remmen, Dennis Horber, Jessica Pickel, Stefan Goetz, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Chair of Engineering Design (KTmfk)

The application and integration of existing NLP-based approaches in requirements engineering is currently limited by various factors, including the lack of expertise and know-how. Motivated by the lack of a decision support for the conceptual design of NLP-based assistance systems, this paper focuses on the development of a systematic workflow for identifying potentials and minimising risks. The decision support takes the classification of a company regarding its type, product typology and product reference systems into account. It is used to identify potentially critical requirements and to assess the applicability of the desired NLP-support. The qualitative fulfillment of requirements can be used as an indicator for the potential or risk in the decision-making process. Furthermore, challenges for the own implementation of the assistance system or the commissioning of a software supplier can already be derived and clearly communicated. The developed concept is critically discussed using an academic example.

Session 1: Digital Engineering

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Digital Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Digital Engineering, Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Topics: Digital Engineering, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Digital Engineering, Artificial Intelligence, Machine Learning, Knowledge Management in Product Development

Klassifizierung von Anwendungen der künstlichen Intelligenz in der Produktentwicklung

*Jonas Fastabend, Daniel Roth, Matthias Kreimeyer
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD)*

Die zunehmende Digitalisierung und das steigende Datenvolumen in der Industrie fördern die Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz (KI) in der Produktentwicklung (PE). Derzeit existiert noch keine Übersicht über bereits vorhandene KI Anwendungen in der industriellen PE. In diesem Beitrag wird eine Sammlung bestehender KI-Anwendungen mit Bezug zu PE erzeugt. Aufbauend wird eine Klassifizierung dieser KI-Lösungen durchgeführt. Ziel ist es, Anwendungscluster für KI in der Produktentwicklung zu definieren, um Nutzer bei der Auswahl geeigneter KI-Anwendungen für die PE zu unterstützen. Auch sollen Forscher unterstützt werden, Forschungsansätze in Bezug auf KI in der PE mit praktischen Anwendungen vergleichen zu können. Eine praxisnahe Untersuchung wird gewährleistet, indem Zeitschriftenartikel, die sich mit KI in der PE im industriellen Kontext beschäftigen, als Grundlage für diese Arbeit verwendet werden. Die systematische Durchsicht dieser Artikel führte zur Identifizierung von 40 unabhängigen Anwendungen von KI in der PE. Basierend auf deren Eigenschaften konnten fünf Cluster von Anwendungstypen mit zwölf Aufgaben identifiziert werden, die diese KI-Lösungen in der PE erfüllen.

Classification of artificial intelligence applications in product development

*Jonas Fastabend, Daniel Roth, Matthias Kreimeyer
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and
Industrial Design*

Increasing digitalization and data volumes in industry are fostering the possibilities of artificial intelligence (AI) in product development (PD). Currently, there is no overview of already existing AI applications in industrial PD. In this paper, a collection of existing AI applications related to PD is made and a classification of these AI solutions is performed. The goal is to define application clusters for AI in product development to assist users in selecting appropriate AI applications for PD. It also aims to help researchers to compare research approaches related to AI in PD with existing industrial applications. A practical investigation is ensured by using journal articles dealing with AI in PD in an industrial context as a basis for this work. Systematic review of these articles led to the identification of 40 independent applications of AI in PD. Based on their characteristics, it was possible to identify five clusters of application types with twelve tasks performed by these AI solutions in PD.



Themen: Digital Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Ingenieurausbildung, Lehre, Konstruktion, Produktentwicklung, Virtual Reality

VR-gestützte Produktentwicklung in der universitären Lehre: Entwicklung und Evaluation einer Lehr-Lerneinheit

Adrian Henrich, Stefania Kontokosta

Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

Unternehmen setzen als Teil der digitalen Transformation zunehmend auf Werkzeuge wie Virtual Reality (VR). Angehende Ingenieurinnen und Ingenieure müssen daher im Rahmen ihres Studiums im Umgang mit dieser Technologie ausgebildet und dazu befähigt werden, sich kritisch mit ihrem Einsatz auseinanderzusetzen. In diesem Paper wird deshalb die Entwicklung einer Lehr-Lerneinheit beschrieben, die Studierende in die Lage versetzt, ihr Konstruktionsprojekt mit VR zu unterstützen. Dabei sollen sie einerseits die Möglichkeiten und Herausforderungen der Technologie für ihr späteres Arbeitsumfeld kennenlernen und andererseits von einem VR-induzierten Lerneffekt profitieren. Inwieweit diese Ziele erreicht werden konnten, wird anhand der Ergebnisse der entwicklungsbegleitenden Längsschnittstudie diskutiert.

Topics: Digital Engineering, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Engineering Education, Adult Education, Product Development, Technical Design, Virtual Reality

VR-Supported Product Development in University Teaching: Development and Evaluation of a Teaching Unit

Adrian Henrich, Stefania Kontokosta

University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management IAT

As part of digital transformation companies increasingly use tools like Virtual Reality (VR). Therefore, future engineers must be trained in the framework of their studies to use this technology. Beyond that they should be getting educated to critically assess the use of VR in future work-related scenarios. This paper therefore describes the development of a teaching unit that enables students to support their design project with the help of VR hard- and software. On the one hand, they should learn about the possibilities and challenges of the technology regarding their future working environment and, on the other hand, they should benefit from a VR-induced learning effect. The extent to which these goals could be achieved is discussed based on the results of a longitudinal study accompanying the development.

Session 2: Digital Engineering and Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Digital Engineering, Advanced Systems Engineering (ASE)/Model-Based Systems Engineering

Stichworte: Anforderungsentwicklung, Künstliche Intelligenz, Komplexe technische Systeme, Wirkkettenmodellierung, Model-Based Systems Engineering

Topics: Digital Engineering, Advanced Systems Engineering (ASE)/Model-Based Systems Engineering

Keywords: Requirements Engineering, Artificial Intelligence, Complex Technical Systems, Effect Chain Modelling, Model-Based Systems Engineering

Automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen zur Wirkkettenmodellierung

Iris Gräßler, Daniel Preuß

Universität Paderborn/Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung

Automated Dependency Analysis of Requirements for Effect Chain Modelling

Iris Gräßler, Daniel Preuß

University of Paderborn/Heinz Nixdorf Institute, Institute for Product Creation

Die Wirkkettenmodellierung ist eine Methode zur Erstellung von Informationsmodellen für Auswirkungsanalysen von Änderungen der Systemelemente. Für die Abschätzung der Änderungsfortpflanzung müssen Abhängigkeiten zwischen Anforderungen erkannt werden. Die hohe Anzahl an Anforderungsabhängigkeiten in der Entwicklung komplexer technischer Systeme resultiert in dem Erfordernis einer Automatisierung. In einer Studie wurde erkannt, dass Transformer-Modelle (BERT) für die automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen geeignet sind. Aktuell bestehen jedoch Defizite in der Anwendbarkeit der Modelle für verschiedene Projekte ohne umfangreiche und heterogene Trainingsdatenbasis. In diesem Beitrag wird untersucht, wie aktives Lernen zum Training von BERT-Modellen (active-BERT) genutzt werden kann, um die Leistungsfähigkeit der Modelle zur Klassifizierung von Anforderungsabhängigkeiten von Projekten mit heterogenen Anforderungsdaten zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeit der Modelle durch aktives Lernen deutlich zunimmt. Durch active-BERT werden Ingenieure befähigt, Wirkketten effizient zu modellieren und Anforderungsänderungen effektiv zu handhaben.

Effect chain modelling is a method for creating information models for impact analyses of changes in system elements. For the estimation of change propagation, dependencies between requirements must be detected. The high number of requirement dependencies in the engineering of complex technical systems results in the need for automation. In a study, it was shown that transformer models (BERT) are suitable for the automated dependency analysis of requirements. However, there are currently deficits in the applicability of the models for different projects without an extensive and heterogeneous training database. This paper investigates how active learning can be used to train BERT models (active-BERT) in order to increase the performance of the models for classifying requirement dependencies of projects with heterogeneous requirements. The results show that the performance of the models increases significantly through active learning. Through active-BERT, engineers are enabled to model effect chains efficiently and to handle requirement changes effectively.



Themen: Advanced Systems Engineering (ASE)/
Model-Based Systems Engineering

Stichworte: MBSE, Standardisierung, Datenmodell,
Anforderungen

Konsortialstudie – Entwicklung eines Anforderungskatalogs für Model-Based Systems Engineering Datenmodelle

Jennifer Dreier¹, Franziska Wieja¹, Kathrin Spütz², Ralf Hocke³,
Stefan Setzer³, Georg Strobl⁴, Dirk Fleischer⁴

¹RWTH Aachen Campus, Center for Systems Engineering

²RWTH Aachen University, Institut für Maschinenelemente und
Systementwicklung

³Siemens Healthcare GmbH, Erlangen

⁴BMW AG, München

Für die Entwicklung komplexer technischer Systeme führen Unternehmen zunehmend Methoden des Model-Based Systems Engineering (MBSE) ein, um alle Systeminformationen in Modellen als Single Source of Truth nahtlos miteinander zu verbinden. Im Laufe der Zeit haben sich jedoch verschiedene MBSE-Methoden entwickelt, die einen interdisziplinären Austausch zwischen Organisationen und Domänen erschweren. Entwicklungsartefakte werden unterschiedlich abgebildet und eine Kompatibilität wird nicht erreicht. Für eine erfolgreiche unternehmens- und domänenübergreifende Zusammenarbeit müssen die MBSE-Methoden in einen gemeinsamen Standard überführt werden.

Die Herausforderung der Standardisierung von MBSE-Methoden wurde in einer Konsortialstudie des Center for Systems Engineering (CSE) in Zusammenarbeit mit der BMW Group und Siemens Healthineers untersucht. Das Ergebnis der Studie ist ein Anforderungskatalog an ein standardisiertes MBSE-Datenmodell, das die Merkmale und Dimensionen bestimmt, in denen ein Datenmodell standardisiert werden muss. Für einige der Anforderungen werden Lösungsansätze aus der industriellen Praxis der Industriepartner vorgestellt.

Topics: Advanced Systems Engineering (ASE)/
Model-Based Systems Engineering

Keywords: MBSE, Standardization, Data Model,
Requirements

Consortium Study – Development of a Requirements Catalogue for Model-Based Systems Engineering Data Models

Jennifer Dreier¹, Franziska Wieja¹, Kathrin Spütz², Ralf Hocke³,
Stefan Setzer³, Georg Strobl⁴, Dirk Fleischer⁴

¹RWTH Aachen Campus, Center for Systems Engineering

²RWTH Aachen University, Institute for Machine Elements and
Systems Engineering

³Siemens Healthcare GmbH, Erlangen

⁴BMW AG, Munich

For the development of complex technical systems, companies are increasingly introducing Model-Based Systems Engineering (MBSE) methods, an approach to seamlessly connect all system information within models as a Single Source of Truth. Different MBSE methods have derived over time which make interdisciplinary exchange between collaborating organizations and domains difficult. Development artefacts are mapped differently and compatibility is not achieved. For a successful cross-company and cross-domain collaboration, the MBSE methods used must thus be transferred to a common standard.

The challenge of standardizing MBSE methods was investigated in a consortium study by the Center for Systems Engineering (CSE) in cooperation with the BMW Group and Siemens Healthineers. The result of the study is a requirements catalogue for MBSE data models which determines the characteristics and dimensions in which a data model must be standardized. For some of the defined requirements, exemplary solution approaches by the industry partners are presented, providing implementation solutions from their practical experience in industry.

Session 2: Digital Engineering and Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering

Stichworte: Handlungsfelder, Produkt-Service-Systeme (PSS), Entwicklungsprozess, Herausforderungen, Smart Systems Entwicklung

Topics: Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering

Keywords: Fields of Action, Product-Service Systems (PSS), Development Process, Challenges, Smart Systems Engineering

Handlungsfelder deutscher KMUs zur Unterstützung der Entwicklung smarterer Product-Service-Systeme

Yevgeni Paliyenko, Dennis Lukjanenko, Gregory-Jamie Tüzün, Daniel Roth, Matthias Kreimeyer
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Fields of action for German SMEs to support the development of smart product-service-systems

Yevgeni Paliyenko, Dennis Lukjanenko, Gregory-Jamie Tüzün, Daniel Roth, Matthias Kreimeyer
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Unternehmen sind heutzutage mit dynamischen Marktveränderungen, wie zunehmendem Konkurrenzdruck oder sich wandelnden Kundenbedürfnisse, konfrontiert. Sie reagieren darauf mit einer Erweiterung des Angebots, beispielsweise um produktbegleitende Dienstleistungen zur Realisierung eines höheren Leistungsversprechens. Gleichzeitig ermöglichen günstigere und leistungsfähigere Informations- und Kommunikationstechnologien eine profitable Umsetzung von intelligenten Produkten. Diese parallelen Technologie- und Marktentwicklungen führen zur Entstehung von smarten Produkt-Service-Systemen (smart PSS). Die Entwicklung solcher komplexen Systeme stellt Unternehmen, insbesondere KMUs, vor neue Herausforderungen. Aufgrund dessen werden in diesem Beitrag, die Herausforderungen der Entwicklung von smart PSS aufgedeckt und die aktuelle Entwicklungspraxis untersucht, um daraus Handlungsbedarfe abzuleiten. Ausgehend von einer systematischen Literaturrecherche und Experten-Befragungen werden die Herausforderungen erfasst und Industrie-Workshops durchgeführt. Die Erkenntnisse der Erhebungen dienen der Identifizierung praxisnaher Handlungsfelder hinsichtlich der smart PSS-Entwicklung.

Nowadays, enterprises are exposed to dynamic market changes, such as increasing competitive pressure or changing customer needs. They react to this by expanding their offer by product-related services in order to increase the value proposition. Concurrently, information and communication technologies get cheaper and more potent, thus increasing the feasibility of intelligent products. These parallel technological and market developments lead to the emergence of smart product service systems (smart PSS). A smart PSS combines tangible, smart products with intangible, data-based services. The development of such complex systems presents companies, especially SMEs, with new challenges. Methodical support can significantly influence and improve the development process and thus the potential success of a smart PSS. It is therefore necessary to examine the current development practice and derive the fields of action. In this paper, based on a systematic literature review and industry surveys, the challenges of the development are revealed and on their basis industry workshops are carried out, in order to derive fields of action regarding the smart PSS development.



Session 3: Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Digital Engineering, Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Digitale Transformation, Industrie 4.0, Industrie 5.0, Produktion, Herausforderungen

Herausforderungen an die Umsetzung der digitalen Transformation in Brownfield-Produktionssystemen

Valesko Dausch¹, Daniel Roth¹, Sebastian Bohr², Matthias Kreimeyer¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

²MAN Truck & Bus SE, München

Die digitale Transformation ist gerade für die Produktion in großen und kleinen Unternehmen eine Chance, welche jedoch auch die Wettbewerbsfähigkeit bedrohen kann. Die digitale Transformation zielt auf die Vernetzung von Geräten, Systemen, Daten und Menschen ab. Hierdurch soll die Qualität der Produkte gesteigert, die Kosten der Herstellung gesenkt und die Effizienz in der Produktion optimiert werden. Obwohl die digitale Transformation durch die Industrie 4.0 nun seit über einem Jahrzehnt voranschreitet und die weltweite Covid-19 Pandemie die Digitalisierung in Summe beschleunigt hat, stagniert der Fortschritt teilweise in Unternehmen. Dieser Beitrag arbeitet die Herausforderungen heraus, welche im Kontext der digitalen Transformation in der Produktion bestehen und zeigt zukünftige Forschungsschwerpunkte auf, um die Digitalisierung zielgerichtet weiterzutreiben. Die Erarbeitung der Herausforderungen erfolgt sowohl über eine systematische Literaturrecherche als auch über semistrukturierte Interviews.

Topics: Digital Engineering, Innovation and Technology Management

Keywords: Digital Transformation, Industry 4.0, Industry 5.0, Production, Challenges

Challenges for the implementation of digital transformation in brownfield production systems

Valesko Dausch¹, Daniel Roth¹, Sebastian Bohr², Matthias Kreimeyer¹

¹University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

²MAN Truck & Bus SE, Munich

Digital transformation is an opportunity for production in large and small companies in particular, but it can also threaten competitiveness. Digital transformation aims to network devices, systems, data and people. This is intended to increase the quality of products, reduce manufacturing costs and optimize efficiency in production. Although digital transformation through Industry 4.0 has been progressing for over a decade now, and the global Covid-19 pandemic has accelerated digitization in aggregate, in some cases progress in companies has stagnated. This paper elaborates the challenges that exist in the context of digital transformation in production and identifies future research priorities to drive digitization forward in a targeted manner. The challenges are identified by means of both a systematic literature review and semi-structured interviews.



Themen: Advanced Systems Engineering (ASE)/
Model-Based Systems Engineering

Stichworte: Gestalt-Funktion-Zusammenhang, Produktentwicklung, Wissensmanagement, Funktionsabgrenzung, Festkörpergelenk

Modellierung von abschnittswisen Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mithilfe des C&C²-Ansatzes

*Peter M. Tröster, Felix Prager, David Schmidt, Albert Albers
Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für
Produktentwicklung*

Durch das Ausscheiden vieler Entwickler der geburtenstarken Jahrgänge riskieren Unternehmen ein zunehmendes Schwinden ihres Wissens zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ). Um das zumeist an Mitarbeiter gebundene Wissen zu erhalten, muss dieses rechtzeitig und in geeigneter Form vermittelbar dokumentiert werden. Eine Möglichkeit zur Dokumentation von GFZ bietet der Contact&Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz). Dieser beinhaltet die drei Kernelemente Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) sowie Connector (C). Mittels dieser lassen sich Funktionen und die dafür notwendige Produktgestalt darlegen. Für die Modellierung von GFZ, die sich innerhalb eines Bauteils ändern, gibt es aktuell kein definiertes Vorgehen. Am Fallbeispiel eines Körpergelenks, bei dem diese Problematik besonders stark zum Vorschein kommt, wird in diesem Beitrag eine Möglichkeit zur übersichtlichen Modellierung von abschnittswisen GFZ aufgezeigt. Möglich wird dies durch die Einführung eines neuen Modellelements, der Funktionsabgrenzung (FA). Dieses Modellelement integriert sich in den Ansatz, ohne dabei die Grundannahmen der Methode zu verletzen. Darüber hinaus werden Vorschläge für eine verbesserte Darstellung von C&C²-Modellen erläutert. Demzufolge liefert diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Steigerung des Informationsgehalts von C&C²-Modellen bei gleichzeitiger Verbesserung der Übersichtlichkeit.

Topics: Advanced Systems Engineering (ASE)/Model-Based Systems Engineering

Keywords Embodiment-Function-Relation, Product Development, Knowledge Management, Functional Delimitation, Solid-State Hinge

Modeling of Embodiment Function Relations using the C&C²-Approach

*Peter M. Tröster, Felix Prager, David Schmidt, Albert Albers
Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product
Engineering*

With the retirement of many employees of the baby boomer generation, companies risk an increasing loss of knowledge regarding the embodiment function relations (EFR). In order to retain the knowledge that is mostly tied to employees, it has to be documented in good time and in a form that can be communicated easily. The Contact&Channel-Approach (C&C²-Approach) offers a possibility for the documentation of EFR. This includes the three key elements of Working Surface Pair (WSP), Channel and Support Structure (CSS) and Connector (C). The approach can be used to present functions and the product design required for them. There is currently no defined procedure for modeling EFR that change within a component. Using the example of a body joint, in which this problem is particularly evident, this article shows a possibility for clear modeling of sectional EFR. This is made possible by the introduction of a new model element, the Functional Delimitation (FD). This model element is integrated into the approach without violating the basic assumptions of the method. In addition, suggestions for an improved representation of C&C²-Models are explained. Consequently, this work makes an important contribution to increasing the information content of C&C²-Models while improving comprehensibility at the same time.

Session 3: Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Advanced Systems Engineering (ASE) /
Model-Based Systems Engineering, Nachhaltige
Produktentwicklung

Stichworte: Model-Based Systems Engineering,
Fahrzeugentwicklung, Produkt-Service-Systeme,
Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit

Modellbasierter Ansatz zur Unterstützung der nachhaltigen und nutzungsorientierten Fahrzeugkonzeption

Maximilian Werner¹, Luca Lanz²

¹Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

*²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT*

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird ein Ansatz zur Unterstützung der modellbasierten Konzeption von Produkt-Service-Systemen in den frühen Entwicklungsphasen präsentiert, welcher einen speziellen Fokus auf deren Einbettung in eine Kreislaufwirtschaft legt. Vor diesem Hintergrund wird aus dem Stand der Wissenschaft und Praxis folgernd ein Lösungsansatz im Sinne des Model-Based Systems Engineering vorgeschlagen. Trotzdem es bereits vielversprechende Ansätze zur Modellierung von PSS sowie kreislaufwirtschaftlicher Aspekte gibt, scheint deren kombinierte Betrachtung eine bestehende Forschungslücke darzustellen. Die Autoren stellen daher das PSS-CE-Metamodell als unterstützendes Modellierungswerkzeug vor, welches die Integration von emergierenden Anforderungen einer Kreislaufstrategie in die Systemarchitektur ermöglicht. Die Anwendung und Evaluierung des Lösungsansatzes erfolgt im Kontext des aktuellen Forschungsprojekts CYCLOMETRIC und wird anhand eines Carsharing-Systems als Fallbeispiel beschrieben. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse kritisch reflektiert und mögliche Ansatzpunkte für weiterführenden Forschungsbedarf genannt.

Topics: Advanced Systems Engineering (ASE) / Model-Based Systems Engineering, Sustainable Product Development

Keywords: Model-Based Systems Engineering,
Vehicle Development, Product-Service-Systems,
Circular Economy, Sustainability

Model-based approach to supporting sustainable and usage-oriented vehicle development

Maximilian Werner¹, Luca Lanz²

¹Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

*²University of Stuttgart, Institute of Human Factors and
Technology Management IAT*

This paper presents an approach to support the model-based conception of product-service-systems in the early development phases with a special focus on their embedding in a circular economy. Against this background, a solution approach in the sense of Model-Based Systems Engineering is proposed based on the state of the art in science and practice. Although there are already promising approaches for modeling PSS as well as circular economy aspects, their combined consideration seems to represent an existing research gap. Therefore, the authors present the PSS-CE Metamodel as a supporting modeling tool that enables the integration of emergent requirements of a circular strategy into the system architecture. The application and evaluation of the solution approach is carried out in the context of the current research project CYCLOMETRIC and is described using a car sharing system as a case study. Finally, the findings are critically reflected and possible starting points for further research are identified.



Track 2: Methoden und Prozesse der Produktentwicklung

Session 1: Konstruktionsmethodiken / Leichtbau in der Produktentwicklung und Agile Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Aluminiumschaum-Sandwich, Bewertungsmethode, Materialauswahl, Design for X (DfX), Leichtbau

Topics: Lightweight Design within the Product Development, Design Methodologies

Keywords: Aluminum Foam Sandwich, Evaluation Method, Material Selection, Design for X (DfX), Lightweight Design

Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials von Aluminiumschaum-Sandwich

Patrick Hommel, Daniel Roth, Hansgeorg Binz, Matthias Kreimeyer

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

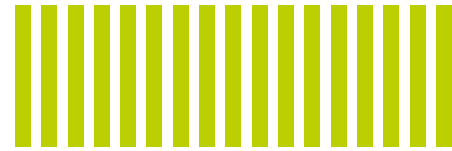
Method for Evaluating the Application Potential of Aluminum Foam Sandwich

Patrick Hommel, Daniel Roth, Hansgeorg Binz, Matthias Kreimeyer

University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Aluminiumschaum-Sandwich (AFS) ist aufgrund verschiedener Vorteile wie einer hohen Biegesteifigkeit bei geringer Dichte sowie guten mechanischen Energieabsorptionseigenschaften und einer hohen Recyclingfähigkeit eine innovative Materialkombination für Leichtbaustrukturen. In aktuellen Werkstoffauswahlverfahren wird AFS jedoch meist gar nicht erst berücksichtigt, da entweder aus Gewohnheit und wenig Risikobereitschaft ein bereits etablierter Werkstoff eingesetzt wird oder weil einige Werkstoffeigenschaften von AFS noch nicht ausreichend erforscht sind. Bewährte Auswahlmethoden können aufgrund unzureichend bewertbarer Werkstoffparameter für AFS nicht vollumfänglich eingesetzt werden. Infolgedessen wird AFS selten in industriellen Anwendungen eingesetzt und das Anwendungspotenzial bleibt ungenutzt. In diesem Beitrag wird eine Methode entwickelt, die das Einsatzpotenzial von AFS bewertet. Ein zweistufiges Verfahren ermöglicht dabei eine schnelle Bewertung der grundsätzlichen Eignung eines AFS-Einsatzes sowie im zweiten Schritt die Beurteilung, ob sich ein Werkstoffwechsel lohnt, da AFS gegenüber dem Referenzwerkstoff für die Anwendung einen größeren Nutzen vorweisen kann.

Aluminum foam sandwich (AFS) is an innovative material for lightweight structures due to various advantages such as a high bending stiffness at a low density as well as good mechanical energy absorption properties and a high recyclability. However, in current material selection processes, AFS is usually not even considered, either because an already established material is used due to familiarity and little risk tolerance, or because some material properties of AFS have not yet been sufficiently researched. Proven selection methods cannot be fully applied for AFS due to insufficiently evaluable material parameters. As a result, AFS is rarely used in industrial applications and its application potential remains untapped. In this paper, a method is developed to evaluate the application potential of AFS. A two-step procedure allows a quick evaluation of the basic suitability of an AFS application. In the second step, an assessment is made whether a material change is profitable because AFS can demonstrate a greater benefit for the application compared to the reference material.



Themen: Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Interdisziplinarität, Entwicklungsprozess, Geschossdecken, Bauingenieurwesen

Interdisziplinäre Entwicklung einer adaptiven Geschossdecke als leichtes Tragwerkselement im Bauwesen

Matthias J. Bosch¹, Markus Nitzlader², Michael P. Voigt¹, Matthias Bachmann¹, Daniel Roth¹, Hansgeorg Binz¹, Lucio Blandini², Matthias Kreimeyer¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

²Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)

Geschossdecken umfassen den Großteil der Masse eines Gebäudes. Ein Ansatz zur Reduktion des Materialeinsatzes sind adaptive Tragwerke, bei denen durch innere Aktuierung den äußeren Einwirkungen entgegengewirkt wird. Bei der Entwicklung geeigneter Aktuierungs- und dazugehöriger Aktorkonzepte für einzelne Tragwerkselemente, wie z. B. Geschossdecken, zeigt sich eine starke gegenseitige Beeinflussung zwischen beiden Konzeptbereichen, weshalb eine scharfe Abgrenzung der Aufgaben der beteiligten Disziplinen nicht gelingt. Es ist vielmehr eine sehr enge Abstimmung sowie die Identifikation der gegenseitigen Beeinflussung während des Entwicklungsprozesses notwendig. An einem Fallbeispiel werden die Abhängigkeiten für die Aktuierungs- und Aktorkonzeptentwicklung analysiert und grafisch aufgearbeitet. Durch eine Kondensation der Ergebnisse ergibt sich ein erster Ansatz für die interdisziplinäre Entwicklung adaptiver Tragwerkselemente.

Topics: Lightweight Design within the Product Development, Design Methodologies

Keywords: Interdisciplinarity, Development Process, Floor Slabs, Civil Engineering

Interdisciplinary development of an adaptive slab as a lightweight civil structure

Matthias J. Bosch¹, Markus Nitzlader², Michael P. Voigt¹, Matthias Bachmann¹, Daniel Roth¹, Hansgeorg Binz¹, Lucio Blandini², Matthias Kreimeyer¹

¹University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

²University of Stuttgart, Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design

Floor slabs comprise the majority of the mass of a building. One approach to reducing the use of materials is adaptive structures, in which external forces are counteracted by internal actuation. In the development of suitable actuation and associated actuator concepts for individual structural elements, such as floor slabs, there is a strong mutual influence between the actuation and actuator concept, meaning a clear separation between the tasks of the disciplines involved is not possible. Rather, a tight coordination as well as the identification of the mutual influence during the development process is necessary. A case study is used to analyze the dependencies for actuation and actuator concept development and to present them graphically. A condensation of the results results in a first approach for the interdisciplinary development of adaptive structural elements.

Session 1: Konstruktionsmethodiken / Leichtbau in der Produktentwicklung und Agile Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Agile Produktentwicklung

Stichworte: Stakeholder, Agile Produktentwicklung, Scrum, Sprint Review

Topics: Agile Product Development

Keywords: Stakeholder, Agile Product Development, Scrum, Sprint Review

Stakeholderbeteiligung im Sprint Review bei der agilen Produktentwicklung mechatronischer Systeme

Daniel Ankele¹, Katharina Duehr², Albert Albers¹, Nikola Bursac²

¹Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

²Technische Universität Hamburg, Institut für smarte Entwicklung und Maschinenelemente

In dieser Forschungsarbeit werden 39 Maßnahmen zur Steigerung der Stakeholderbeteiligung während des Sprint Reviews im Rahmen der agilen Produktentwicklung eines mechatronischen Systems vorgestellt. Durch die Anwendung von 15 Maßnahmen wird der Effekt auf die Stakeholderbeteiligung einer realen Produktentwicklung in einem industriellen Umfeld gezeigt. Die Maßnahmen sind zum Beispiel Selbstvorstellung der Stakeholder im Sprint Review, Umstellung der Beitragsreihenfolge, Einführung einer im Voraus veröffentlichten Agenda oder aktive Aufforderung zur Beteiligung. Abschließend werden die Maßnahmen in einer weiteren Studie einzeln von den Stakeholdern bezüglich ihres Aufwands und Nutzen bewertet. Es zeigt sich, dass durch die eingeführten Maßnahmen die Redezeit der Stakeholder um 41,6 % und die Anzahl der sich beteiligenden Stakeholder um 48,0% gesteigert werden konnte. Weiter wird veranschaulicht, dass für diese Steigerung mehrere Maßnahmen notwendig sind, da jeder Stakeholder unterschiedlich auf eine Maßnahme reagiert. Abschließend wird ein Ausblick gegeben, wie die Forschung im Bereich der Stakeholderbeteiligung im Rahmen eines Sprint Reviews weitergeführt werden kann.

Stakeholder participation in Sprint Review in agile product development of mechatronic systems

Daniel Ankele¹, Katharina Duehr², Albert Albers¹, Nikola Bursac²

¹Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product Engineering

²Hamburg University of Technology, ISEM - Institute for Smart Engineering and Machine Elements

This research paper presents 39 measures for increasing stakeholder participation during Sprint Review within the agile product development of a mechatronic system. Based on 15 selected measures, the effect on stakeholder participation in real product development in an industrial environment is shown. The measures are, for example, self-introduction of stakeholders in the sprint review, change of contribution order, introduction of an agenda published in advance or active invitation to participate. Finally, the measures are evaluated individually by the stakeholders regarding their benefits and efforts in a further study. It is shown that stakeholder participation in terms of speaking time is increased by 41,6% and the number of participating stakeholders is increased by 48,0% as a result of the introduced measures. It is further illustrated that multiple different measures are necessary for this increase, since each stakeholder reacts to and evaluates the benefits of a measure differently. At the end, the outlook shows how research in the area of stakeholder participation can be continued within the context of a Sprint Review.



Themen: Agile Produktentwicklung
Stichworte: Agile Methoden, Hybrides Projektmanagement, Produktentwicklung

Topics: Agile Product Development
Keywords: Agile Methods, Hybrid Project Management, Product Development

Projektspezifischer Einsatz agiler Methoden zur Entwicklung physischer Produkte

*Julian Baschin, David Schneider, Volkan Kizgin, Thomas Vietor
 Technische Universität Braunschweig, Institut für
 Konstruktionstechnik*

Project specific use of agile methods for the design of physical products

*Julian Baschin, David Schneider, Volkan Kizgin, Thomas Vietor
 Technische Universität Braunschweig, Institute of Engineering
 Design*

Die Branche des Maschinenbaus steht vor der Herausforderung steigender Produktkomplexität. Es resultieren umfangreiche Projekte zur Entwicklung mechatronischer Systeme, die im Rahmen des Projektmanagements geplant werden müssen. Die hohe Dynamik am Markt erfordert eine flexible Anpassungsfähigkeit der Produkte. Agile Methoden adressieren diese Herausforderung. Allerdings unterscheiden sich die Vorgehensweisen bei agilen Methoden aufgrund ihres Ursprungs in der Softwareentwicklung von klassischen Entwicklungsstrukturen im Maschinenbau. Daher sollten agile Methoden vor ihrem Einsatz entsprechend der vorliegenden Entwicklungssituation ausgewählt und angepasst werden. Dies erfolgt in der Praxis aber selten, da agile Methoden in der Entwicklung des Maschinenbaus noch nicht etabliert sind. Ziel des Papers ist daher die Unterstützung des Projektmanagers bei der systematischen Auswahl und Anpassung agiler Methoden. Es wird eine Methodik vorgestellt, die eine projektspezifische Auswahl gängiger agiler Methode ermöglicht. Darauf aufbauend wird ein Maßnahmenkatalog zur Eignungsverbesserung agiler Methoden gezeigt. Die Methodik wird in einem industriellen Entwicklungsprojekt getestet.

The mechanical engineering industry is confronted with the challenge of increasing product complexity. This results in extensive projects for the development of mechatronic systems, which have to be planned and monitored within the context of project management. The high dynamic on the market requires a flexible adaptability of the products. Agile methods address this challenge. However, the procedures for agile methods differ from classic development structures in mechanical engineering, due to their origin in software development. Therefore, agile methods should be selected and adapted according to the existing development situation. In practice, this is rarely done, because agile methods are not yet established in mechanical engineering development. Therefore, the aim of this paper is to support the project manager in the systematic selection and adaptation of agile methods. A methodology is presented that enables a project-specific selection of established agile methods. Based on this, a catalog of measures for improving the suitability of agile methods is shown. The methodology is tested in an industrial development project.

Session 2: Nachhaltige Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Nachhaltige Produktentwicklung

Stichworte: Nachhaltigkeit, Fahrzeuginnenräume, Schlüsselindikatoren

Topics: Innovation and Technology Management, Sustainable Product Development

Keywords: Sustainability, Vehicle Interiors, Key Performance Indicators

Schlüsselindikatoren für die nachhaltige Produktentwicklung von Fahrzeuginnenräumen

Julia Gritzbach, Florian Reichelt, Wolfram Remlinger, Thomas Maier

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Key Indicators for Sustainable Product Development of Vehicle Interiors

Julia Gritzbach, Florian Reichelt, Wolfram Remlinger, Thomas Maier

University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Die Forderungen, Nachhaltigkeit in der Automobilindustrie zu verankern, steigen. Dies führt vermehrt zu Handlungsbedarfen bei der Integration von Nachhaltigkeitsaspekten bereits in den frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung. Insbesondere die Mehrdeutigkeit von »Nachhaltigkeit« sowie die notwendige Berücksichtigung aller relevanten Aspekte in der Produktentwicklung stellt die OEMs aktuell vor Herausforderungen. Gerade Fahrzeuginnenräume weisen durch ihren direkten Kontakt zu den nutzenden Personen eine zentrale Rolle für die Darstellung und Etablierung vom Markenimage auf. Daher ist die Identifikation relevanter Schlüsselindikatoren (KPIs), die bei der Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen erforderlich sind, um im Sinne einer möglichst umfassenden Nachhaltigkeit (sozial, ökologisch und ökonomisch) fundierte Entscheidungen während des Produktentwicklungsprozesses treffen zu können, notwendig. Ziel dieses Beitrags ist es daher einerseits bestehende KPIs hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Sinne einer umfassenden Nachhaltigkeit zu untersuchen. Andererseits wird eine Methode zur Identifikation relevanter KPIs für die nachhaltige Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen entwickelt.

There are increasing demands to integrate sustainability into the automotive industry. This leads to a growing necessity for integration of sustainability aspects already in the early phases of vehicle development. In particular, the manifold meaning of "sustainability" and the necessary consideration of all relevant aspects in product development currently challenge OEMs. Therefore, the identification of relevant key performance indicators (KPIs), which are required in the development of vehicle interiors in order to be able to make decisions during the product development process in terms of a comprehensive sustainability (social, ecological and economic), is necessary. Vehicle interiors in particular play a central role in the representation and establishment of the brand image due to the direct contact with the users. The aim of this contribution is therefore to investigate the applicability of existing KPIs for comprehensive sustainability. On the other hand, a method for the identification of relevant KPIs for the sustainable design of vehicle interiors is developed.



Themen: Nachhaltige Produktentwicklung
Stichworte: Produktentwicklung, Nachhaltigkeit, Komplexität, Kontextfaktoren

Herausforderungen bei der Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Produktentwicklung von Unternehmen

Barbara Gröbe-Boxdorfer^{1,2}, Werner Engeln¹

¹Hochschule Pforzheim, Fakultät Maschinenbau

²Technische Universität Dresden, Professur für Technisches Design

Klimawandel und Ressourcenknappheit werden in Zukunft auch die Unternehmen vor große Herausforderungen stellen. Dabei nimmt die Produktentwicklung in einem Unternehmen für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen eine zentrale Rolle ein. Dieser Beitrag befasst sich mit der Frage, wie Personen in Unternehmen aktuell die Potenziale zur Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Unternehmen und in die Produktentwicklung einschätzen und wo ihrer Meinung nach die Probleme bei der Umsetzung von Nachhaltigkeitsanforderungen in der Produktentwicklung eines Unternehmens bestehen.

Es wird ein Überblick über die Ergebnisse einer qualitativen empirischen Untersuchung in Form einer Expertenbefragung mit Industrievertretern unterschiedlicher Branchen gegeben. Dabei zeigt sich, dass eine differenzierte Betrachtungsweise des Themas unbedingt weiter erforderlich ist, parallel vorangetrieben durch eine frühe Einführung des Themas in Bildungs- und Ausbildungsprogramme. Ein Ausblick auf die weitere Forschung schließt den Beitrag ab.

Topics: Sustainable Product Development
Keywords: Product Development, Sustainability, Complexity, Contextual Factors

Challenges in integration of sustainability requirements into product development of companies

Barbara Gröbe-Boxdorfer^{1,2}, Werner Engeln¹

¹Pforzheim University, Faculty of Engineering

²Technical University Dresden, Chair of Industrial Design Engineering

Climate change and scarcity of resources will play an increasingly important role for companies in the future. In this context, product development in a company plays a central role in achieving sustainability goals. This paper addresses the question of how people in companies currently assess the potential for integrating sustainability requirements into companies and product development, where they think the problems lie in implementing sustainability requirements in a company's product development.

An overview is given of the results of a qualitative empirical study in the form of an expert survey with industry representatives from various sectors. It is shown that a differentiated approach to the topic is absolutely necessary further, driven in parallel by an early introduction of the topic in education and training programs. The article concludes with an outlook on further research.

Session 2: Nachhaltige Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Design-Technik-Konvergenz, Nachhaltige Produktentwicklung

Stichworte: Kreislaufwirtschaft, Design for Circularity, Industrielle Produktentwicklung, Entscheidungsbaum, zirkuläre Geschäftsmodelle, Produktdesign

Operationalisierung von »Design for Circularity« in der industriellen Produktentwicklung

*Annika Pruhs, Anina Kusch, Tobias Viere, Jörg Woidasky
Hochschule Pforzheim, Institut für Industrial Ecology (INEC)*

Industrielle Produktentwicklungsprozesse müssen zukünftig den gesamten Lebensweg von Produkten von der Rohstoffförderung bis zum Ende der Nutzung berücksichtigen, um neben den bisher üblichen Eigenschafts- und Nutzenprofilen der Produkte zusätzlich noch kreislaufwirtschaftliche Verbesserungen wie Lebenszeitverlängerung, Weiternutzung oder hochwertiges Recycling hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Klimafreundlichkeit und Ressourceneffizienz möglichst automatisch bewerten zu können. Dies erfordert bei der Produktentwicklung prozessbegleitend anwendbare Bilanzierungsinstrumente und gleichzeitig die Berücksichtigung zirkulärer Geschäftsmodelle. Bisher fehlen hierfür überzeugende praxisorientierte Lösungsansätze. Um diese Forschungslücke zu schließen, stellt der vorliegende Beitrag die Operationalisierung eines übergreifenden Design for Circularity anhand eines auf zirkulären und technisch orientierten Vorgaben basierenden Entscheidungsbaums dar. Die Integration eines solchen Entscheidungsbaums in industrielle Produktentwicklungsprozesse ermöglicht den an Produktentwicklungen beteiligten Akteurinnen und Akteuren eine einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen und Konstruktionsmaßnahmen.

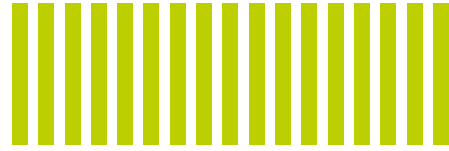
Topics: Design-Technology-Convergence, Sustainable Product Development

Keywords: Circular Economy, Design for Circularity, Industrial Product Development, Decision Tree, Circular Business Models, Product Design

Operationalisation of "Design for Circularity" in industrial product development

*Annika Pruhs, Anina Kusch, Tobias Viere, Jörg Woidasky
Pforzheim University, Institut für Industrial Ecology (INEC)*

In the future, industrial product development processes will have to consider the entire life cycle of products, from the extraction of raw materials to the end of use, in order to be able to evaluate, as automatically as possible, circular economy improvements such as lifetime extension, reuse or high-quality recycling with regard to economic efficiency, climate friendliness and resource efficiency, in addition to the usual property and benefit profiles of the products. This requires balancing instruments that can be applied in the product development process and at the same time the consideration of circular business models. So far, there is a lack of convincing practice-oriented approaches. To close this research gap, this paper presents the operationalization of a comprehensive Design for Circularity using a decision tree based on circular and technically oriented specifications. The integration of such a decision tree into industrial product development processes enables the actors involved in product developments to easily and systematically consider circular economic and environmentally relevant information and design measures.



Session 3: Produktkomplexität

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Advanced Systems Engineering (ASE)/ Model-Based Systems Engineering, Produktkomplexität

Stichworte: Design Structure Matrix, Assistenzsystem, Benutzungsoberfläche, Produktentwicklung, Verwaltungsschale

Topics: Advanced Systems Engineering (ASE)/ Model-Based Systems Engineering, Product Complexity

Keywords: Design Structure Matrix, Assistance System, User Interface, Systems Engineering, Asset Administration Shell

Ein DSM-basiertes Assistenzsystem zur Visualisierung von Artefaktbeziehungen in der Produktentwicklung von KMU

Jan-Phillip Herrmann¹, Christoph Trojanowski², Sebastian Imort¹, Carolin Pankrath³, Andreas Deuter¹, Sven Tackenberg¹

¹Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachbereich Produktions- und Holztechnik

²Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Fachbereich Informatik, Kommunikation und Wirtschaft

³LMtec Service GmbH

A DSM-based Assistance System for Visualizing Artifact Relationships in Product Development of SMEs

Jan-Phillip Herrmann¹, Christoph Trojanowski², Sebastian Imort¹, Carolin Pankrath³, Andreas Deuter¹, Sven Tackenberg¹

¹OWL University of Applied Sciences and Arts, Department of Production Engineering and Wood Technology

²University of Applied Sciences Berlin, Department of Computer Science, Communication and Business

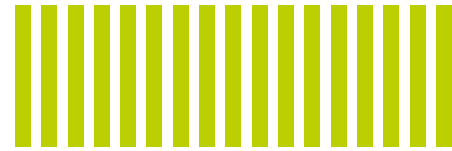
³LMtec Service GmbH

Die steigende Anzahl von Entwicklungsartefakten (z. B. mechanische oder elektronische Bauteile, Softwarefunktionen, Dokumente) konfrontiert klein- und mittelständische Unternehmen mit der Herausforderung, die vielfältigen Wirkbeziehungen zwischen Artefakten zu überblicken. Die fehlende Kenntnis von Artefaktbeziehungen verursacht Probleme, wie beispielsweise Fehleinschätzungen der Auswirkungen technischer Änderungen auf Abteilungen und das Gesamtsystem. Mit Hilfe der Design Structure Matrix (DSM) lassen sich die Elemente und Beziehungen von komplexen Systemen übersichtlich darstellen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein auf der DSM basierendes Assistenzsystem vorgestellt, welches Artefakte und Artefaktbeziehungen mittels dreidimensionaler graphbasierter Benutzungsoberfläche darstellt. Das Assistenzsystem nutzt Algorithmen zur Berechnung von Graphlayouts, Clusteranalysen und Vorhersagen von Änderungsauswirkungen. Es werden die Algorithmen und die resultierenden Darstellungsformen beschrieben. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion des Nutzens und zukünftiger Aktivitäten.

The increasing number of product development artifacts (e. g., mechanical or electrical components, software functions, documents) when developing complex systems confronts SMEs with preserving the overview of their manifold relationships. Unawareness of relationships can cause problems like missing communication of changes or product developers failing to predict engineering change effects on the system. The design structure matrix (DSM) is a matrix-based representation of the elements and relationships in a complex system.

This paper describes a DSM-based assistance system that visualizes product development artifacts and their relationships in a three-dimensional graph-based user interface. The assistance system employs different algorithms for graph layout generation, cluster analysis, and prediction of engineering change effects newly developed or modified from the literature. The algorithms and the resulting visualizations are presented. It is closed by discussing the assistance system's benefits for product developers and outlining future activities.



Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Produktkomplexität

Stichworte: Produktdokumentation, Variantenvielfalt, Optimierung des Produktportfolios, Automobilindustrie, Erfüllbarkeitsproblem, SAT-Solver

Datengetriebene Optimierung des Produktportfolios für hochvariante Endprodukte der Automobilindustrie

Anastasia Marbach¹, Florian Tichla¹, Thorsten Schmidt², Frank Mantwill²

¹Hamburg Analytics EDS GmbH

²Helmut Schmidt Universität, Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung

Diese Ausarbeitung systematisiert die Nutzung bestehender Informationen aus der Produktdokumentation für die Optimierung des Produktportfolios variantenreicher Produkte.

Da in der Automobilindustrie nach dem Generationsprinzip konstruiert wird, lassen sich viele Informationen von einem Vorgängerfahrzeug auf ein neues Projekt übertragen. Somit können Annahmen basierend auf der Produktdokumentation eines Vorgängerfahrzeugs ausgewertet werden sowie systematisch Vorschläge zur Optimierung des Angebotsprogramms ermittelt werden. Das Ziel der Optimierung ist die Reduktion der internen Komplexität unter der Nebenbedingung, dass nur besonders wenig nachgefragte Endprodukte gestrichen werden. Hierfür wird ein Vorgehen entwickelt, welches in Form von Was-wäre-wenn Analysen zur Überprüfung von Annahmen bezüglich Produktvarianten fungiert. Den besonderen Erfordernissen, die aus der Variantenbeschreibung in der deutschen Automobilindustrie resultieren, wird mit einer Modellierung als Erfüllbarkeitsproblem und dem Einsatz eines SAT-Solvers begegnet. Weiterhin werden Methoden vorgestellt, um automatisiert Vorschläge zur Optimierung des Produktportfolios zu ermitteln.

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Product Complexity

Keywords: Product Documentation, Product Variance, Optimization of the Product Portfolio, Automotive Industry, Satisfiability Problem, SAT Solver

Data-Driven Optimization of the Product Portfolio for Highly Variant End Products in the Automotive Industry

Anastasia Marbach¹, Florian Tichla¹, Thorsten Schmidt², Frank Mantwill²

¹Hamburg Analytics EDS GmbH

²Helmut Schmidt Universität, Chair for Machine Elements and Computer Aided Product Design

This paper systematizes the usage of existing information from the product documentation for the optimization of the product portfolio for variant-rich products.

Since design in the automotive industry is based on the generation principle, a lot of information from a predecessor vehicle can be transferred to a new project. Thus, assumptions based on the product documentation of a predecessor vehicle can be evaluated and suggestions for optimizing the product portfolio can be systematically determined. The aim of the optimization is the reduction of the internal complexity under the constraint that only those end-product variants are removed which were not in demand at all or which were in particularly low demand. For this purpose, a procedure is developed which uses "what-if" analyses to check assumptions regarding product variants. The special requirements resulting from the description of variants in the German automotive industry are met by modeling them as a satisfiability problem and by using a SAT solver. Furthermore, methods are presented to automatically determine proposals for the optimization of the product portfolio.

Session 3: Produktkomplexität

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Digital Engineering, Produktkomplexität
Stichworte: Produktportfoliokomplexität, Variantenmanagement, Assoziationsanalyse, Künstliche Intelligenz, FP-Growth

Topics: Digital Engineering, Product Complexity
Keywords: Product Portfolio Complexity, Variety Management, Association Rule Mining, Artificial Intelligence, FP-Growth

Reduktion komplexer Produktportfolios durch die Ableitung von Kombinatorikregeln aus verkauften Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse

Jan Mehlstäubl¹, Felix Braun², Kristin Paetzold-Byhain¹

¹Technische Universität Dresden, Professur für Virtuelle Produktentwicklung

²MAN Truck & Bus SE

Aufgrund der Nachfrage nach individualisierten Produkten, steigt die Anzahl der angebotenen Produktvarianten in vielen Unternehmen immer weiter an. Trotz des Einsatzes von Strategien zur variantenorientierten Produktstrukturierung kann die resultierende Komplexität in den Produkten und Prozessen mit den heutigen manuellen und erfahrungsbasierten Verfahren nicht mehr beherrscht werden. Es werden daher intelligente und datengetriebene Ansätze zur Analyse komplexer Produktportfolios benötigt.

In dieser Arbeit wird ein methodisches Vorgehen vorgestellt, mit dem Regeln zur Einschränkung des Produktportfolios, sogenannte Kombinatorikregeln, aus den Daten verkaufter Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse automatisch abgeleitet werden können. Durch den Einsatz des FP-Growth Algorithmus können komplexe Produktportfolios mit einer Vielzahl an konfigurierbaren Kundenmerkmalen analysiert und unter Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse systematisch reduziert werden. Der Ansatz wird in einer Fallstudie anhand eines realen Vertriebsdatensatzes eines Nutzfahrzeugherstellers mit einem besonders breiten und tiefen Produktportfolio angewandt und validiert.

Reduction of complex product portfolios by generating combinatoric rules from sold product configurations with association rule mining

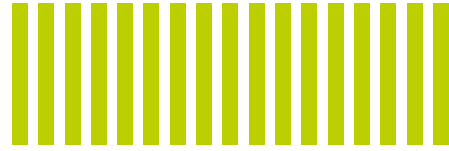
Jan Mehlstäubl¹, Felix Braun², Kristin Paetzold-Byhain¹

¹Technical University Dresden, Chair of Virtual Product Development

²MAN Truck & Bus SE

Due to the demand for individualised products, the number of product variants offered is constantly increasing in many companies. Despite the use of strategies for variant-oriented product structuring, the resulting complexity in the products and processes can no longer be managed with today's manual and experience-based procedures. Therefore, intelligent and data-driven methods for the analysis of complex product portfolios are needed.

This paper introduces a methodological approach to automatically derive product portfolio restriction in form of rules, so-called combinatoric rules, from data of sold product configurations with association rule mining. By using the FP-Growth algorithm, complex product portfolios with a large number of configurable customer features can be analysed and systematically reduced, taking into account customer needs. The approach was applied and validated in a case study using a real sales data set of a commercial vehicle manufacturer with a particularly broad and deep product portfolio.



Track 3: Technologiemanagement und Zuverlässigkeitstechnik

Session 1: Innovations- und Technologiemanagement

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Nachhaltige Produktentwicklung

Stichworte: Missionsorientierte Innovationspolitik, Innovationsökosysteme, Management

Topics: Innovation and Technology Management, Sustainable Product Development

Keywords: Mission-Oriented Innovation, Innovation Ecosystems, Management

»Shaping Missions«-Tool – Ein Managementinstrument für missionsorientierte Innovationsökosysteme

Lale Altinalana-Widenka

Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI),
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

The "Shaping Missions" tool – A management instrument for mission-oriented innovation ecosystems

Lale Altinalana-Widenka

Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI),
Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

Angesichts großer globaler Herausforderungen wie dem Klimawandel und der damit einhergehenden zunehmenden Komplexität bedarf es Innovationen, die sich an Missionen orientieren, sowie der Zusammenarbeit verschiedener Akteure aus unterschiedlichen Sektoren innerhalb von Innovationsökosystemen. Um Organisationen dabei zu unterstützen, ihre Innovationsökosysteme zu analysieren und missionsorientiert auszubauen, wurde das »Shaping Missions«-Tool entwickelt. Dieses forschungsbasierte Managementinstrument zielt darauf ab, die notwendige Kollaboration zwischen Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Wirtschaft in missionsorientierten Netzwerken so zu gestalten, dass die gemeinsamen Missionen effektiv verfolgt werden können.

In the face of major global challenges such as climate change and the increasing complexity associated with it, mission-oriented innovations are needed, as well as the collaboration of various actors from different sectors within innovation ecosystems. To help organizations analyze and develop their innovation ecosystems in a mission-oriented way, the "Shaping Missions" tool was developed. This research-based management method aims at shaping the necessary collaboration between science, civil society, politics and business in mission-oriented networks in such a way that the shared missions can be effectively pursued.



Themen: Agile Produktentwicklung, Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Entscheidungstheorie, Single Pass Bayesian Reasoning, Entwicklungsentscheidungen

Probabilistisch entscheiden in der Produktentwicklung

*Manfred Dangelmaier, Katharina Hölzle
Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT*

Produktentwicklung ist eine Abfolge von Entwicklungsentscheidungen. Unter Unsicherheit und in prekärer Datenlage versagen unsere gängigen Verfahren zur Entscheidungsunterstützung. Wir schlagen deshalb ein auf den Kolmogorowschen Axiomen und dem Bayesschen Theorem basierendes Single Pass Bayesian Reasoning (SPBR) vor. Es ordnet die Entscheidungsalternativen anhand der Wahrscheinlichkeit, dass die jeweilige Alternative die beste ist. Dazu werden die vorliegenden Evidenzen gesammelt, und mittels Likelihoodverhältnissen die Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Wir zeigen die Anwendung von SPBR in der Produktentwicklung anhand von User Stories. Wir weisen nach, dass SPBR sowohl bei qualitativen Evidenzen als auch mit parametrisierten Kriterien angewendet werden kann. Es ist für subjektive, kollektive und datenbasierte rationale Entwicklungsentscheidungen geeignet. SPBR unterstützt reife Entscheidungen. Bei volatilen Entscheidungssituationen mit wechselnden Handlungsalternativen, bei abhängigen Evidenzen, bei variierender Bedingtheit und bei sehr geringen Ressourcen für Entscheidungen kommt es an seine Grenzen.

Topics: Agile Product Development, Innovation and Technology Management

Keywords: Decision Theory, Single Pass Bayesian Reasoning, Development Decisions

Probabilistic decision-making in product development

*Manfred Dangelmaier, Katharina Hölzle
University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management IAT*

Product development is a sequence of development decisions. Under uncertainty and sparse data, our current decision support methods fail. We therefore propose a Single Pass Bayesian Reasoning (SPBR) based on Kolmogorov's axioms and Bayes' theorem. It ranks decision alternatives based on the probability that each alternative is the best. For this purpose, the available evidence is collected, and using likelihood ratios, the probabilities are computed.

We demonstrate the application of SPBR in product development by means of user stories. We prove that SPBR can be applied to qualitative evidence as well as with parameterized criteria. It is suitable for subjective, collective, and data-based rational development decisions. SPBR supports maturing decisions. It reaches its limits in volatile decision situations with changing alternative courses of action, with dependent evidence, with varying conditionality, and with very low resources for decisions.

Session 1: Innovations- und Technologiemanagement

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Wissensmanagement in der Produktentwicklung
Stichworte: Start-up, Trendmanagement, Innovationsmanagement, Kollaboration, New Work

DigiTales2GO: Konzept zur Erfassung und Bewertung von Start-ups im Trendmanagement

Harriet Kasper¹, Daniel Pawlowicz², Felix Scheerer², Monika Kochanowski³

¹Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

³Duale Hochschule Baden-Württemberg

Die Beobachtung und Analyse von Start-ups ist eine neue Möglichkeit, um Trends zu erkennen und somit eine Alternative zu der oft sehr allgemeinen und aufgrund der Methodik in der Kritik stehenden Trendliteratur. Der Beitrag beschreibt das Konzept und die prototypische Implementierung einer Anwendung in der Start-up-Daten, aber auch aufkommende Technologien und Trends, dargestellt und durch die Mitarbeitenden eines Unternehmens bewertet werden können. Die Weisheit der Vielen liefert eine Datenbasis, auf deren Grundlage im Trend- oder Innovationsmanagement, Trends identifiziert werden und Handlungsoptionen abgeleitet werden können. Wesentliche Neuerung, im Vergleich zu bestehenden Werkzeugen, ist die einfache Bewertung mittels Wisch-Bewegung (Swipe) auf dem Smartphone. Das Vorgehen ist im Kontext von New Work und dem durch Corona beschleunigten Wandel zu mehr Homeoffice vielversprechend, wie die vorgestellte Evaluation des Prototyps zeigt. Grundsätzliche Überlegungen, wichtige Funktionen und Erweiterungsmöglichkeiten werden diskutiert.

Topics: Innovation and Technology Management, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Startup, Trend Management, Innovation Management, Collaboration, New Work

DigiTales2GO: Concept for Describing and Assessing Start-ups for Managing Trends

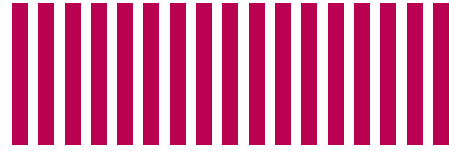
Harriet Kasper¹, Daniel Pawlowicz², Felix Scheerer², Monika Kochanowski³

¹Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

²University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management IAT

³Baden-Wuerttemberg Cooperative State University (DHBW)

Observing and analyzing start-ups is a new possibility to identify trends and an alternative approach to generic trend literature which has been criticized for its methodology. The paper describes the concept and prototype of an application which displays start-up data, emerging technologies, and trends and invites employees to rate these items. The wisdom of the crowd generates data that can be used in innovation or trend management to identify trends and derive actions for companies. The interaction by a simple swipe on the smartphone is a novel approach in this area, which has not yet been implemented on similar applications. However, this approach is promising in the context of new work, as the presented evaluation of the prototype shows. General considerations, important functionalities, and possibilities to extend the concept implemented in the prototype, are discussed.



Session 2: Innovations- und Technologiemanagement und Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Model-Based Systems Engineering, Innovationsmanagement, Prozessmodelle, Wissensbasis, Innovationsprozess

Ansatz zur Kollaboration in Wertschöpfungsnetzwerk-zentrierten Innovationsprozessen Smarter Produkte

Damun Mollahassani, Yannick Juresa, Thomas Eickhoff, Jens C. Göbel

Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung

Der Wandel traditioneller mechatronischer Produkte hin zu smarten interdisziplinären Produkten führt zu einer erhöhten Komplexität aller Prozesse entlang des Produktlebenszyklus. Um in diesem Kontext Innovationen hinreichend schnell vorantreiben zu können, ist eine effiziente Kollaboration in der Innovationsphase notwendig die sich über alle beteiligten Disziplinen und Innovationspartner (Hersteller, Zulieferer, Forschungspartner) erstreckt. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz zielt auf die Unterstützung einer modellbasierten Innovationsentwicklung von Smarten Produkten innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken ab. Zentraler Bestandteil des Ansatzes ist eine kollaborative Wissensbasis, die den Innovationsprozess in diesem Umfeld unterstützen kann, bzw. welche Anforderungen an diese sich aus den genannten Rahmenbedingungen ergeben. Konkrete Ansätze für eine entsprechende technische Umsetzung werden aufgezeigt. Durch ein graphorientiertes Datenmodell und den Einsatz einer mehrstufigen Tagging-Systematik wird eine effiziente Vernetzung des Wissens aller betroffenen Partner ermöglicht. Die Funktionsweise des Ansatzes wird anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels validiert.

Topics: Innovation and Technology Management, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Model-Based Systems Engineering, Innovation Management, Process Models, Knowledge base, Innovation process

Approach for collaboration in value network-centric innovation processes of smart products

Damun Mollahassani, Yannick Juresa, Thomas Eickhoff, Jens C. Göbel

Technische Universität Kaiserslautern, Institute for Virtual Product Engineering

The transformation of traditional mechatronic products to smart, interdisciplinary products leads to increased complexity in all processes along the product lifecycle. In order to be able to drive innovations forward sufficiently quickly in this context, efficient collaboration is required in the innovation phase that extends across all disciplines involved at all innovation partners concerned (manufacturers, suppliers, research partners). The approach presented in this paper aims at supporting a model-based innovation development of smart products within value networks. A central component of the approach is a collaborative knowledge base that can support the innovation process in this environment, or which requirements for this arise from the framework conditions mentioned. Concrete approaches for a corresponding technical implementation are shown. A graph-oriented data model and the use of a multi-level tagging system enable an efficient networking of the knowledge of all partners involved. The functionality of the approach is validated by means of an industrial application example.



Themen: Digital Engineering, Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Produktinnovation, Produktumfeld, Einflussdimensionen, Semantische Netze, Text Mining

Semantische Modellierung des Produkts und Produktumfelds mithilfe von Text Mining zur Initiierung des Innovationsprozesses

Hendrik Lauf¹, Michael Riesener¹, Maximilian Kuhn¹, Christoph Luckhaus¹, Günther Schuh^{1,2}

¹RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Produktionssystematik

²Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)

Für den Erhalt der eigenen Wettbewerbsfähigkeit müssen Unternehmen bestehende Produkte unter Berücksichtigung eines multidimensionalen Umfelds innovieren. Ein Potenzial zur Analyse dieses Produktumfelds bieten Textdaten, die bereits heute in großen Mengen öffentlich verfügbar sind. Dieses Potenzial wird bisher nicht vollumfänglich für den Innovationsprozess ausgeschöpft, da eine holistische Methode zur produktbezogenen Auswertung und Rückführung der Ergebnisse fehlt. Die vorliegende Methode schließt diese Lücke, indem Textdaten aus dem Produktumfeld mit Text Mining analysiert und die Ergebnisse in einem semantischen Netz verknüpft werden. Dazu wird zunächst das bestehende Produkt semantisch modelliert. Anschließend werden die relevanten Einflussdimensionen des Umfelds abgeleitet. Textdaten aus den zugehörigen Datenquellen werden vorverarbeitet und mit Hilfe von Text Mining analysiert, um die relevanten Informationen zu extrahieren. Schließlich werden die Informationen zu einem semantischen Netz verknüpft, die das für die Produktinnovation relevante Produktumfeld modelliert.

Topics: Digital Engineering, Innovation and Technology Management

Keywords: Product Innovation, Product Environment, Influence Dimensions, Semantic Network, Text Mining

Semantic modelling of product and product environment using text mining to trigger the innovation process

Hendrik Lauf¹, Michael Riesener¹, Maximilian Kuhn¹, Christoph Luckhaus¹, Günther Schuh^{1,2}

¹RWTH Aachen University, Chair of Production Engineering

²Fraunhofer Institute for Production Technology (IPT)

To maintain their own competitiveness, companies must innovate existing products while taking into account a multi-dimensional environment. Text data, which is already publicly available in large quantities, offers a potential for analyzing this product environment. So far, this potential has not been fully exploited for the innovation process because a holistic method for product-related evaluation and feedback of the results is missing. The present method closes this gap by analyzing text data from the product environment with text mining and linking the results in a semantic network. For this purpose, the existing product is first semantically modelled. Then the relevant dimensions of influence of the environment to be analyzed are derived. Text data from these data sources is preprocessed and analyzed using text mining to extract the relevant information. Finally, the information is linked to form a semantic network that models the product environment relevant to product innovation.

Session 2: Innovations- und Technologiemanagement und Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Digital Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Herstellkostenschätzung, Modell der PGE, Referenzsystemelement, Ontologie, Wissensgraph

Topics: Digital Engineering, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Manufacturing Cost Estimation, Model of PGE, Reference System Element, Ontology, Knowledge Graph

Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung – Semantische Technologien für die Prozesskettenplanung

Fynn Hellweg^{1,2}, Simon Haneke¹, Ardian Cacaj¹, Simon Rapp², Albert Albers²

¹Robert Bosch GmbH

²Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

Method for reference-based manufacturing cost estimation – using semantic technologies for process planning

Fynn Hellweg^{1,2}, Simon Haneke¹, Ardian Cacaj¹, Simon Rapp², Albert Albers²

¹Robert Bosch GmbH

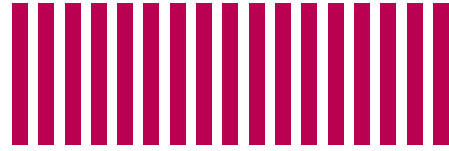
²Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product Engineering

In schwierigen Marktsituation müssen Unternehmen ihre Produktkosten aktiv steuern. Herstellkostenschätzungen bieten dabei eine solide Grundlage für Design- und Managemententscheidungen. Während diese die Profitabilität eines Unternehmens sichern, ist ihre Erstellung aufwendig und erfordert fundiertes Wissen an der Schnittstelle zwischen Konstruktion, Fertigung und Kosten. Die erforderlichen Informationen sind dabei häufig unstrukturiert und nicht maschinenlesbar gespeichert.

In dieser Studie wird eine Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung unter Verwendung semantischer Technologien vorgestellt. Dazu wurde eine Ontologie entwickelt, die sich am Modell der PGE - Produktgenerationsentwicklung orientiert. Die Methode führt durch die Herstellkostenschätzung eines Bauteils. Zusätzlich wurde ein Prototyp entwickelt und initial evaluiert. Dieser verwendet eine STEP-Datei mit Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) als Eingabe und liefert einen Kostenwert als Ausgabe. Die Studie veranschaulicht das Automatisierungspotenzial der Methode, zeigt aber auch ihre Grenzen auf. Schließlich wird eine breitere anwendungsbezogene Evaluierung der vorgeschlagenen Methode ermöglicht.

In today's challenging market situations, companies need to actively manage their product costs. Manufacturing cost estimation provides a basis for sound design and management decisions. While this secures a company's profitability, manufacturing cost estimation is a high-effort activity and requires in-depth knowledge of the intersection of design, manufacturing and costs. Required information is often stored in an unstructured, not machine-readable way.

This research presents a method for reference-based manufacturing cost estimation using semantic technologies. Therefore, an ontology was developed guided by the model of PGE – Product Generation Engineering. The user-centered method contains six steps leading through a manufacturing cost estimation of a component. Also, a prototype was developed and initially evaluated in a case study. It uses a STEP-file including product manufacturing information (PMI) as input and returns a cost value as output. The study illustrates the proposed method's automation potential, but also highlights its limitations. Finally, this study enables a broader application-based evaluation of the proposed method.



Session 3: Zuverlässige Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Eigenfrequenzen, Moden, Schwingungsanalyse, Sensorposition, Zustandsüberwachung

Vergleich von experimenteller und numerischer Modalanalyse für die Optimierung der Messdatenerfassung an einem Industriegetriebe

Manuel Bauer¹, Maximilian Schlotz¹, Tobit Salat¹, Fabian Wagner², Markus Kley¹

¹Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik

²Hochschule Aalen, Fakultät für Elektronik und Informatik

Die vorausschauende Instandhaltung ist in der Industrie heutzutage von großer Bedeutung. Hierdurch können Kosten reduziert und Risiken minimiert werden. In der Zustandsüberwachung, die für diese vorausschauende Instandhaltung relevant ist, hat sich die Schwingungsanalyse als bewährte Methode etabliert. Damit lassen sich Schäden schon bei der Entstehung erfassen und bewerten. Für die Schwingungsanalyse werden Schwingungsaufnehmer eingesetzt. Die allgemeine Empfehlung für die Positionierung der Sensoren ist es, den Abstand zum Schaden möglichst gering zu halten. Es gibt allerdings viele Gründe warum ein Sensor nicht immer nach dieser einfachen Regel positioniert werden kann. Da die Sensorposition einen großen Einfluss auf die Messergebnisse hat, ist es die Motivation eine Methode zur Sensorpositionierung zu entwickeln. Dafür werden als Basis in diesem Artikel unterschiedliche Modalanalysemethoden verglichen. Durch diese Untersuchung wird ein Verständnis für die Strukturschwingung aufgebaut und die Basis für die auf diesen Artikel aufbauende Methodenentwicklung für die Sensorpositionierung geschaffen.

Topics: Sustainable Product Development, Reliable Product Development

Keywords: Natural Frequencies, Modes, Vibration Analysis, Sensor Position, Condition Monitoring

Comparison of experimental and numerical modal analysis for the optimization of measurement data acquisition on an industrial gearbox

Manuel Bauer¹, Maximilian Schlotz¹, Tobit Salat¹, Fabian Wagner², Markus Kley¹

¹Aalen University, Institute for Drive Technology

²Aalen University, Faculty Electrical Engineering & Computer Science

Predictive maintenance is of great importance in today's industry. This can reduce costs and minimise risks. In condition monitoring, which is relevant for predictive maintenance, vibration analysis has established itself as a proven method. It allows damage to be detected and assessed as soon as it occurs. Vibration transducers are used for vibration analysis. The general recommendation for positioning the sensors is to keep the distance to the damage as small as possible. However, there are many reasons why a sensor cannot always be positioned according to this simple rule. Since the sensor position has a great influence on the measurement results, the motivation is to develop a method for sensor positioning. For this purpose, different modal analysis methods are compared as a basis in this article. Through this investigation an understanding of the structural vibration is built up and the basis for the method development for sensor positioning based on this article is created.



Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Rechnergestützte Produktentwicklung, Füge-technik, Karosseriebau

Methode zur frühzeitigen marken- und segment- übergreifenden Auswahl der Füge-technik im Karosseriebau

Max Hofmann^{1,3}, Heiko Rudolf², Frank Mantwill³

¹Volkswagen AG Wolfsburg

²Hochschule Anhalt

³Helmut Schmidt Universität, Maschinenelemente und Rechner-
gestützte Produktentwicklung

Für die Produktentwicklung im Karosseriebau wird eine Methode entwickelt, welche die Auswahl einer potenziellen Füge-technik in einer sehr frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses verbessert. Um dieses Ziel zu erreichen, muss eine Datenbasis geschaffen und aufbereitet, relevante Eigenschaften gewichtet und spezifische Parameter berücksichtigt werden. Bisherige Methoden fokussieren sich auf Normteile, Multi-Material-Verbindungen oder benötigen umfangreiche Informationen zu angrenzenden Baugruppen. Voraussetzung dafür ist eine marken- und segmentübergreifende Datenbasis der Füge-techniken zu erstellen. Deshalb wurden zunächst verschiedene Füge-techniken und Fügestellen untersucht. Darauf aufbauend wurde eine Methode entworfen, welche den allgemeinen Produktentwicklungsprozess durch die Auswahl der richtigen Füge-technik verkürzt. Bei der Umsetzung in einem marken- und segmentübergreifend Unterstützungsprogramm wurde die Methode weiter validiert, so dass relevante Anforderungen stärker bedacht werden und eine Anpassung der Bewertung an spezifische Anlagen und Prozesse möglich ist. Schlussendlich kann der Prozess auf andere Unternehmen und Produkte mit einer Modellvielfalt übertragen werden.

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Reliable Product Development

Keywords: Computer-Aided Product Development, Joining Technology, Car Body Creation

Method for early cross brand and segment Selection of Joining Technology in Car Body Creation

Max Hofmann^{1,3}, Heiko Rudolf², Frank Mantwill³

¹Volkswagen AG Wolfsburg

²Anhalt University of Applied Sciences

³Helmut Schmidt Universität, Chair for Machine Elements and
Computer Aided Product Design

For product development in car body creation, a method is designed that improves the selection of a potential joining technology at a very early stage of the product development process. In order to achieve this goal, a database must be created and processed, relevant properties weighted and specific parameters taken into account. Previous methods focus on standard parts, multi-material connections or require extensive information on adjacent assemblies. The prerequisite for this is to create a cross-brand and cross-segment database on joining technologies. For this purpose, various joining techniques and joints were first investigated. Based on this, a method was designed that shortens the general product development process by selecting the right joining technology. During implementation in a cross-brand and cross-segment support program, the method was further validated so that relevant requirements are given greater consideration and the assessment can be adapted to specific technologies and processes. Finally, the process can be transferred to other companies and products with a variety of models.

Session 3: Zuverlässige Produktentwicklung

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Erprobungsmethodik, Erprobungswissen, Antriebssystemintegration, Toolstrategie, Validierung

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Reliable Product Development

Keywords: Testing Methodology, Testing Knowledge, Drive System Integration, Tool Strategy, Validation

Erprobungsmethodik und Toolstrategie auf Prüfständen zur Fahrzeugantriebsintegration

Carsten Karthaus, Johannes Schweers, Fabian Seger, Harald Behrendt

Mercedes-Benz AG

Die Antriebstechnologie von PKW wandelt sich und der zukünftige Antrieb ist stärker mit dem Softwareprodukt Fahrzeug vernetzt. Beide Transformationen bedingen eine Veränderung der Art zu erproben hin zu komplexeren Systemen mit verkürzter Entwicklungszeit. Gerade in der Erprobung steigt dadurch der Bedarf nach einer effizienten, generischen und durchgängigen Erprobungsstrategie. Die Antriebssystemerprobung auf Prüfständen begegnet diesen Herausforderungen mit einer angepassten Erprobungsmethodik und Toolstrategie, welche sich im Beitrag auf die Systeme Automatisierungstechnik und Sollwertvorgabe bezieht.

Um durchgängig auf allen Prüfständen mehrere Aufgaben erfüllen zu können, erfolgt eine testplattformübergreifende Funktionsintegration in der Automatisierungstechnik. Durch diese Integrationsstrategie wird in der Sollwertvorgabe eine Diversifikation möglich. Diese Diversifikation erlaubt es, für jede Aufgabe das effektivste Tool einzusetzen. Das ergibt eine Portfolioerweiterung aller Prüfstände. Die durchgängige Nutzung von einmalig entwickelten Funktionen und Erprobungsmethoden in mehreren Prüffeldern wird verbessert. Die Auswirkungen auf die Produktentwicklung werden aufgezeigt.

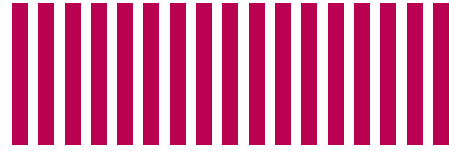
Testing methodology and tool strategy on test benches for vehicle drivetrain integration

Carsten Karthaus, Johannes Schweers, Fabian Seger, Harald Behrendt

Mercedes-Benz AG

The drivetrain technology of vehicles is changing and the future drivetrain is more interconnected with the software product vehicle. Both transformations require a change in the way of developing and testing in the means of complexity and time to market. This leads to an efficient, generic and consistent test strategy. Drivetrain testing on test benches meets these challenges with an adapted testing methodology and a new tool strategy. In this article, this tool strategy relates primarily to the automation technology (test bench automation) and setpoint-setting-system (test run automation).

In order to be able to perform several tasks consistently on all test benches, a cross-test platform function integration takes place in the automation technology. This integration strategy enables diversification in the setpoint-setting-system. This diversification allows the most effective tool to be used for each task. This results in a portfolio expansion of all test benches. The continuous use of unique developed functions and test methods in several test fields is improved. The impact on product development is demonstrated



Track 4: Nutzerzentriertes Design und DES=ING

Session 1: Nutzerzentriertes Design

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Digital Engineering, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Bilderkennung, KI-Anwendung, Anthropometrische Messung, Experiment, Hand

Experiment zur digitalen Erfassung anthropometrischer Maße der Hand mittels maschineller Bilderkennung

*Jonathan Kiessling, Michael Tondera, Thomas Maier
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD)*

Im nutzerzentrierten Design von Hand-Produkt-Schnittstellen sind häufig Kenntnisse über die Maße der Hände von Nutzern relevant. Während umfangreiche Datenbanken und digitale Modelle als Hilfsmittel existieren, werden in bestimmten Fällen die akkuraten Daten spezifischer Nutzer benötigt. Diese Arbeit kombiniert ein bestehendes KI-Modul zur Erkennung von Punkten der Hand mit maschineller Konturerkennung und einem physischen Aufbau. Dadurch wird eine Messmethode für zweidimensionale Oberflächenmaße der Hand vorgestellt. In einem Experiment mit $n = 30$ Probanden wird diese Methode mit dem gängigen Standard, der manuellen Messung mit Messschieber und Gleitzirkel verglichen. Die vergleichende Analyse basiert auf Bland-Altman. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Präzision (geringe Abweichung zwischen den Messungen) bei verbesserungsfähiger Genauigkeit (Abweichungen zu standardisierten Messverfahren). Es werden Vorschläge zur Verbesserung und zur Anwendung der Ergebnisse in Nutzerstudien, CAD-Integration und der Produktgestaltung gegeben.

Topics: Digital Engineering, Sustainable Product Development

Keywords: Computer Vision, AI Application, Anthropometric Measurements, Experiment, Hand

Experiment on digital anthropometric measurements of the hand using machine vision

*Jonathan Kiessling, Michael Tondera, Thomas Maier
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and
Industrial Design*

In the user-centered design of hand-product interfaces, knowledge of the hand's dimensions is of importance. While extensive databases and digital models exist, accurate measurements of individual users' hands are required in certain cases. Combining an AI-based landmark recognition for hands with contour recognition and a hardware setup, this work introduces a measurement method for two-dimensional hand surface measurements. An experiment with $n = 30$ participants is performed to compare this method to the established standard (manual caliper) in anthropometric measurements following Bland-Altman. As a result, the image-based measurement method shows high precision (small deviation in between measurements) and improvable trueness (deviation from standard measurement method) to achieve accurate measurements. The results can be applied to further improvements of the method, anthropometric surveys, and CAD-integration.



Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: PUX, Technologieanwendung für positive UX, Technologiepotenzial, Ideation

Technologienanwendungen für PUX entwickeln – das PUX-Potenzial-Framework

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Doreen Engelhardt², Denise Pottin¹, Andreas Beskid¹, Matthias Peissner³

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

²Audi AG Ingolstadt

³Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Im Wettbewerb um die Kund*innen werden positive Nutzungserlebnisse (PUX) im Fahrzeug immer relevanter. Hierfür sollten PUX möglichst früh im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden. Etablierte Methoden aus dem Experience Design setzen am Nutzer oder bei Produktprototypen an, um PUX zu ermöglichen. So werden Technologien als Innovationstreiber nicht systematisch berücksichtigt, ihr Potenzial für PUX nicht ausgeschöpft oder bewertet. Daher haben wir die Methode »PUX-Potenzial-Framework« entwickelt, um möglichst konkrete Ideen für PUX mit einer Technologie bei ihrer Anwendung bei einer Nutzeraktivität zu generieren. Die Methode nutzt eine Erlebniskontext- und Aufgabenanalyse (Haspel et al. 2020), den Bedürfnisansatz (Hassenzahl et al. 2010) und leitet PUX-Ideen für die Technologiefunktionen ab.

Die Methode wurde in 8 Praktikums- und 7 Gruppen in der Industrie angewandt und evaluiert. Alle Gruppen konnten mit der Methode 6-15 PUX-Ideen generieren. Die Methode wurde auf einem standardisierten UX-Fragebogen positiv bewertet. Stärken, Schwächen und Verbesserungsvorschläge der Anwender*innen werden berichtet und im Ausblick für die nächste Iteration der Methode diskutiert.

Topics: Innovation and Technology Management, User Centered Design

Keywords: Positive User Experience, Technology Application for Positive UX, Technology Potential, Ideation

Developing technology applications for positive user experiences – the PUX Potential Framework

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Doreen Engelhardt², Denise Pottin¹, Andreas Beskid¹, Matthias Peissner³

¹University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management IAT

²Audi AG Ingolstadt

³Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

In the competition for customers, the relevance of positive user experiences (PUX) in the vehicle increases. PUX should therefore be considered as early as possible in the product development process. Established methods from Experience Design start with the user or product prototypes to enable PUX. Thus, technologies as innovation drivers are not systematically considered, their potential for PUX is not exploited nor evaluated. Therefore, we developed the "PUX Potential Framework" method to generate the most concrete ideas possible for PUX with a technology when it is applied for a specific user activity. The method uses an experience context and task analysis (Haspel et al. 2020), the needs approach (Hassenzahl et al. 2010), and derives PUX ideas for technology functions.

The method was applied and evaluated with 8 university internship and 7 industry groups. All groups were able to generate 6-15 PUX ideas using the method. The method was positively evaluated on a standardized UX questionnaire. Strengths, weaknesses, and suggestions for improvement of the users are reported and discussed for the next iteration of the method in the outlook.

Session 1: Nutzerzentriertes Design

Donnerstag, 25. Mai 2023, 10:50 – 12:20 Uhr

Themen: Nutzerzentriertes Design, Adaptive Bedienung für automatisiertes Fahren

Stichworte: Bewegungszeiten, Fahrerübernahme, automatisiertes Fahren, Methods Time Measurement (MTM), Nutzwertanalyse

Bewertung des Methods Time Measurement-Verfahrens als Analysewerkzeug für Bewegungszeiten während der Fahrtätigkeit

*Miriam Schäffer, Philipp Pomiersky, Wolfram Remlinger
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD)*

Die Nutzung von automatisierten Fahrfunktionen nach SAE Level 3 und 4 beschränkt sich zunächst auf bestimmte Anwendungsgebiete. Dadurch sind Übernahmen an den Fahrer innerhalb definierter Zeitspannen notwendig. Um diese Übernahmen abzusichern ist für den OEM die Kenntnis über zeitdominierende, beeinflussbare Faktoren elementar. Ein Aspekt ist die notwendige Dauer von kognitiven Prozessen und physisch-motorischen Bewegungsabläufen des Fahrers. Für die Vorhersage, Kalkulation und Analyse dieser Zeiten werden in diesem Beitrag existierende Modelle der Zeitermittlung aus dem fahrzeugfernen Umfeld (MTM, Fitts' Gesetz) herangezogen. Um die Übertragbarkeit der Modelle auf Übernahmeszenarien zu untersuchen, wird hier die Nutzbarkeit der Modelle bei der manuellen Fahrtätigkeit anhand einer Nutzwertanalyse überprüft. Demnach ist MTM v. a. bei physischen Bewegungen geeigneter als Fitts' Gesetz und bietet Potenziale für die Analyse von Übernahmeprozessen. Limitierungen ergeben sich bei der Nutzung existierender MTM-Zeitwerte und bei der Analyse von kognitiven Prozessen.

Topics: User Centered Design, Adaptive Operation for Automated Driving

Keywords: Movement Times, Driver Take-over, Automated Driving, Methods Time Measurement (MTM), Utility Analysis

Evaluation of Methods Time Measurement as an Analysis Tool for Movement Times During Driving Activities

*Miriam Schäffer, Philipp Pomiersky, Wolfram Remlinger
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and
Industrial Design*

The use of automated driving functions according to SAE Level 3 and 4 is initially limited to certain areas of application. Therefore, take-overs to the driver within defined time periods are required. In order to secure these take-overs, knowledge of time-dominating factors that can be influenced is elementary for the OEM. One aspect is the duration required for driver's cognitive processes and physical-motor movements. For the prediction, calculation, and analysis of these times, existing models of time determination from the non-vehicle environment (MTM, Fitts' Law) are used in this work. In order to examine the transferability of the models to take-over scenarios, the usability of the models for manual driving activities is reviewed here using a utility analysis. According to this, MTM is more suitable than Fitts' Law, especially for physical movements, and offers potential for the analysis of take-over processes. Limitations arise in the use of existing MTM time values and in the analysis of cognitive processes.



Themen: Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Industriedesign, Angewandte Forschung, TRL, Demonstrator, Entwicklungsprozess

Design for TRL – Technologiereifes Design entlang von Entwicklungsprozessen der angewandten Forschung

Christian Hermeling^{1,3}, Thomas Theling^{1,2}, Markus Forytta^{1,2}, Jens Krzywinski^{1,4}

¹Technische Universität Dresden, Professur für Technisches Design

²Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS)

³Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

⁴Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI)

Das vorliegende Paper beschreibt die Entwicklung eines Prozesses zur systematischen Einbindung von Designern in die Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Kontext angewandter, technologieorientierter Forschungs- und Transferfragestellungen. Design ist in vielen Lebensbereichen zunehmend unverzichtbar und als Disziplin in industriellen Entwicklungsprozessen weitgehend etabliert. Auch für die angewandte Forschung gewinnt Design vermehrt an Bedeutung, da es helfen kann, den Weg von Technologien in den Markt zu realisieren. Technology-Readiness-Level (TRL) erlauben eine standardisierte Bewertung der Technologie und geben Auskunft über Reife und Überführbarkeit dieser in eine marktrelevante Umsetzung. Trotz dieser genormten Bewertung beurteilen Außenstehende in der Praxis häufig subjektiv – vorzugsweise anhand des äußeren Eindrucks und im Abgleich mit persönlichen Erfahrungen statt objektiven Kriterien. Die Studie untersucht diese Diskrepanz, erprobt Designmethoden in sechs Projekten und diskutiert Erkenntnisse. Vorgeschlagen wird ein Prozess, der eine Ausgewogenheit von technologischer und designtechnischer Reife durch strukturierte designmethodische Unterstützung gewährleisten kann.

Topics: User Centered Design

Keywords: Industrial Design, Applied Research, TRL, Demonstrator, Development Process

Design for TRL – Technologically Mature Design Along Development Processes of Applied Research

Christian Hermeling^{1,3}, Thomas Theling^{1,2}, Markus Forytta^{1,2}, Jens Krzywinski^{1,4}

¹Technical University Dresden, Chair of Industrial Design Engineering

²Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology

³Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology

⁴Fraunhofer Institute for Transportation and Infrastructure Systems

This paper describes the development of a process for systematically involving designers in research and development work in the context of applied, technology-oriented research and transfer issues. Design is increasingly indispensable in many areas of life and is widely established as a discipline in industrial development processes. Design is also becoming increasingly important for applied research, as it can help to realise the path of technologies into the market. Technology readiness levels (TRL) allow a standardised assessment of the technology and provide information about its maturity and transferability into a market-relevant implementation. Despite this standardised assessment, in practice non-involved persons often judge subjectively – preferably on the basis of external impressions and in comparison with personal experience rather than objective criteria. The study examines this discrepancy, tests design methods in six projects, and discusses findings. A process is proposed that can ensure a balance of technological and design maturity through structured design methodological support.

Session 2: Nutzerzentriertes Design und Adaptive Bedienung für automatisiertes Fahren

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Use Cases für Technologie identifizieren, Matching Nutzeraktivitäten und Technologiefunktionen, Technologiepotenzial hinsichtlich positiver UX, Inspirationsmatrix

Die Inspirationsmatrix – Anwendungsfälle mit UX-Mehrwert für eine Technologie identifizieren

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Doreen Engelhardt², Andreas Beskid¹, Denise Pottin¹, Batuhan Kara¹, Matthias Peissner³

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

²Audi AG Ingolstadt

³Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Positive User Experience (PUX) im Fahrzeug ist ein wichtiger Differenzierungsfaktor. Dafür müssen Fahrzeughersteller frühzeitig die richtigen Technologien für die Implementierung auswählen. (Rittger und Schrader 2021). Hierfür wird die Methode Inspirationsmatrix vorgestellt. Ihr Ziel ist es, für eine Technologie Anwendungsfälle mit PUX-Potenzial im Fahrzeuginterieur zu identifizieren. Das PUX-Potenzial wird operationalisiert, indem die Anwender*innen mit der Methode erste PUX-Ideen entwickeln. Die erste Iteration wurde mit 6 Gruppen evaluiert. Auf Basis der Rückmeldungen wurde die zweite Iteration entwickelt und 4 Mal angewandt. Die Methode wurde mit der Methode 635 verglichen. Evaluiert wurde die Inspirationsmatrix hinsichtlich Anwendungs-UX, Systematik, Nutzerzentriertheit, Inspirationsfähigkeit, Nachvollziehbarkeit & Transparenz sowie durch offene Fragen. Die Methode erfüllt die Anforderungen im Schnitt gut. Stärken umfassen z.B. Förderung des Ideenflows, Ideation im Team sowie Inspirationsfähigkeit. Optimierungspotenziale sind mehr Bearbeitungszeit, größere Teams und ein anderes Whiteboard. Zukünftige Iterationen sollen die Ergebnisse zur Optimierung der Methode nutzen.

Topics: Innovation and Technology Management, User Centered Design

Keywords: Identifying Use Cases for a Technology, Matching Use Activities and Technology Functions, Technology Potential for Positive UX, Inspiration Matrix

The Inspiration Matrix – identifying use cases for a technology with added value regarding UX

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Doreen Engelhardt², Andreas Beskid¹, Denise Pottin¹, Batuhan Kara¹, Matthias Peissner³

¹University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management IAT

²Audi AG Ingolstadt

³Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

Positive User Experience (PUX) in the vehicle is an important differentiation factor. To achieve this, vehicle manufacturers must select the right technologies for implementation at an early stage. (Rittger and Schrader 2021). Therefore, the "Inspiration Matrix" method is presented. Its goal is to identify use cases for a technology with PUX potential in the vehicle interior. The PUX potential is operationalized by developing first ideas for PUX with the method. The first iteration was evaluated with 6 groups. Based on the feedback, the second iteration was developed and applied 4 times. The method was also compared to method 635. The Inspiration Matrix is evaluated in terms of applicational UX, systematicity, user-centeredness, inspirational ability, traceability & transparency, and through open-ended questions. On average, the method meets the requirements well. Strengths include, e.g., promotion of idea flow, ideation in the team as well as inspirational ability. Potentials for optimization are longer processing time, larger teams, and a different whiteboard. Future iterations should use the results to optimize the method.



Themen: Adaptive Bedienung für automatisiertes Fahren

Stichworte: Sprachassistent, Proaktivität, automatisiertes Fahren, intelligente Benutzerschnittstellen

Proaktive Sprachassistenz in automatisierten Fahrzeugen: Wann sollten Nutzende angesprochen werden

Lesley-Ann Mathis¹, Kathrin Werner^{2,3}, Gerald J. Schmidt³

¹Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

³Hochschule Furtwangen, Fakultät Industrial Technologies

Proaktives Verhalten von Sprachassistenten im Fahrzeug wird als Schlüssel für die Entwicklung zunehmend intelligenter und interaktiver Systeme gesehen. Eine der wichtigsten Fragen für proaktive Sprachassistenten ist, wann der richtige Zeitpunkt für die Ansprache des Nutzers ist. Wir präsentieren eine Fahrstudie (N = 32), die verschiedene Situationen proaktiver Interaktion während einer automatisierten Fahrt untersucht. Basierend auf Erkenntnissen zu geeigneten Ansprachezeitpunkten während des manuellen Fahrens liegt der Fokus auf Ansprachen in bestimmten Fahrsituationen und beim Ausführen einer fahrfremden Tätigkeit (FFT). Die quantitativen und qualitativen Ergebnisse zeigen, dass die meisten Situationen keinen signifikant negativen Einfluss auf die Bewertung des Zeitpunkts für eine proaktive Interaktion während einer automatisierten Fahrt haben. Eine extreme Verkehrssituationen mit einem herannahenden Einsatzfahrzeug wird jedoch als ungünstiger Zeitpunkt angesehen. Die Fahrtzeit und der aktuelle Zustand des Nutzers sollten zudem für die Wahl eines geeigneten Zeitpunkts berücksichtigt werden. Eine Validierung der Ergebnisse der Studie in einer Realfahrstudie ist geplant.

Topics: Adaptive Operation for Automated Driving

Keywords: Voice Assistant, Proactivity, Automated Driving, Intelligent User Interfaces

Proactive voice assistance in automated vehicles: Understanding when to engage the user

Lesley-Ann Mathis¹, Kathrin Werner^{2,3}, Gerald J. Schmidt³

¹Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

²University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management IAT

³Furtwangen University, Faculty Industrial Technologies

Proactive behaviour of in-vehicle voice assistants is seen as key to develop increasingly intelligent and interactive systems. One of the main questions for proactive voice assistants is when opportune moments for engaging the user are. We present a driving simulator study (N = 32) investigating different situations of proactive interaction during an automated ride. Based on previous findings for opportune moments of interaction during manual driving, the study's focus is on evaluating the influence of driving situations and the performance of a non-driving related activity (NDRA) on the opportuneness of a proactive interaction. The quantitative and qualitative findings show that most situations do not impact the opportuneness of a proactive interaction during an automated ride. However, an extreme traffic situation with an approaching emergency vehicle is considered as inopportune. Travel time and the current state of the user should also be considered for the selection of an opportune moment. A validation of the results in a real road driving study is planned.

Session 2: Nutzerzentriertes Design und Adaptive Bedienung für automatisiertes Fahren

Donnerstag, 25. Mai 2023, 13:50 – 15:00 Uhr

Themen: Design-Technik-Konvergenz, Produktkomplexität

Stichworte: Autonomes Fahren, Sensorintegration, Sensorpositionierung

Topics: Design Technology Convergence, Product Complexity

Keywords: Autonomous Driving, Sensor Integration, Sensor Positioning

Positionierung und Karosserieintegration von Sensoren in autonomen Shuttle-Fahrzeugen

Philipp Hafemann¹, Aleix Lazaro Prat², Markus Lienkamp¹

¹Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

²Polytechnic University of Catalonia, Department of Fluid Mechanics EEBE

Positioning and body integration of sensors in autonomous shuttle vehicles

Philipp Hafemann¹, Aleix Lazaro Prat², Markus Lienkamp¹

¹Technical University of Munich, Institute of Automotive Technology

²Polytechnic University of Catalonia, Department of Fluid Mechanics EEBE

Autonome Shuttle-Fahrzeuge sind ein vielversprechender Weg, um vollständig autonome Fahrzeuge auf die Straße zu bringen und in den realen Verkehr zu integrieren. Da traditionelle Fahrzeughersteller diese Fahrzeugkonzepte bisher kaum anbieten, wird der Markt von vielen neuen Firmen mit eigens entwickelten Fahrzeugkonzepten geprägt. Für die Darstellung des vollautonomen Betriebs besitzen diese Fahrzeuge zahlreiche Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung. Ziel dieses Beitrags ist es, autonome Shuttles auf ihr Sensorset hin zu untersuchen. Der Fokus liegt dabei speziell auf der Positionierung der Sensoren und der Karosserieintegration. Es wird aufgezeigt, dass die Fahrzeuge sich trotz gleichen Anwendungsfalls in der Positionierung von Sensoren unterscheiden und darüber hinaus unterschiedliche Strategien zur Integration von Sensoren verwenden. Weiterführend werden die Integrationsstrategien geclustert und in ihren Auswirkungen auf das Fahrzeugdesign analysiert. Darauf aufbauend werden Anforderungen an die Sensorpositionierung und Integration in der Konzeptphase abgeleitet.

Autonomous shuttle vehicles offer a promising avenue for deploying fully autonomous vehicles on the road and integrating them into real-world traffic. Since traditional vehicle manufacturers have hardly offered this vehicle concept to date, the market is being shaped by many new companies with specially developed vehicle concepts. These vehicles have numerous sensors to perceive the environment for a fully autonomous operation. This paper aims to investigate autonomous shuttles with respect to their sensor set. The focus is specifically on sensor positioning and body integration. It is shown that despite having the same use case, the vehicles differ in sensor positioning and use different sensor integration strategies. Further, the integration strategies are clustered and analyzed in their impact on the vehicle design. Based on this, sensor positioning and integration requirements in the concept phase are derived.



Session 3: Design-Technik-Konvergenz

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Design-Technik-Konvergenz, Digital Engineering

Stichworte: Darstellungsgüte, Visualisierungsqualität, Designreifegrad, Teilgestalten, Produktgestalt

Die ganzheitliche Beschreibung der Darstellungsgüte als effizientes Werkzeug im Entwicklungsprozess

*Lars Gadermann, Daniel Holder, Franziska Kern, Thomas Maier
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD)*

Im Designprozess sowie während der gesamten Produktentwicklung wird das zu entwickelnde Produkt mehrfach auf verschiedene Weisen visualisiert, bevor das reale Endprodukt zur Verfügung steht. Der Produktvisualisierung fällt im Entwicklungsprozess eine entscheidende Rolle zu, da diese mit erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden ist. Bei der Visualisierung ist ein möglichst hoher Grad an Darstellungsgüte von Vorteil. Zeitgleich soll der Ressourceneinsatz möglichst gering gehalten werden. In bisherigen Beschreibungen von Darstellungsgüte oder analogen Begrifflichkeiten fehlt eine ganzheitliche, systematische Betrachtung, welche nicht nur die visualisierungsseitigen Attribute, wie z. B. Auflösung mit einbezieht, sondern auch die Verbindung zur Produktgestalt herstellt. Um eine Abschätzung der nötigen Darstellungsgüte zu ermöglichen, wird diese über einen Zusammenhang aus Visualisierungsqualität und Produktgestalt beschrieben. Mittels einer Online-Studie mit Conjoint-Analyse wurden relative Wichtigkeiten von Einzelfaktoren untersucht, um deren Einfluss auf die Darstellungsgüte auszumachen.

Topics: Design-Technology-Convergence, Digital Engineering

Keywords: Product Design, Visualisation Quality, Quality of Presentation

The holistic description of the visualisation quality as an efficient tool in the development process

*Lars Gadermann, Daniel Holder, Franziska Kern, Thomas Maier
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and
Industrial Design*

During the design process and the entire product development, the product to be developed is visualised several times in different ways before the final product is available. Product visualisation plays a decisive role in the development process, as it is associated with considerable time and financial expenditure. A high degree of visualisation quality is advantageous for the visualisation. At the same time, the use of resources should be kept as low as possible. In previous descriptions of visualisation quality or similar terms, a holistic, systematic approach is missing, which not only includes the visualisation-side attributes, such as resolution, but also establishes the connection to the product design. In order to enable an estimation of the necessary display quality, this is described via a connection between visualisation quality and product design. By means of an online study with conjoint analysis, the relative importance of individual factors was investigated in order to identify their influence on the quality of presentation.



Themen: Design-Technik-Konvergenz, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Adaptivität, Individualisierung, Mensch-Maschine-Schnittstelle

Anpassbare Mensch-Maschine-Schnittstellen zwischen Adaptivität und Individualisierung

Marcel Racs¹, Daniel Holder¹, Marco Hutter², Thomas, Maier¹, Bernd Gundelsweiler²

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Moderne Produkte werden zunehmend komplexer. Dies wirkt sich insbesondere auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) aus, welche die Funktionsvielfalt abdecken und zugleich eine optimale Nutzung des Produkts ermöglichen soll. Um diese Problematik zu lösen, rücken anpassbare MMS zunehmend in den Fokus. In diesem Beitrag wird das Thema der veränderlichen MMS thematisiert und auf die Hauptausprägungen Adaptivität und Individualisierung eingegangen. Das Ziel ist die Erarbeitung einer Methode, welche die spezifische Veränderlichkeit in technischen Produkten erfassen kann. Dazu wird basierend auf einer Literaturrecherche eine allgemeingültige Beschreibung der physikalischen Eigenschaften und Ausprägungen veränderlicher, technischer Systeme abgeleitet, kategorisiert und durch Bewertungsbereiche ergänzt. Die Methode wird anschließend auf typische adaptive und individualisierbare Produkte angewandt. Daraus lassen sich charakteristische Eigenschaften der beiden Ausprägungen ableiten und Gemeinsamkeiten bzw. Überschneidungen benennen. Abschließend wird die Brücke zu potenziell geeigneten Technologien für veränderliche Systeme hergestellt und deren Bedeutung für diesen Zweck diskutiert.

Topics: Design-Technology-Convergence, User Centered Design

Keywords: Adaptivity, Individualization, Human Machine Interface

Adaptable human-machine-interfaces between adaptivity and individualization

Marcel Racs¹, Daniel Holder¹, Marco Hutter², Thomas, Maier¹, Bernd Gundelsweiler²

¹University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

²University of Stuttgart, Institute of Design and Production in Precision Engineering

Modern products become increasingly complex. This has a major impact on the human-machine interface (HMI), which is supposed to cover the variety of functions and enable an optimal use of the product at the same time. To address this issue, the focus is shifting increasingly to adaptable HMIs. This paper focuses on the topic of adaptable HMI and discusses the main characteristics of adaptivity and individualization. The objective of the contribution is the development of a method, which is able to identify the specific adaptability in technical products. Based on a literature research, a general definition of the physical attributes and characteristics of adaptable, technical systems is developed, categorized and extended by evaluation criteria. The method is then applied to typical adaptive and individualizable products. This allows to identify typical attributes of the two forms of adaptability and to identify similarities or overlaps. Concluding, the connection to potentially suitable technologies for these adaptable systems is drawn and their significance for this purpose is discussed.

Session 3: Design-Technik-Konvergenz

Donnerstag, 25. Mai 2023, 15:20 – 16:30 Uhr

Themen: Design-Technik-Konvergenz, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Armassistenzsystem, Exoskelett, Mensch-Maschine-Interaktion, Unterarmauflage, Warn- und Assistenzsystem

Entwicklung eines aktiven Aufgabenwarn- und assistenzsystems für Unterarm und Handgelenk im Kontext von chirurgischen Armassistenzsystemen und Exoskeletten

*Ferdinand Langer, Tim Matschuck, Thomas Maier
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD)*

Bei einer laparoskopischen OP ergeben sich häufig statische, nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen, welche zu einer hohen Beanspruchung der oberen Extremitäten der Operierenden führen. Um dem entgegenzuwirken wurde ein chirurgisches Armassistenzsystem entwickelt, das die oberen Extremitäten des Operateurs physisch entlastet. Bei Fahrzeugen warnt und assistiert ein Lane Departure Warning System beim Halten der Spur. Inspiriert davon wird ein aktives Aufgabenwarn- und assistenzsystem (AWAS) für den Einsatz in medizinischen Armassistenzsystemen für den Unterarm konzipiert und integriert. Aus den potentiellen Fehlerursachen in laparoskopischen Anwendungen, wird die Art der Warnungen und Assistenz abgeleitet. Zur Assistenz wird eine translatorische dreidimensionale Bewegung und zur Warnung ein haptisches Feedback umgesetzt. Der Arm der operierenden Person lässt sich in alle Raumrichtungen bewegen und dadurch eine potentielle Kollision des Instruments mit dem Patienten verhindern. Die Funktionsfähigkeit des Systems wird durch eine Evaluation mit fünf Probanden geprüft, wobei die Zuordnung der Bewegungsrichtung und die Vibrations-wahrnehmung untersucht werden.

Topics: Design-Technology-Convergence, User Centered Design

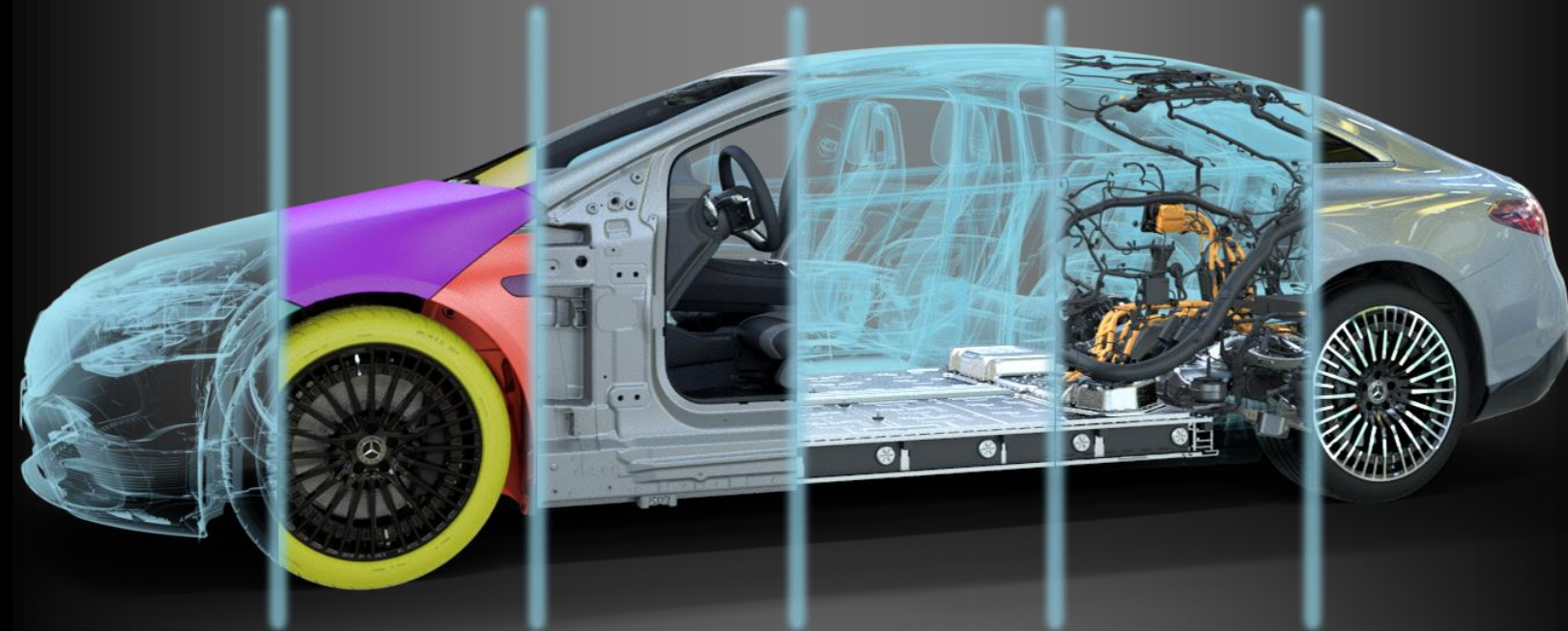
Keywords: Arm Assistance Systems, Exoskeleton, Human-Machine-Interaction, Forearm Support, Warning- and Assistance System

Development of an active task warning and assistance system for forearm and wrist in the context of surgical arm assistance systems and exoskeletons

*Ferdinand Langer, Tim Matschuck, Thomas Maier
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and
Industrial Design*

Laparoscopic surgery often results in static, uncomfortable arm and upper body postures, which lead to high stress on the surgeon's upper extremities. To counteract this, a surgical arm assistance system was developed that physically relieves the upper extremities of the surgeon. In vehicles, a Lane Departure Warning System warns and assists with lane keeping. Inspired by this, an active task warning and assistance system is being designed and integrated for use in medical arm assistance systems for the forearm. From the potential causes of errors in laparoscopic applications, the type of warnings and assistance is derived. A translational three-dimensional motion is implemented for assistance and haptic feedback is implemented for warning. The arm of the person performing the operation can be moved in all spatial directions, thus preventing a potential collision of the instrument with the patient. The functionality of the system is tested by an evaluation with five test persons, whereby the assignment of the direction of movement and the vibration perception are examined.





Konzeption und Bereitstellung
eines autarken CAD-
Ökosystems für den
weltweiten Einsatz innerhalb
der Mercedes-Benz AG

Dr. Martin Kratzer | Mercedes-Benz AG

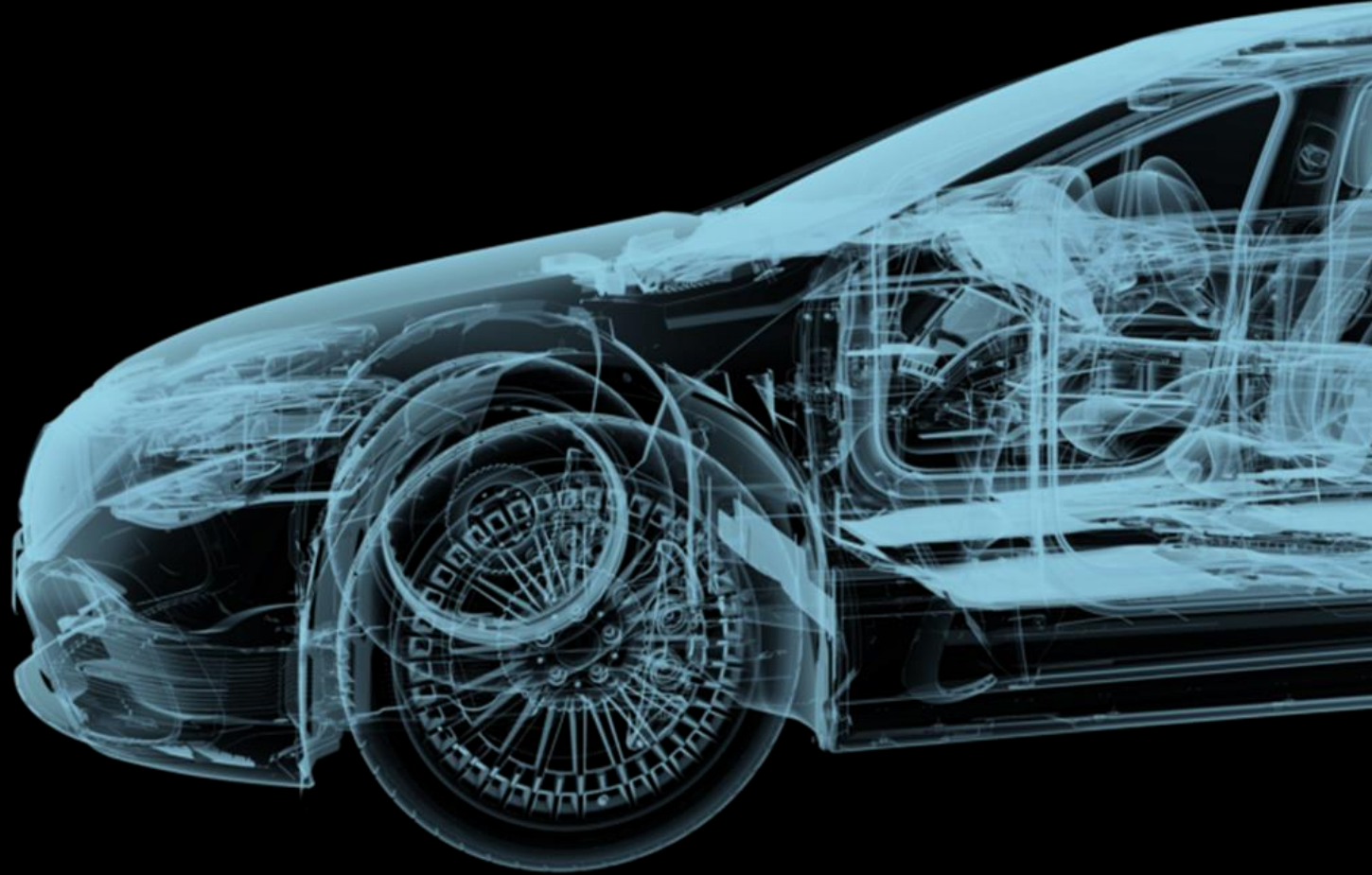
Stuttgarter Symposium für
Produktentwicklung am 25.05.2023

Mercedes-Benz



Agenda

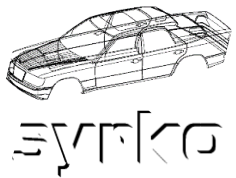
- 01 Woher kommen wir?
- 02 Trends in der Automobilindustrie
- 03 Anforderungen an ein CAD-System
- 04 CAD-Ökosystem
- 05 Engineering workplace of the future



Um die weltweite CAD-Versorgung über das Portfolio sicherzustellen, wurden in den letzten 35 Jahren viel investiert.

SYRKO

„System für rechnerunterstützte Konstruktion und Fertigung“



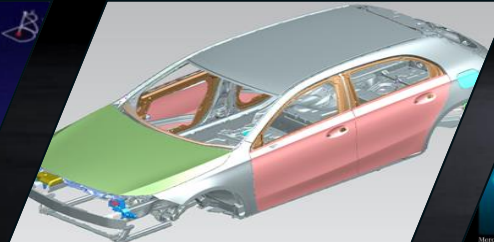
CATIA

Erstes Standard-CAD-System



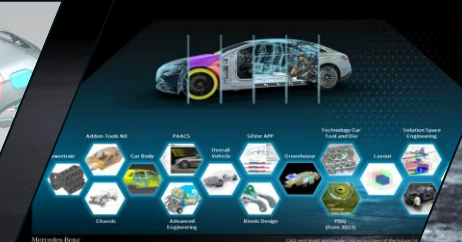
PLM2015

Einführung von NX als CAD-System



NX Efficiency

Stabilisierende Methoden und Werkzeuge

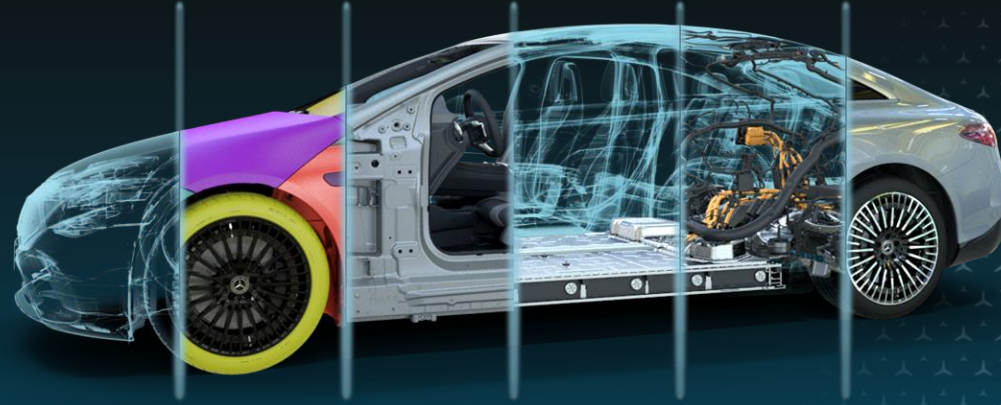


PROJEKT FOKUS

BETRIEB EIGENSTÄNDIGES CAD-ÖKOSYSTEM



Das Portfolio an CAD-nahen Funktionalitäten und Leistungen erstreckt sich vom klassischen Antriebsstrang bis zu bionisches Konstruieren.



Addon-Tools NX

Engineering Parameter Management

Silhouetten Vergleich

Werkzeug- und Formenbau

Solution Space Engineering

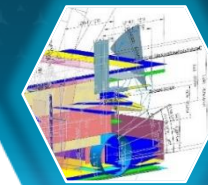
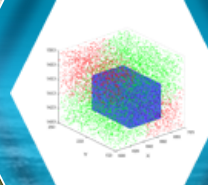
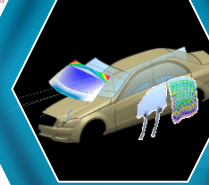
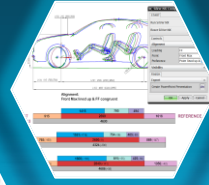
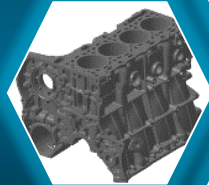
Antriebsstrang

Karosserie

Gesamtfahrzeug

Greenhouse

Layout



Fahrgestell

Advanced Engineering

Bionisches Design

Datenqualität

VR/AR/XR

Weltweit nutzen ca. 7.500 Anwender ein Standard-CAD-System für die Konstruktion und nachfolgende Produktabsicherung.



- 12.800 CAD-Clients
- 7.500 CAD Anwender
- 400 CAD Add-Ons
- 50 Standorte

Neue Technologien, verändertes Kundenverhalten und verstärkte Regulierungen sind aktuelle Megatrends in der Automobilindustrie.

ANTRIEBSSTRANG



Automatikgetriebe werden mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs noch mehr an Bedeutung gewinnen

NACHHALTIGKEIT



Aktuelle Trends wie die **CO2-neutrale Produktion** belegen die wachsende Bedeutung von **Nachhaltigkeit** in der Automobilindustrie

ELEKTRIFIZIERUNG



Leichtbau bedeutet für Elektroautos mehr als nur Reichweitengewinn

DIGITALER ZWILLING



Schlüssel zur **Homologation** mittels vollständig digitaler Konstruktion

TIME-TO-MARKET



Verkürzung der Entwicklungszeit entscheidend für die Automobilindustrie

Megatrends

- Neue Technologien
- Verändertes Kundenverhalten
- Verstärkte Regulierung

TRANSFORMATION



Elektrifizierung & **Dekarbonisierung** sind die Key Treiber der Transformation der Automobilindustrie

NACHHALTIGKEIT



Nutzung **nachhaltiger Materialien** im Auto der Zukunft

DIGITALE TRANSFORMATION



Technologische Trends als Basis für eine erfolgreiche Entwicklung der Automobilindustrie

IMMERSIVE ZUSAMMENARBEIT



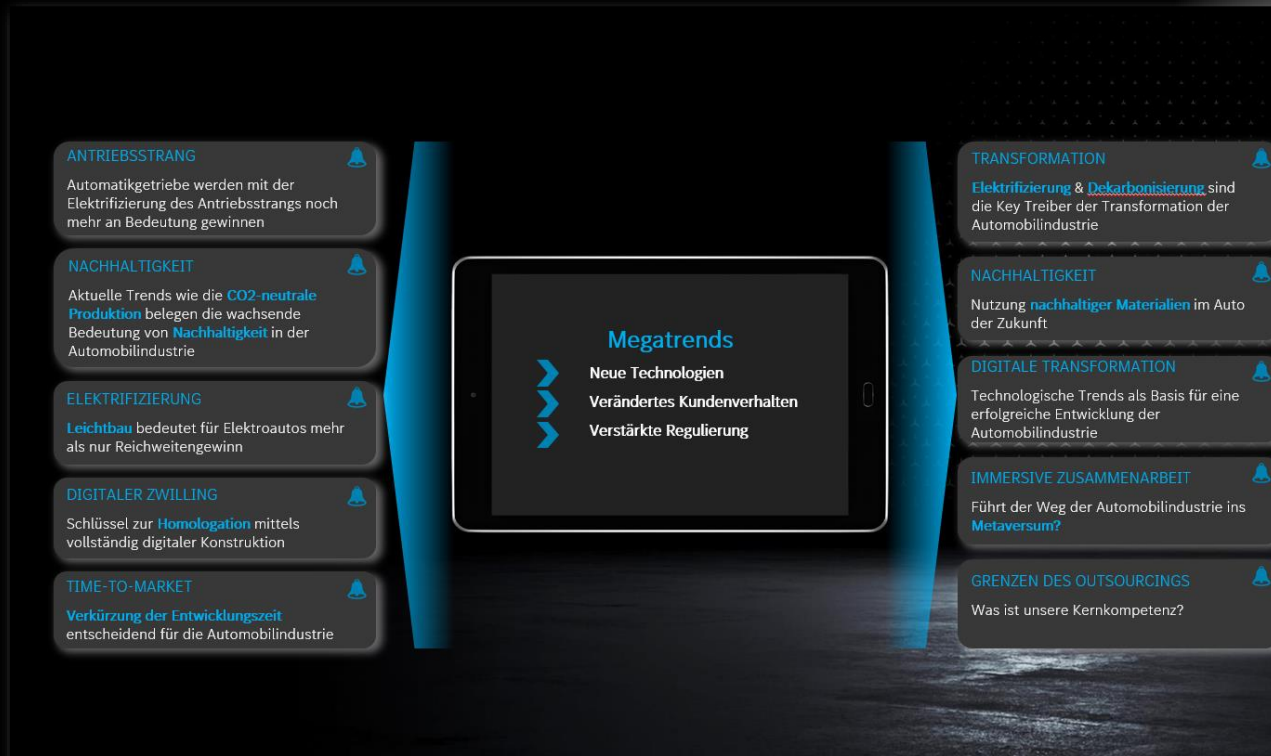
Führt der Weg der Automobilindustrie ins **Metaversum**?

GRENZEN DES OUTSOURCINGS



Was ist unsere Kernkompetenz?

Aufgrund eines sich wandelnden Marktumfelds ergeben sich drei konkrete Auswirkungen auf ein CAD-System.



1 Vereinfachte und kürzere Entwicklungs-Zyklen

2 Digitale Methoden und Werkzeuge für neue Entwicklungsumfänge im Rahmen der Transformation hin zur Elektromobilität

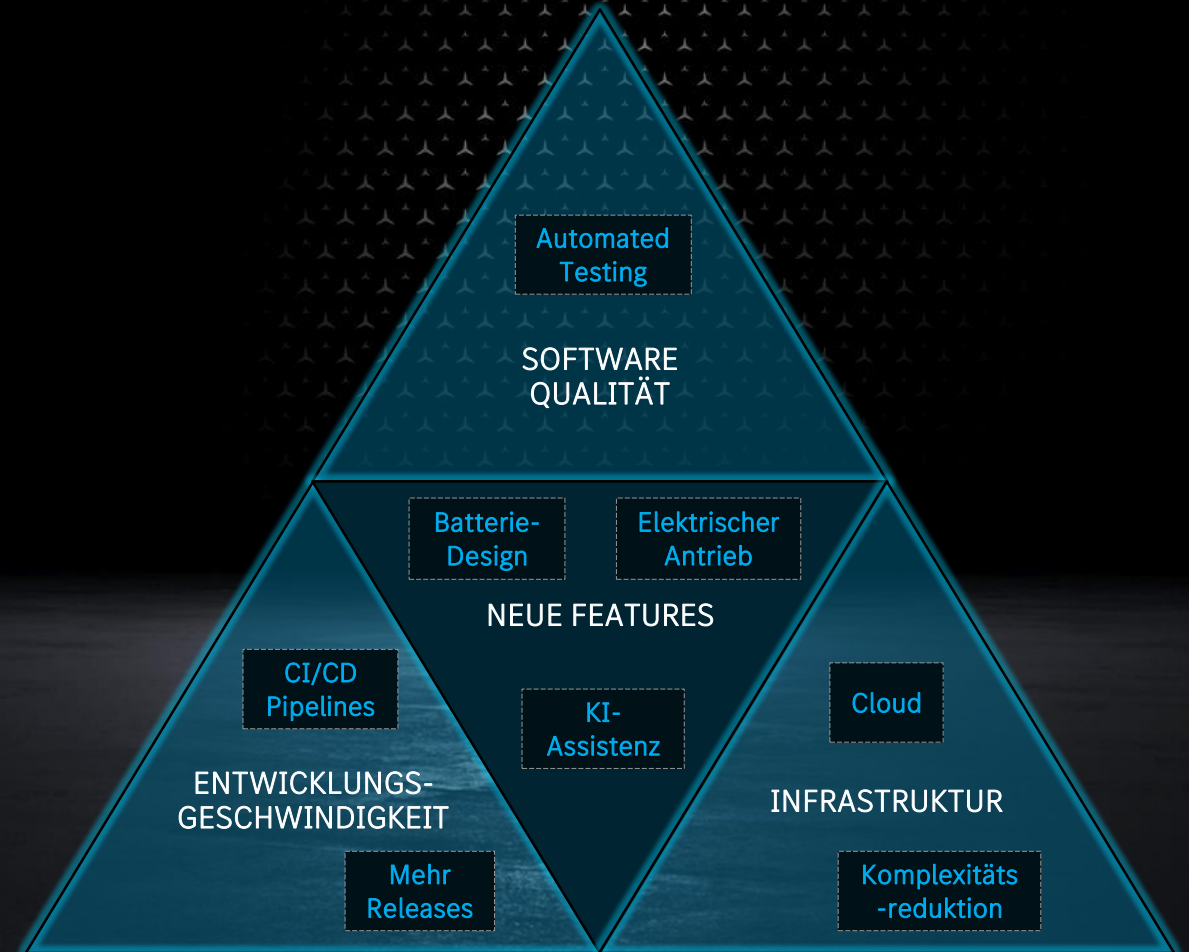
3 Kollaboratives Arbeiten: Bereitstellung einer Plattform inkl. Nutzerschnittstelle für den synchronen Zugriff auf CAD-Daten

Für die Weiterentwicklung hin zum CAD-Ökosystem der Zukunft konnten vier Handlungsfelder identifiziert werden.

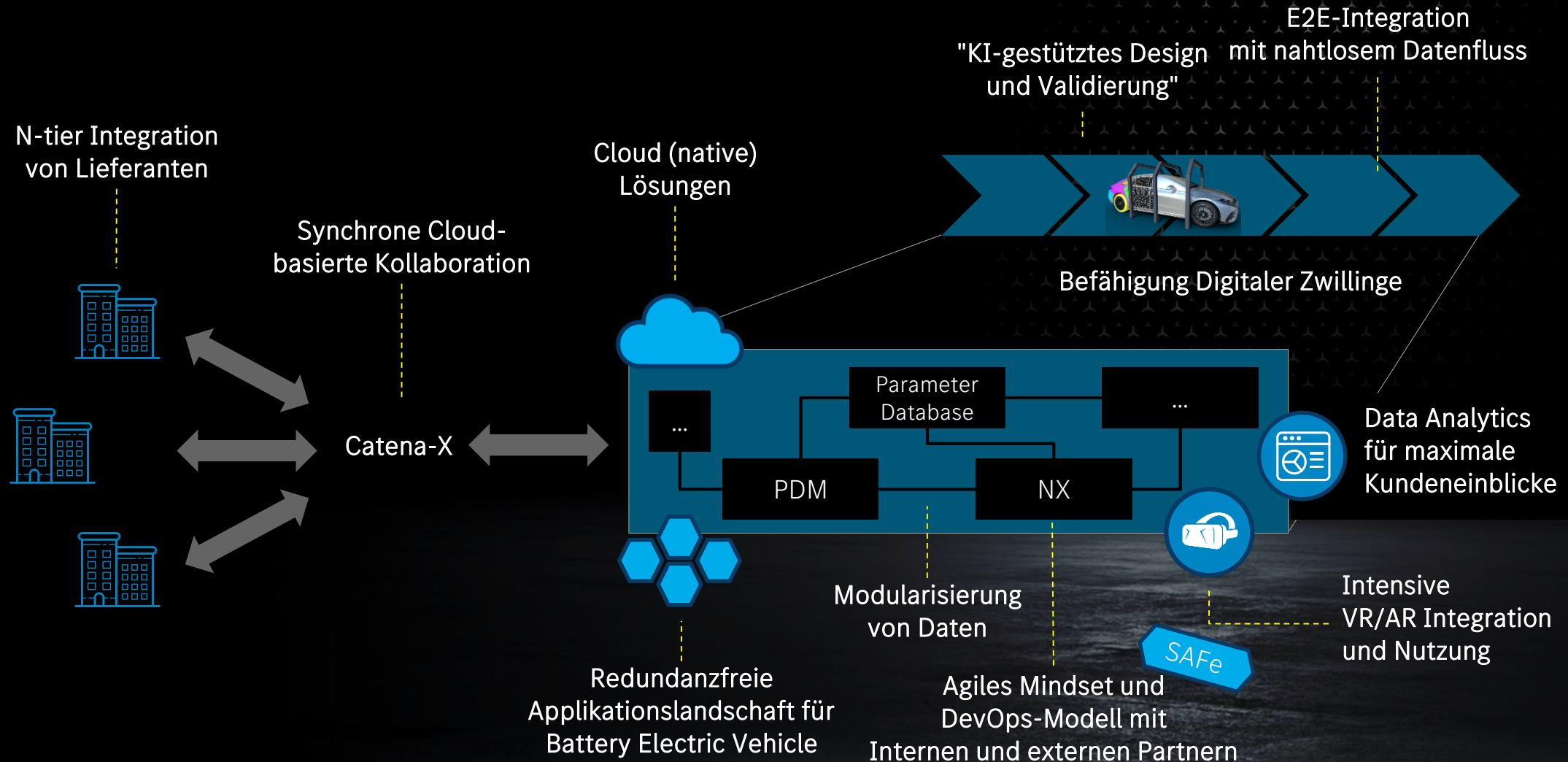
Ausprägungen für CAD

- 1 Vereinfachte und kürzere Entwicklungs-Zyklen
- 2 Digitale Methoden und Werkzeuge für neue Entwicklungsumfänge im Rahmen der Transformation hin zur Elektromobilität
- 3 Kollaboratives Arbeiten: Bereitstellung einer Plattform inkl. Nutzerschnittstelle für den synchronen Zugriff auf CAD-Daten

Identifizierte Handlungsfelder



Das CAD-Ökosystem der Zukunft ist kundenorientiert und die Vision beachtet technologische Trends und unsere Geschäftsfeldstrategie.



Die Transformation hin zum CAD-Ökosystem der Zukunft ist eine mittelfristige Reise mit internen und externen Partnern.

Phase I:

Konsolidierung der Anforderungen

- Intensive Arbeit an Projekt Fokus
- Entwicklung CAD-Daten-Dashboard
- Definition der CAD Strategie
- Machbarkeitsstudie für CAD@Cloud

Phase II:

Effizienz gewinnen und Zukunft vorbereiten

- 3D Engineering Workplace of the Future
- Mit Fokus auf Cloud, VR/AR, Battery Electric Vehicle und Catena-X

Phase III:

Hochautomatisierte Entwicklung, zur Befähigung von digitalen Zwillingen in einer Welt von Battery Electric Vehicle only

Vision 2030

- 3D Engineering Workplace of the Future
- Mit Fokus auf max. Prozess-automatisierung u. a. durch KI, RPA, Low/No Code

Zur Gestaltung des CAD-Ökosystems der Zukunft werden Datenanalysen verwendet und ein CAD-Daten-Dashboard entwickelt.

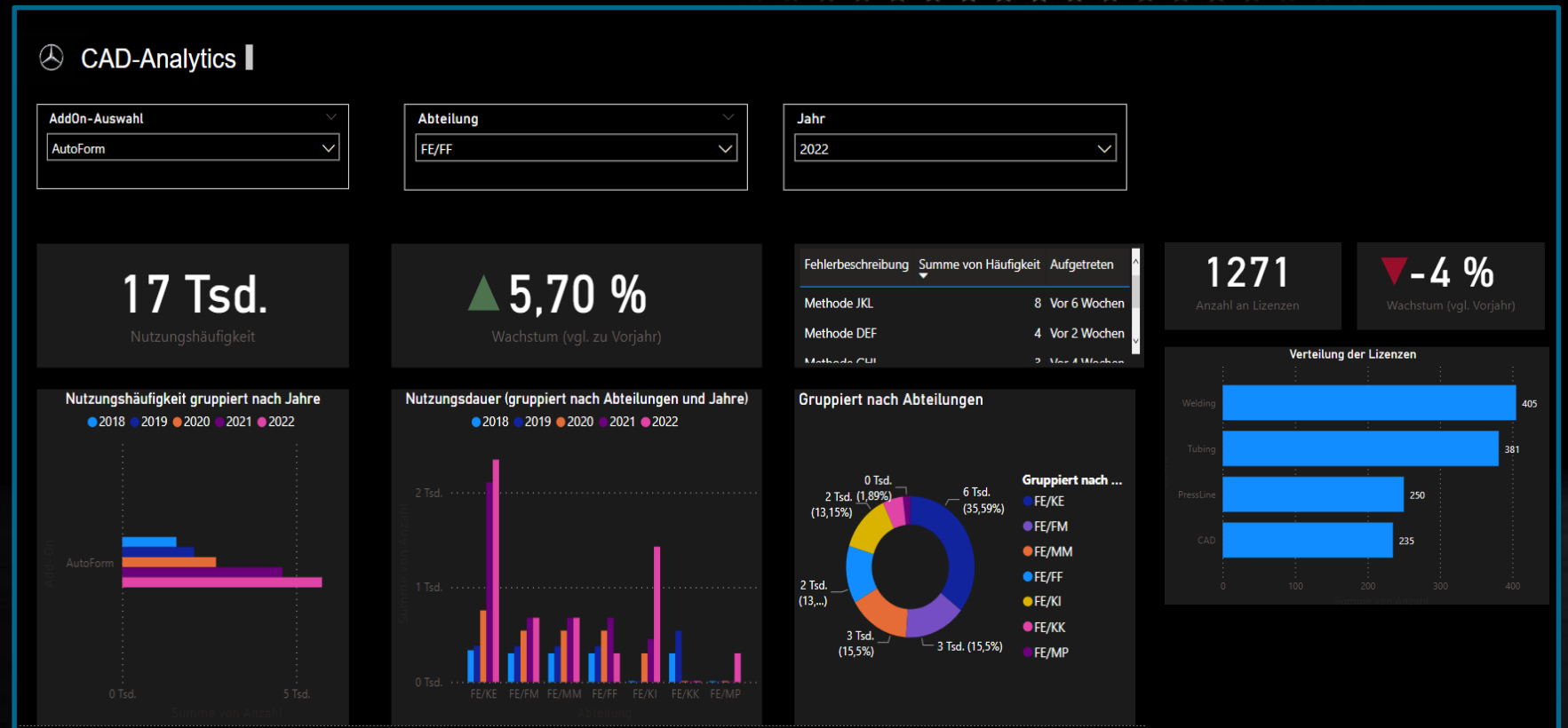
Mögliche strategische Fragen

CAD-Daten-Dashboard

Welches ist das geeignetste Lizenzmodell für die Anforderungen aus der Entwicklung?

Welche Entwicklungsumfänge (z. B. Bauteile) müssen in der Konstruktion nicht mehr unterstützt werden?

Wie hoch ist der Anteil an Remote-Konstruktion (Homeoffice o. ä.)?



Die Konzeption und Bereitstellung eines autarken CAD-Ökosystems bildet das Fundament für die Digitalisierung der Produktentwicklung.

1 Motivation

- Mercedes-Benz befindet sich in einer bisher nie dagewesenen Transformation hin zu Elektromobilität und einem deutlich höheren Softwareanteil im Fahrzeug
- CAD Daten bilden das Fundament für alle digitalen Prozesse, von der Erzeugung der 3D-Produktgeometrien bis hin zur digitalen Absicherung

2 Zielsetzung

- Die Zukunft eines autarken und effizienten CAD-Ökosystems zur Befähigung eines verkürzten Produktentwicklungsprozesses kann heute entscheidend beeinflusst werden
- Fokus auf neue digitale Prozesse, Methoden und Tools zur Entwicklung von Batterien, elektrischen Antriebssträngen, Halbleiter und bionisch gestalteten Bauteilen

3 Vorgehensweise

- Treffen von datenbasierten Entscheidungen zur Gestaltung des CAD-Ökosystems
- Weiterentwicklung des CAD-Ökosystems in Bezug auf vier identifizierte Handlungsfelder: Entwicklungsgeschwindigkeit, Software-Qualität, neue Features und Infrastruktur



Wir brauchen **starke und kreative Partner** zur Gestaltung des CAD-Ökosystems der Zukunft !

3D-CAD-Daten sind zentral für die Digitalisierung



... vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Experimentelle Entwicklung effektiver Schallschutzmaßnahmen für schnell drehende Hochdruckventilatoren

Experimental development of effective noise control measures for high-speed high-pressure fans

Stefan Recker¹

¹Firma Elektror airsystems GmbH, 73760 Ostfildern
info@elektror.de

Abstract (deutsch): Zur Reduktion hoher Geräuschemission bei Ventilatoren sind Schallschutzmaßnahmen zur Luftschalldämmung und -dämpfung erforderlich. Diese Arbeit untersucht effektive neue Schallschutzlösungen für kompakte schnell drehende Ventilatoren, die mit in der Praxis bewährten Ausführungen ihren Raumvorteil einbüßen würden. Aufgrund fehlender analytischer Methoden zur Schallvorhersage wird ein mehrstufiger experimenteller Entwicklungsansatz gewählt, der durch wiederholte Evaluation der Messergebnisse schrittweise zum Ziel führt.

Wirksame Lösungen ergeben sich durch Integration von Strömungsumlenkungen in eine konstruktiv durchdachte Schalldämmhaube mit Augenmerk auf die Abdichtung der Schallwege. Die Untersuchungen bewegen sich stets im Zielkonflikt zwischen akustischer Optimierung, Druckverlustreduzierung und thermischer Beanspruchung, weshalb im Rahmen einer gegebenen Bauraum- und Kostensituation der bestmögliche Kompromiss gefunden wird. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf andere lufttechnische Applikationen übertragen, des Weiteren werden allgemeingültige Erkenntnisse für andere Maschinen abgeleitet.

Keywords (deutsch):

Schallschutz, Ventilator, Strömungsoptimierung

Abstract (english): To reduce high noise emissions from fans, sound insulation measures in the form of sound insulation and sound absorbing elements are required. This work investigates effective new sound insulation solutions for compact, high-speed fans that would lose their space advantage with field-proven designs. Due to the lack of analytical methods for sound prediction, a multi-stage experimental development approach is chosen, which leads step-by-step to the goal through repeated evaluation of the measurement results.

Effective solutions result from the integration of flow deflections into a well-designed silencer box with attention to the sealing of the sound paths. The investigations always involve a conflict of objectives between acoustic optimization, pressure loss reduction and thermal stress. For this reason the best possible compromise is found within the framework of a given installation space and cost situation. The knowledge gained can also be transferred to other ventilation applications, and generally applicable solutions are derived for other machines.

Keywords (english):

Noise protection, fan, flow optimization

1 Einleitung und Motivation

Die abgestrahlte Schallleistung und Lärmbelastung von Industrieventilatoren ist maßgeblich von deren Luftleistung, Wirkungsgrade und Umfangsgeschwindigkeiten abhängig (Eck 2012). Vor allem bei schnell drehenden Hochdruckventilatoren entstehen aufgrund der Leistungsdichte häufig Schallleistungen, die weit oberhalb der zulässigen Grenzwerte für Lärmbelastungen an Arbeitsplätzen von 80 dB(A) bzw. 85 dB(A) liegen (LärmVibrationsArbSchV 2021). Sowohl für den Hersteller als auch Betreiber dieser Ventilatoren sind daher effektive schallreduzierende Maßnahmen von großer Bedeutung. Da die primäre Geräusentstehung durch im Wesentlichen Strömungsablösungen und Turbulenzen (Carolus 2020, siehe Bild 1) meist nicht mehr weiter optimiert werden können, werden zur Schallreduzierung sekundäre nachgeschaltete Schallschutzlösungen benötigt. Um den zentralen Vorteil der Kompaktheit bei schnell drehenden Ventilatoren nicht zu verlieren, sind typische im industriellen Umfeld eingesetzte Schallschutzlösungen aufgrund ihres großen Raumbedarfs nur bedingt geeignet und alternative platzsparende Lösungsansätze müssen entwickelt werden.

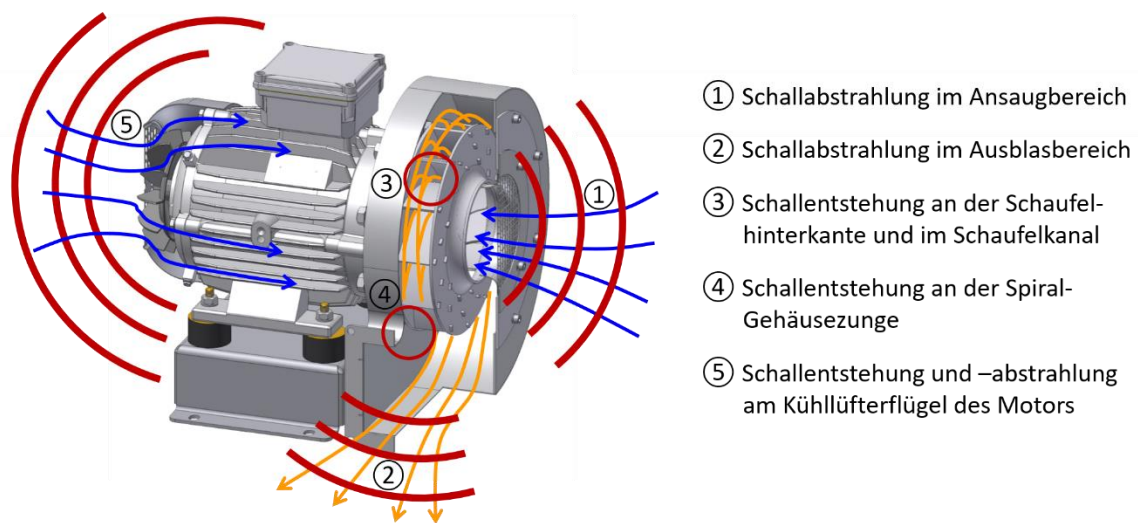


Bild 1: Geräuschquellen und Schallentstehungsorte am schnell drehenden Hochdruckventilator

2 Typische Schallschutzelemente bei Industrieventilatoren

Zur Luftschalldämmung von schallabstrahlenden Maschinen kommen typischerweise Ummantelungen zum Einsatz, die in Form einer Haube über die Maschine gestellt werden (Lotze und Schirmer 2006), siehe Bild 2 links und Mitte. Deren Wände aus dünnem Metallblech sind mit schallabsorbierenden porösen Materialien wie z. B. Mineralwolle oder Kunststoffschäum ausgekleidet und besitzen idealerweise keine starre Verbindung zur Maschine, um die Übertragung von Körperschall zu vermeiden. Die maximal erreichbare Einfügungsdämmung der Haube hängt maßgeblich von der anteilig ummantelten Fläche ab und liegt nach (Eck 2012) zwischen 10 dB und 20 dB. Bei Großventilatoren bietet auch die kompakte Verkleidung einzelner Bereiche wie das Spiralgehäuse oder des Antriebsmotors Vorteile (Bild 2 rechts), jedoch ist die Konstruktion aufwändiger und die Wirksamkeit gegenüber der Haube geringer (Lotze und Schirmer 2006).

Bei der Luftschalldämpfung wird nach (Eck 2012) in Absorptions- und Reflexionsschalldämpfer unterschieden. Beide werden in den ansaugenden oder ausblasenden Luftstrom der schallabstrahlenden Strömungsmaschine integriert und bewirken eine Absenkung der Schallausbreitung im Leitungssystem. Der Absorptionsschalldämpfer führt den Luftstrom durch Kanäle mit schallschluckenden porösen Wänden entlang, deren Wirkung nach (Frommhold 2006) durch die Kanallänge und der Querschnittsform beeinflusst wird. Große Strömungsquerschnitte werden in parallele Abschnitte aufgeteilt wie z. B. beim Kulissenschalldämpfer oder Rohrschalldämpfer mit Innenteil, siehe Bild 3 (links und Mitte).

Typische Einfügungsdämpfungswerte ergeben sich nach (Schmidt 2006) zu 13 dB(A) bei einem Meter Länge. Beim Reflexionsschalldämpfer wird die Schallenergie in der Luftströmung hingegen durch Querschnittssprünge, Abzweigungen und Umlenkungen wie beispielsweise beim Scheibenschalldämpfer (Bild 4 rechts) reduziert. Die strömungstechnischen Verluste sind im Vergleich zum Absorptionsschalldämpfer jedoch ungleich viel höher (Frommhold 2006). Untersuchungen von (Költzsch 1994) und Messungen von (Elektror 2013) belegen für die Schallreduzierung von verschiedenen Reflexionsschalldämpfern in der Messumgebung des Ventilators Werte von 3 dB(A) bis 13 dB(A).



Bild 2: Vollständig (li., mi.) und teilweise (re.) gekapselte Schalldämmumhausungen (Elektror 2013)



Bild 3: Hauben mit Kulissenschalldämpfer (li.) bzw. Rohrschalldämpfer (mi.), saugseitig am Ventilator montierter Scheibenschalldämpfer (re.) (Elektror 2013)

3 Problemstellung und Vorgehensweise

Inhalt dieser Arbeit ist die Untersuchung und Entwicklung effektiver Schallschutzlösungen für einen mit 12.000 min^{-1} und 11 kW elektromotorisch angetriebenen Hochdruckventilator. Folgende Anforderungen ergeben sich an die Produktentwicklung:

- Maximal verfügbarer Bauraum 800 x 600 x 400 mm (T x B x H),
- Geräuschreduzierung auf Schalldruckpegelwerte kleiner 85 dB(A),
- Druckverluste kleiner 5 % des Druckaufbaus des Ventilators,
- Umgebungstemperatur in Motornähe $< 40^\circ\text{C}$,
- Verwendung kostengünstiger Materialien und Konstruktionen,
- Umsetzung für eine rein saug- und druckseitige Anwendung.

Aufgrund der verschiedenen Anforderungen an die Produktentwicklung ist die Auswahl der „richtigen“ Schallschutzelemente zunächst unklar. Es ergeben sich Zielkonflikte bei Berücksichtigung der Parameter Bauraum, Akustik, Druckverluste und Temperatur, die sich meist gegenseitig beeinflussen. Z. B.

erzeugen beengte Verhältnisse in strömungsführenden Querschnitten hohe Druckverluste und umgekehrt mindern große Querschnitte die Wirksamkeit der Schallschutzlösungen. Werden darüber hinaus der Ventilator- und Motorkühlluftstrom strömungstechnisch zu stark beeinflusst, kann die Verlustwärme des Ventilators womöglich nicht abgeführt werden und es kommt zum Wärmestau.

Eine analytische Herangehensweise unter Verwendung akustischer Vorhersagemodelle ist aufgrund der Komplexität der Problemstellung nicht möglich, weshalb zwangsläufig eine aufwändige experimentelle, jedoch systematische Vorgehensweise gewählt werden muss. Für die Untersuchung und Produktentwicklung ist daher ein mehrstufiger Prozess vorgesehen, siehe Bild 4, mit dessen Hilfe geeignete und kompakte Schallschutzlösungen gefunden werden sollen, die die geforderten Geräuschreduzierungen ermöglichen sowie die Druckverluste und Temperaturen minimieren. Im ersten Schritt, der schalltechnischen Optimierung, erfolgt eine Vorabbewertung und -auswahl verfügbarer Schallreduzierungsmaßnahmen, um den nachfolgenden Messaufwand mittels eines geeigneten Versuchsaufbaus zu reduzieren. Mit Hilfe einer morphologischen Vorgehensweise werden die Schallschutzlösungen hinsichtlich ihres akustischen Verbesserungspotenzials gemessen und bewertet. Sollte ein einzelnes Schallschutzelement nicht ausreichen, werden auch Kombinationen untersucht. Im zweiten Schritt werden die schalltechnisch geeigneten Konzepte bezüglich ihrer lufttechnischen Beeinflussung auf den Ventilator gemessen und ausgewertet. Im dritten Schritt erfolgt ggf. die Optimierung hinsichtlich der thermischen Beanspruchung des Ventilators. Die Entwicklung erfolgt vom Groben ins Feine, weshalb der Zielerreichungsgrad v. a. durch das schalltechnische Konzept zu Beginn geprägt ist. Zum Abschluss erfolgt die Herstellung eines finalen Konzepts zur Überführung in die Serienreife. Bei erfolgreicher Umsetzung wird der Entwicklungsprozess auf andere Anwendungen übertragen.

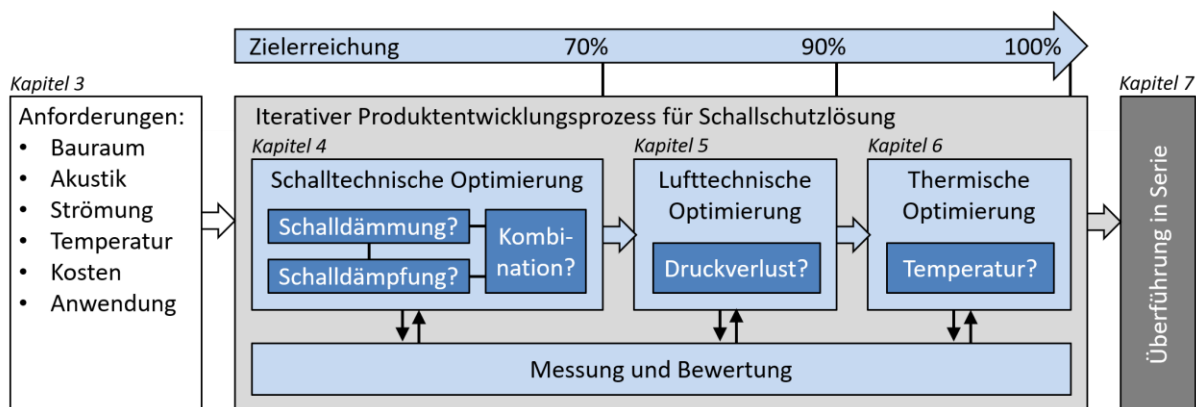


Bild 4: Entwicklungsprozess für Schallschutzlösungen bei schnell drehenden Hochdruckventilatoren

4 Schalltechnische Optimierung

4.1 Vorauswahl geeigneter Schallschutzelemente

Eine erste und keinesfalls vollständige Einschätzung der typischen Schallschutzelemente unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von (Eck 2012), (Frommhold 2006), (Költzsch 1994), (Elektror 2013) und (Schirmer 2006) ist in Bild 5 dargestellt. Folgende Aspekte sind hier ableitbar (spaltenweise v. l. n. r.):

- Bezüglich der Bauräumenutzung gestalten sich die Absorptionsschalldämpfer als nachteilig, da diese als ausladende Rohr- oder Kastenform am Ventilator angeschlossen werden müssen.
- Die größte Schallreduzierung lässt sich voraussichtlich mit Hilfe einer Schalldämmhaube erzielen. Auch die Wirksamkeit der Absorptionsschalldämpfer wird aufgrund der großen schallschluckenden Fläche und der strömungsrichtenden Wirkung als hoch eingeschätzt.
- Bei der Bewertung der Strömungsverluste ist der Sternschalldämpfer im Ansaugbereich des Ventilators aufgrund der engen reibungsbehafteten Kanäle als problematisch einzuordnen.

- Die Gefahr eines Wärmestaus ist insbesondere bei der Schalldämmhaube groß, hier müssen geeignete Belüftungskonzepte gefunden werden.
- Der konstruktive bzw. fertigungstechnische Aufwand ist bei der Schalldämmhaube deutlich größer als bei den anderen Elementen.

Wirkungsweise	Schallschutzelement	Bauraum-Nutzung	Schallreduzierung	Druckverlust	Wärmestauung	Aufwand / Kosten
Schalldämmung	Teilweise Verkleidung	gering	mittel	keine	mittel	mittel
	Schalldämmhaube	mittel	hoch	keine	hoch	hoch
Absorptions-schalldämpfer	Rohrschalldämpfer	hoch	hoch	gering	gering	mittel
	Kulissenschalldämpfer	hoch	hoch	mittel	gering	mittel
Reflexions-schalldämpfer	Scheibenschalldämpfer	gering	mittel	mittel	gering	mittel
	Sternschalldämpfer	gering	mittel	hoch	mittel	mittel
	Diffusorschalldämpfer	gering	mittel	mittel	gering	mittel
	Ansaugkasten / Umlenkung	gering	mittel	mittel	gering	mittel

Bewertung: gut schlecht

Bild 5: Einschätzung der technischen Eigenschaften typischer Schallschutzelemente

Aufgrund der geforderten kompakten Bauweise können die Absorptionsschalldämpfer trotz ihrer schall- und strömungstechnischen Vorteile in der weiteren Konzeptionierung zunächst nicht berücksichtigt werden. Auch der Sternschalldämpfer wird aufgrund seiner hohen Druckverluste nicht weiter verfolgt. Für die weitere Konzeptionierung bleiben somit fünf Schallschutzelemente übrig, deren Effekte mit Hilfe eines Prototypenaufbaus untersucht werden. Aus Kostengründen wird als Schallabsorptionsmaterial für die untersuchten Schallschutzelemente ein 20 mm starker PU-Schaumstoff mit einer Polyesterflies-Oberfläche verwendet, der direkt auf die Blechstruktur aufgeklebt werden kann.

4.2 Messung und Bewertung einzelner Schallschutzelemente

Da für die Messungen kein spezieller Akustikraum verfügbar ist, fällt die Wahl der Messmethode auf ein Prüfverfahren der Genauigkeitsklasse 3 gemäß (DIN EN ISO 3746 2011). Hiernach erfolgt die Ermittlung der Schalldruckpegel mit Hilfe von fünf Mikrofonen, die an allen vier Seiten und oberhalb des Messobjekts im Abstand von je 1 m positioniert werden und zu einem sog. Messflächen-Schalldruckpegel L_{pA} zusammengerechnet werden. Der Schalldruckpegel des frei ansaugend und ausblasend betriebenen Ventilators ohne Schallschutzelemente (siehe Bild 6 links) beträgt $L_{pA} = 109,1$ dB(A).

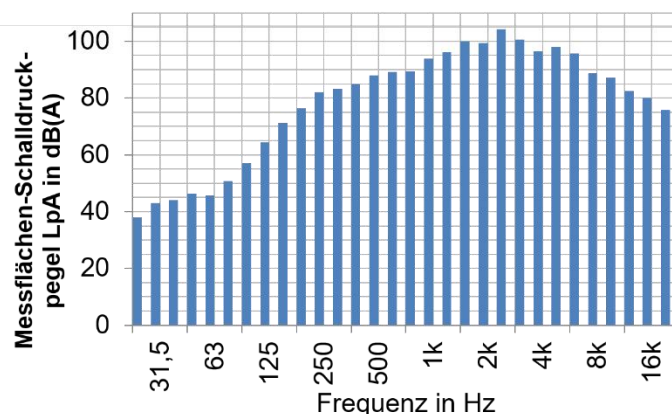
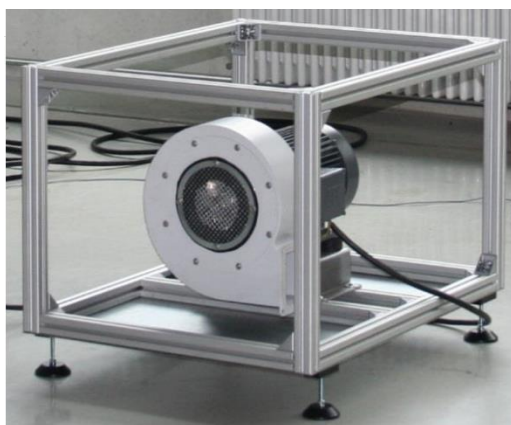


Bild 6: Prototypenaufbau mit adaptivem Profilrahmen (li.) und gemessene Schalldruckpegel (re.)

Zur Einhaltung des oberen Grenzwerts der Arbeitsschutzverordnung von 85 dB(A) wird eine Schallschutzreduzierung von wenigstens 24 dB(A) benötigt. Die zugehörige Terzbandanalyse dokumentiert die größten Schalldruckpegel bei hohen Frequenzen von ca. 2,5 kHz infolge des Drehklangs der Laufradschaufeln, siehe Bild 6 rechts.

Die fünf zu untersuchenden Schallschutzelemente werden am Prüfling montiert und gemessen. Die Auswertung der einzelnen Schalldruckpegelreduzierungen ist in Bild 7 dargestellt. Zur Verdeutlichung sind die getroffenen konstruktiven Maßnahmen in den Prinzipskizzen rot gekennzeichnet. Die teilweise Verkleidung ist mit 0,8 dB(A) Schallverbesserung vermutlich aufgrund der geringen Oberfläche des Spiralgehäuses nicht allzu wirksam und spielt für kompakte Ventilatoren offensichtlich keine Rolle. Die vollständige Umhausung ermöglicht hingegen Verbesserungen von 19,9 dB(A). Mit einer sorgfältigen Abdichtung sämtlicher Kanten sind im Versuch sogar 29,5 dB(A) erreichbar, allerdings lässt sich das aufgrund der Durchbrüche für die Ventilatoranschlüsse in der Praxis nicht umsetzen. Die Scheiben- und Diffusorschalldämpfer ergeben mittlere Reduzierungspotenziale von bis zu 3,6 dB(A). Mit 11,1 dB(A) unerwartet gute Schallwerte erreicht die ausblasseitige Luftumlenkung.

Die schalltechnische Einschätzung in Bild 5 weicht für den kompakten Prüfling bei einzelnen Schallschutzlösungen wie z. B. der teilweisen Verkleidung und der Umlenkung deutlich ab. Des Weiteren zeigt sich, dass keine Einzelmaßnahme in der Lage ist, die geforderte Schalldruckpegelreduzierung von 24 dB(A) zu erreichen. Demnach muss sich zeigen, ob eine Kombination aus Schalldämmungs- und Schalldämpfungsmaßnahmen zielführend ist.

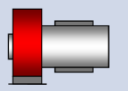
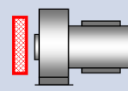
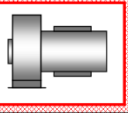
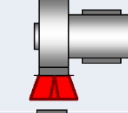
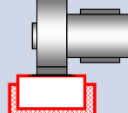
Aufbau	Schalldämmung	dB(A)	Aufbau	Schalldämpfung	dB(A)
	Teilweise Verkleidung	0,8		Scheibenschalldämpfer	3,6
	Schalldämmhaube	19,9 (29,5)		Diffusorschalldämpfer	3,0
				Umlenkung	11,1

Bild 7: Auswertung der Schalldruckpegelreduzierungen einzelner Schallschutzelemente

4.3 Messung und Bewertung von Kombinationen aus Schallschutzelementen

Zur Konkretisierung und Reduzierung möglicher Kombinationen von Schalldämm- und Schalldämpfungslösungen wird zunächst die geforderte saugseitige Ventilator-Anwendung betrachtet. Da der Ventilator hierbei auf der Ansaugseite typischerweise mittels eines Rohrs bzw. Schlauchs angeschlossen wird, entfällt die Untersuchung des Schallschutzelements an dieser Stelle. Für die restlichen Kombinationen ergibt sich die Aufstellung gemäß der Morphologie in Bild 8.

Parameter	Ausprägung
Schalldämmung am Ventilator	Schalldämmhaube
Schalldämpfung am Ausblas	Diffusorschalldämpfer
Schalldämpfung am Kühllüfter	Scheibenschalldämpfer
	Umlenkung

1 3 2 4

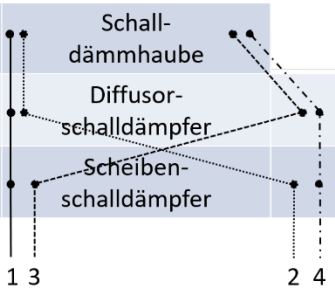


Bild 8: Morphologie für Schallschutzlösungen durch Kombination mehrerer Schallschutzelemente

Ausblasseitig kann zwischen Diffusorschalldämpfer und Strömungsumlenkung gewählt werden, am Motorlüfterflügel zwischen Scheibenschalldämpfer und der Umlenkung. Es ergeben sich für den Messaufbau vier weitere Versuche, die in Bild 9 aufbereitet und ausgewertet sind. Die nun bestimmten Messflächen-Schalldruckpegel L_{pA} bewegen sich zwischen 92 dB(A) und ca. 88 dB(A) und entsprechen ggü. den Einzelementen deutlich höheren Schallreduzierungen von ca. 17 dB(A) bis 21 dB(A). Die Verwendung zweier Umlenkungen auf der Ausblas- sowie Motorseite (Konzept 4) ergibt im Versuch die geringsten Schallwerte. Allerdings sind die Unterschiede im Vergleich zum Aufbau mit Scheiben- und Diffusorschalldämpfer weit nicht mehr so groß als bei der Betrachtung der Einzelemente. Konzept 4 gereicht schalltechnisch noch nicht an die Zielvorgaben heran, jedoch besteht weiteres Optimierungspotenzial vor allem in der Verarbeitung und Abdichtung des Aufbaus, welche in der frühen Konzeptphase noch nicht ausgereift ist. Somit erfolgt die Übergabe des Konzepts in den nächsten Entwicklungsschritt zur lufttechnischen Optimierung.

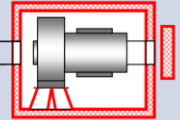
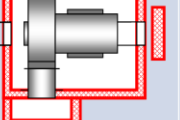
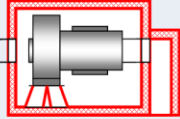
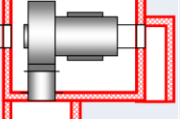
Nr.	Aufbau	Schalldämmung	dB(A)	Nr.	Aufbau	Schalldämmung	dB(A)
1		Schalldämmhaube Diffusorschalldämpfer Scheibenschalldämpfer	92,0	3		Schalldämmhaube Umlenkung Scheibenschalldämpfer	88,4
2		Schalldämmhaube Diffusorschalldämpfer Umlenkung	91,4	4		Schalldämmhaube Umlenkung Umlenkung	87,8

Bild 9: Gemessene Schalldruckpegel bei Kombination mehrerer Schallschutzelemente

5 Lufttechnische Optimierung

Für die saugseitige Ventilator-Anwendung wird Konzept 4 weiterentwickelt und mit Hilfe von neuen Prototypen sowohl erneut akustisch als auch lufttechnisch gemessen und schrittweise verbessert. Ziel der Untersuchung ist die Reduzierung der Druckverluste in der Luftströmung bei maximal möglicher Schallreduzierung unter Beibehaltung der kompakten Abmessungen und einer kostengünstigen Konstruktion. Bild 10 fasst die verschiedenen Entwicklungsschritte und die wesentlichen schall- und lufttechnischen Ergebnisse zusammen.

Variante 1 (Baukastenprinzip) zeigt den Versuchsaufbau bestehend aus Schalldämmhaube und zwei integrierten Strömungsumlenkungen ähnlich zu Grobkonzept 4. Durch den verfügbaren Platz auf der Längsseite der Haube kann nun zusätzlich ein einfacher Kulissenschalldämpfer integriert werden, der in der Vorauswahl der Schallschutzelemente zunächst nicht betrachtet werden konnte. Dieser teilt den austretenden Luftstrom in zwei parallele Abschnitte auf und bewirkt akustische Verbesserungen von 1,3 dB(A). Die Konstruktion ist modular ausgeführt mit Aufteilung in drei Segmente. Eine Kammer isoliert das Ventilatorgehäuse und den Elektromotor, eine Zweite sorgt für eine um 90° umgelenkte Zuführung des Motor-Kühlluftstroms (blaue Strömungslinien) und die dritte Kammer leitet die druckseitig ausströmende Ventilatorluft (rote Strömungslinien) zusammen mit der Motorluft über den Kulissenschalldämpfer in die Umgebung. Ein zentraler Bodenrahmen und ein Haubendeckel verschließen den gesamten Aufbau von unten und oben. Mit $L_{pA} = 87,8$ dB(A) ist der Prototyp jedoch nicht leise genug und nicht besser als das Grobkonzept 4. Vor allem an den Ein- und Austrittsöffnungen der Schalldämmhaube ergeben sich noch zu hohe Geräuschbelastungen. Des Weiteren treten hohe Druckverluste Δp von fast 10 % gegenüber dem Betrieb ohne Haube auf. Wie sich im Versuch zeigt, werden diese durch die zu engen Strömungsquerschnitte im Kulissenschalldämpfer verursacht.

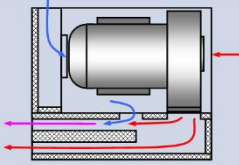
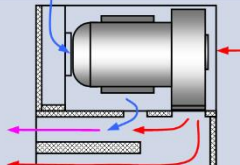
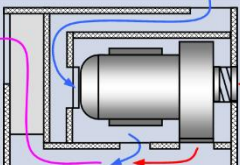
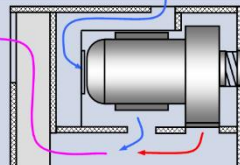




Nr.	1) Baukastenprinzip	2) Baukastenprinzip, breite Kulisse	3) Einteilige Außenwand	4) Einteilige Außenwand, breite Kulisse
Prinzipskizze				
Prototypenaufbau				
L_{pA}	87,8 dB(A) +	89,6 dB(A) +	83,7 dB(A) ++	82,4 dB(A) +++
Δp	1.100 Pa (9,5%) ---	300 Pa (2,6%) -	500 Pa (4,3%) --	400 Pa (3,4%) -

Bild 10: Vergleich weiterentwickelter Luftführungskonzepte

Der zweite Prototyp (Baukastenprinzip, breite Kulisse) verwendet einen breiteren Kulissenschalldämpfer, wodurch die Druckverluste aus Variante 1 deutlich reduziert werden. Allerdings verschlechtert sich durch die große Kulissenöffnung der Schalldruckpegel um 1,8 dB(A) auf 89,8 dB(A). Weitere Versuche zeigen, dass mit dieser Haubenkonstruktion die geforderten Schallreduzierungen auf 85 dB(A) nicht zuverlässig erreicht werden können. Das ursprüngliche Grobkonzept 4 muss daraufhin nochmals überdacht werden. Zudem erweist sich der modulare Hauben-Aufbau mangels ausreichender Abdichtung der Abschnitte als nachteilig.

Im dritten Versuch (Einteilige Außenwand) wird daher auf das modulare Kammern-Konzept zu Gunsten einer besseren Luftschalldämmung verzichtet und eine einteilige Haubenwand eingesetzt. Diese wird durch die mit Schaumstoff ausgekleideten Boden- und Deckelbleche vollständig abgedichtet. Des Weiteren werden sowohl der Kühlluftstrom des Motors (blaue Strömungslinien) als auch der Ventilator-Luftstrom auf der Druckseite (rote Strömungslinien) zwei weitere Male umgelenkt als Konsequenz aus den unzureichenden Schallreduzierungen des Grobkonzepts 4. Beide Luftpfade werden ebenfalls mit schallabsorbierendem Schaumstoff ausgekleidet. Im druckseitigen Luftpfad wird der Kanal zum Austritt hin mit einer horizontalen Wandung nochmals aufgeteilt. Die weiteren Umlenkungen und die besser realisierte Abdichtung ermöglichen nun mit 83,7 dB(A) eine deutlich höhere Geräuschreduzierung. Die Druckverluste steigen aufgrund der weiteren Umlenkungen jedoch wieder etwas an.

In Variante 4 (Einteilige Außenwand, breite Kulisse) wird der Ventilator innerhalb der Haube um einige Zentimeter zu Gunsten einer breiteren druckseitigen Kulisse versetzt. Die Abdichtung rund um die Verbindungsstellen und im Bodenrahmen wird nochmals verbessert, wodurch der Messflächen-Schalldruckpegel um weitere 1,3 dB(A) auf 82,4 dB(A) verringert werden kann. Die Druckverluste können gegenüber Variante 3 etwas verbessert werden.

Aus akustischer und lufttechnischer Sicht unter Berücksichtigung kompakter Abmessungen stellt Variante 4 somit die beste Lösung für die saugseitige Anwendung dar. Weitere Verbesserungen sind nur durch extern angebrachte zusätzliche Kulissen- bzw. Rohrschalldämpfer an den Haubenöffnungen oder durch weitere Umlenkungen der Luftpfade denkbar, wobei dann die geforderten Größen Bauraum und Druckverlust nicht mehr eingehalten werden können. Aufgrund des besten Kompromisses aus Bauraum, Akustik und Strömungsverluste wird das Konzept an den nächsten Entwicklungsschritt zur thermischen Optimierung übergeben.

6 Thermische Optimierung

Durch das gewählte Schall- und Luftführungskonzept mit Abtransport des Motorkühlluftstroms über den Austrittsvolumenstrom des Ventilators kann auf die ansonsten zusätzliche akustisch nachteilige Haubenöffnung verzichtet werden. Allerdings zeigen weitere Versuche, dass es zu einer ungünstigen Rückströmung warmer ausgeblasener Luft des Ventilators in den Motorraum kommen kann, wodurch die Motorwicklung und die Kugellagerung thermisch zusätzlich beansprucht werden. Das Belüftungskonzept in der Schalldämmhaube muss daher im Rahmen einer eigenen Versuchsreihe weiter optimiert werden. Bild 11 zeigt hierzu die verschiedenen geprüften Luftführungsvarianten und die im Motorraum der Schallumhausung gemessenen Temperaturen. Über ein Heizregister wird die vom Ventilator angesaugte Luft auf 55°C vorgeheizt und eine warme saugseitige Anwendung simuliert. Der Motorlüfter wird währenddessen durch 25°C warme Luft aus der Umgebung gespeist.

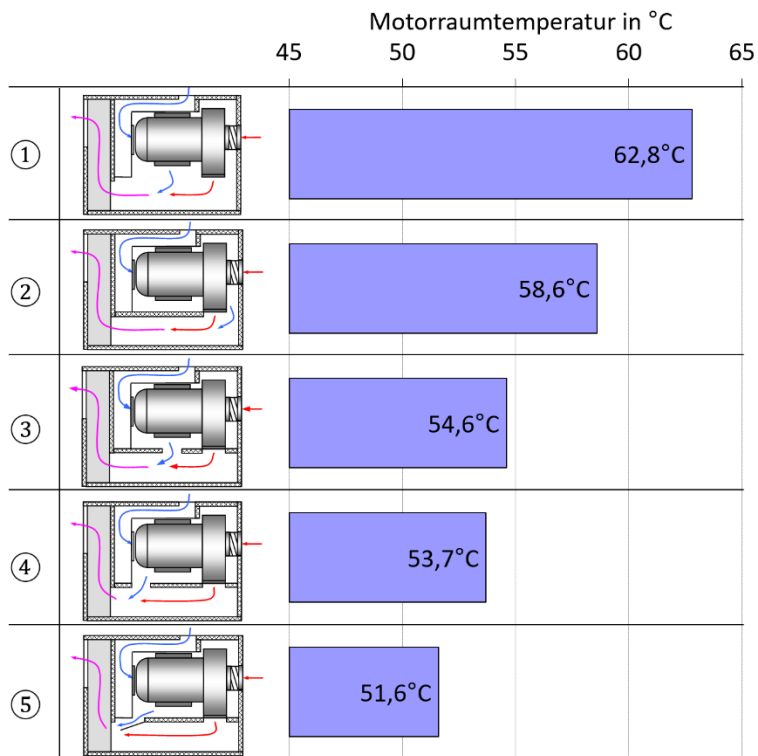


Bild 11: Motorraumtemperaturen bei unterschiedlicher Luftführung

Im ersten Aufbau wird auf eine Abtrennung zwischen Motorraum und Schalldämpferkanal verzichtet, um den ungünstigsten Fall abzubilden. Die mit 55°C angesaugte und durch die Verdichtung des Laufwheels zusätzlich erhitzte Luft wird nicht mehr kontrolliert aus der Haube ausgeleitet und vermischt sich mit der Motorkühlluft zu ca. 63°C im Motorraum. In Versuch 2 bis 4 wird die Abtrennung zwischen Motorraum und Ventilator-Abluftkanal wieder eingesetzt und die Übergabestelle der Motorkühlluft schrittweise in Richtung Haubenaustritt verlagert. Die Temperaturmessung im Motorraum geht dabei erkennbar von 59°C auf 54°C zurück. Grund hierfür ist die mehr und mehr gerichtete Luftströmung im Abluftkanal des Ventilators, wodurch die Rückströmung quer in den Motorraum verringert wird. Im letzten Versuchsaufbau wird mit Hilfe eines Leitblechs eine Rückströmung vollständig verhindert, es entsteht sogar eine leichte Sogwirkung, die die Motorkühlung unterstützt. Mit knapp 52°C im Motorinnenraum ergeben sich die geringsten Temperaturen der Versuchsreihe. Die Schallschutzlösung für saugseitige Anwendung ist somit ausgearbeitet und kann in die Serienkonstruktion überführt werden.

7 Finalisierung der Produktentwicklung

Nach Abschluss der konzeptionellen Untersuchungen wird die Schalldämmhaube für die saugseitige Anwendung mit kleinen Optimierungen in die Serie überführt und final am Normprüfstand für verschiedene Volumenströme entlang der Ventilatorcharakteristik gemessen, siehe Bild 12. Die gemittelten Messflächen-Schalldruckpegel in einem Meter Entfernung bewegen sich abhängig vom Betriebspunkt zwischen 79,7 dB(A) und 86,7 dB(A) und ermöglichen Schalldruckpegelreduzierungen bis 32,9 dB(A). Durch die optimale Kulissenbreite ergeben sich Totaldruckverluste von 700 Pa bei größten Volumenströmen. Infolge der Einhausung und des Haubenkonzepts erhöht sich die Temperatur in der Umgebung des Motors auf maximal 35,9°C und bietet ausreichend thermische Reserve auch bei höheren saugseitigen Medientemperaturen. Der Prozess zur Entwicklung einer saugseitigen Schallschutzlösung für schnelle drehende kompakte Hochdruckventilatoren ist unter Einhaltung der Anforderungen erfolgreich durchlaufen und abgeschlossen.

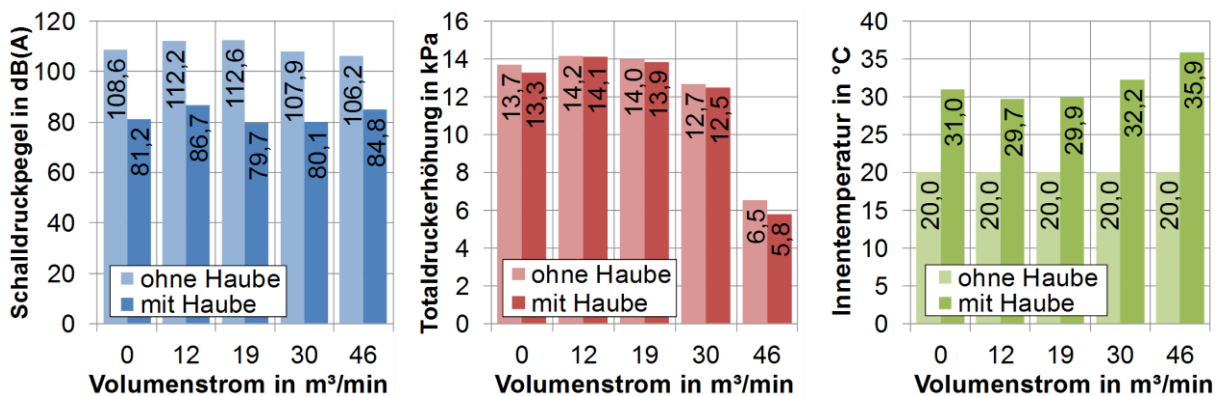


Bild 12: Vergleich Betriebswerte mit und ohne Schalldämmhaube

8 Übertragbarkeit der Ergebnisse und Ableitung wesentlicher Erkenntnisse

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wird der Prozess für die Entwicklung einer druckseitigen Anwendung erneut durchlaufen, wobei die schalltechnische Grobkonzeptionierung aufgrund der gesammelten Erfahrung übersprungen werden kann und direkt mit der lufttechnischen Optimierung gestartet wird. Auch bei der druckseitigen Anwendung wird mit mehrfachen Umlenkungen gearbeitet. Die lufttechnische und thermische Optimierung ist aufgrund der guten Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse aus der saugseitigen Ausführung schnell abgeschlossen. Bild 13 zeigt abschließend die beiden entwickelten Schallschutzlösungen für schnell drehende Hochdruckventilatoren.

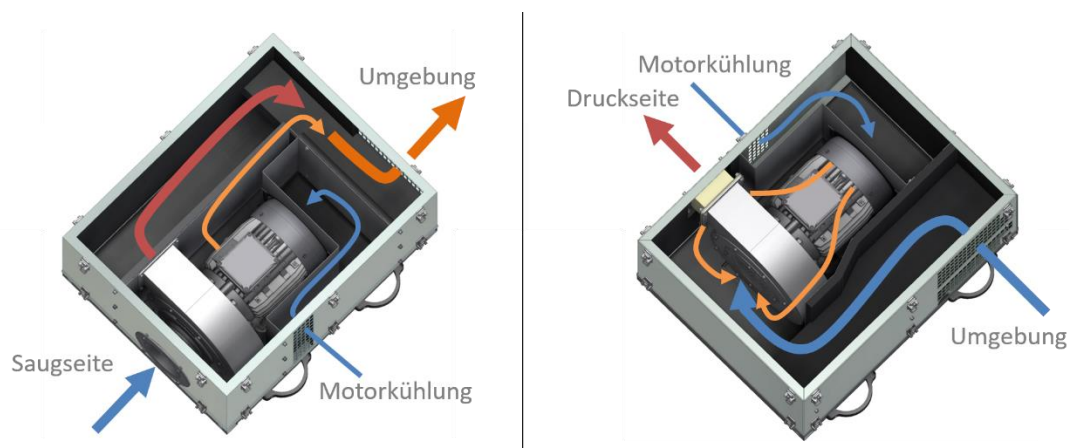


Bild 13: Schallschutzlösungen für schnell drehende Ventilatoren für saugseitige und druckseitige Anwendung

Aus den durchgeführten Experimenten lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten, die auch für andere kompakte (Strömungs-)Maschinen Gültigkeit haben sollten:

- Schallschutzmechanismen: Als effektive und konstruktiv einfache Schalldämpfungsmaßnahme stellt sich der Ansaugkasten bzw. die Strömungsumlenkung dar. Die teilweise Verkleidung von Maschinenteilen hat bei kleinen Abmessungen keinen relevanten Effekt und der Einsatz von Scheiben- und Diffusorschalldämpfern ermöglichen nur mittlere Schallreduzierungen. Bei hoher Geräuschemission der Maschine reicht der Einsatz einzelner Schalldämpferelemente jedoch nicht aus, nur die Integration von Reflexionsschalldämpfern in eine umgebende Schallumhausung ist hier zielführend. Vorteilhaft erweist sich die mehrfache Strömungsumlenkung um 90° innerhalb der Schalldämmhaube, welche sich konstruktiv gut umsetzen lassen.
- Abdichtung: Die saubere Verarbeitung und Abtrennung der Strömungskanäle ggü. der Umgebung ist entscheidend für die resultierende Schallreduzierung. Bereits kleinste nicht abgedichtete Luftspalte vermindern die Wirkung der Schallschutzelemente um mehrere Dezibel, insbesondere bei der Schalldämmhaube. Bei modularer Bauweise der Schallumhausung muss auf eine gute Abdichtung der Segmente geachtet werden, besser eignet sich hier ein einteiliger Aufbau, sofern möglich.
- Schalldämmmaterial: Die Schallschutzmechanismen beruhen auf der schallabsorbierenden Wirkung der eingesetzten Schaumstoffe. Die in dieser Arbeit untersuchten verschiedenen Materialien unterschieden sich im resultierenden Schalleindruck jedoch meist nur geringfügig, weshalb diese hier nicht intensiv behandelt wurden. Die richtige Abdichtung der Schallschutzelemente ist hier zielführender.
- Druckverluste: Die effektive Wirkungsweise von Reflexionsschalldämpfern beruht auf der Umlenkung der Schallwege. Werden diese durchströmt, ergeben sich zwangsläufig Druckverluste. Diese verhalten sich quadratisch proportional zur Strömungsgeschwindigkeit, weshalb die Schallwege nicht zu beengt ausgeführt werden dürfen. Zu große Strömungsquerschnitte mindern wiederum die Wirksamkeit der Schallschutzmaßnahme, weshalb stets ein Kompromiss zwischen Druckverlust und Schallreduzierung gefunden werden muss.
- Belüftung: Je mehr Hüllfläche der Maschine abgedeckt ist, umso höher ergibt sich das Schallreduzierungspotenzial der Schalldämmhaube. Durch Zusammenlegen von Motorkühlluft und Luftstrom der (Strömungs-)Maschine kann auf eine Öffnung in der Haube zu Gunsten der Akustik verzichtet werden. Hierbei muss jedoch das Belüftungskonzept zur Vermeidung von Rückströmungen untersucht und ggf. angepasst werden. Vorteilhaft zeigt sich eine zum Hauptströmungskanal spitz zulaufende Gestaltung der Motorluftübergabe.

9 Diskussion

Die Untersuchung und Entwicklung der gezeigten Schalllösungen erfolgte trotz der gewählten Systematik an einigen Stellen intuitiv und pragmatisch, wie z. B. beim gewählten Messaufbau. Gegenüber Versuchen in speziellen Schallräumen sind die Messergebnisse dadurch größeren Unsicherheiten unterworfen, welche sich aufgrund des relativen Vergleichs der Versuche aber nicht ungünstig auswirken. Für weitere Entwicklungen bietet sich trotzdem eine bessere Vorbereitung der Messumgebung an. Viele der gewonnenen Erkenntnisse sind im Nachhinein durch den Erfahrungsgewinn naheliegend und lassen sich in verallgemeinerter Form auch in der Literatur wiederfinden, z. B. bei (Lotze und Schirmer 2006), welche Orientierungshilfen für die konstruktive Gestalt von Schalldämmhauben bieten. So wird hier bereits auf die erforderliche Qualität der Abdichtung verwiesen. Im Detail ergeben sich jedoch auch Unterschiede: Für hohe Einfügungsdämmwerte werden z. B. entdröhntes Stahlblech oder doppelwandige Ausführungen empfohlen, welche im entwickelten Aufbau durch den Einsatz kostengünstiger verklebter PU-Schaumstoffe jedoch nicht erforderlich waren. Des Weiteren werden für die Dämpfung tiefer Frequenzen Mindestwandabstände zur Maschinenoberfläche angegeben, die durch das hochfrequente Geräuschaufkommen des Ventilators jedoch unbedeutend waren. Die Empfehlung,

Ansaug- und Ausblasöffnungen mit Schalldämpfern zu versehen, wurde durch den platzsparenden Einsatz der Luftumlenkungen gelöst, welche sich nach (Frommhold 2006) auch speziell zur Dämpfung hoher Frequenzen eignen.

10 Literatur

- Carolus 2020 CAROLUS, Thomas: *Ventilatoren. Aerodynamischer Entwurf – Konstruktive Lärmmin- derung – Optimierung*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2020.
- DIN EN ISO 3746 2011 Norm DIN EN ISO 3746 März 2011. *Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächen- verfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3746:2010*.
- Eck 2012 ECK, Bruno: *Ventilatoren. Entwurf und Betrieb der Radial-, Axial- und Querstrom- ventilatoren. Klassiker der Technik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Elektror 2013 ELEKTOR AIRSYSTEMS GMBH: *Intern genutzte Produktbilder aus der Fertigung und Er- gebnisse aus Schalldruckpegelmessungen*. Ostfildern, 2013.
- Frommhold 2006 FROMMHOLD, Werner: Absorptionsschalldämpfer. In: Schirmer, Werner (Hrsg.): *Technischer Lärmschutz, Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 249 - 280.
- Költzsch 1994 KÖLTZSCH, Peter: *Integrierte Lärminderungsmaßnahmen an Ventilatoren, Band 16 von Lärmarm konstruieren*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1994.
- LärmVibrationsArbSchV 2021 BUNDESAMT FÜR JUSTIZ: *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV)*. 2021.
- Lotze und Schirmer 2006 LOTZE, Eberhard; SCHIRMER Werner: Schallschutzkapseln. In: Schirmer, Werner (Hrsg.): *Technischer Lärmschutz, Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 281 - 305.
- Schirmer 2006 SCHIRMER, Werner: Konstruktion lärmarmen Maschinen. In: Schirmer, Werner (Hrsg.): *Technischer Lärmschutz, Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 218 - 234.
- Schmidt 2006 SCHMIDT, Lothar: Ventilatorgeräusche. In: Schirmer, Werner (Hrsg.): *Technischer Lärmschutz, Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 235 - 248.

Prozesskettenorientierte Herstellbarkeitsanalyse von Produkten durch die Nutzung eines Constraint-Satisfaction-Problems

Process chain-oriented manufacturability assessment of products by using a constraint satisfaction problem

Kevin Herrmann¹, Felix Pusch¹, Stefan Plappert¹, Behrend Bode¹,
Iryna Mozgova², Paul Christoph Gembarski¹, Roland Lachmayer¹

¹Leibniz University Hanover, Institut of Product Development, Garbsen
herrmann@ipeg.uni-hannover.de

²University Paderborn, Institut of Data Management in Mechanical Design, Paderborn

Abstract: Dieser Beitrag stellt eine rechnergestützte Modellierungsstrategie vor, um Prozesskettenwissen, wie die Gestaltung der Fertigungsstufen, prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen oder Fertigungshilfsmittel, für die Produktgestaltung zu formalisieren und im Kontext des Design for Manufacturing für Produkt- und Prozessgestaltungsentscheidungen bereitzustellen. Dabei werden am Beispiel einer Tailored-Forming-Prozesskette die Herstellungsschritte einer Multimaterial-Welle mittels eines Constraint-Satisfaction-Problems (CSP) modelliert, indem die geometrischen Transformationen einzelner Fertigungsstufen sowie Fertigungsrestriktionen in Form von Constraints und Fertigungsstufen sowie Fertigungshilfsmittel über Parameter in den CSP-Variablen formuliert werden. Das CSP ist damit in der Lage, ausgehend von einem Geometriemodell eines Bauteils eine prozesskettenorientierte Restriktionsprüfung zur Herstellbarkeitsbewertung durchzuführen und automatisiert Fertigungsstufen sowie Fertigungshilfsmittel zu konfigurieren.

Keywords:

design for manufacturing, constraint satisfaction problem, tailored forming, Wissensbasierte Systeme

Abstract: This paper presents a computer-aided modeling strategy to formalize process chain knowledge, such as the design of manufacturing stages, cross-process manufacturing constraints or manufacturing tools, for product design and to provide it for product and process design decisions in the context of design for manufacturing. Using the example of a tailored forming process chain, the manufacturing steps of a multi-material shaft are modeled by means of a constraint satisfaction problem (CSP) by formulating the geometric transformations of individual manufacturing steps as well as manufacturing restrictions in the form of constraints, and manufacturing steps as well as manufacturing resources via parameters in the CSP variables. The CSP is thus able to perform a process-chain-oriented restriction check for manufacturability evaluation based on a geometry model of a component and to automatically configure manufacturing stages and manufacturing resources and tools.

Keywords:

design for manufacturing, constraint satisfaction problem, tailored forming, Wissensbasierte Systeme

1 Motivation

Der Einsatz von Multimaterial-Bauteilen eröffnet neue Möglichkeiten für den belastungsgerechten Leichtbau (Ashby and Cebon 1993). Die Nutzung unterschiedlicher Werkstoffe ermöglicht die lokale Anpassung von Bauteileigenschaften an ortsspezifische Anforderungen, um eine effizientere Bauteilgestaltung zu erhalten (Brockmöller et al. 2020; Herrmann et al. 2022). Dieser Vorteil wird jedoch durch eine höhere Komplexität bei der Konstruktion durch die Berücksichtigung der Materialverteilung sowie zusätzlichen fertigungsinduzierten Gestaltungseinschränkungen erkauft. Neben der Konstruktion ist auch die Multimaterial-Fertigung aufwendiger und kostenintensiver im Vergleich zu einer Monomaterial-Fertigung (Gouker et al. 2006). Solche komplexen Prozessketten zeichnen sich dadurch aus, dass verbunden mit den vielen Interdependenzen der beteiligten Prozesse auch die Prozessunsicherheiten steigen. Der initiale Aufwand für den Aufbau solcher Prozessketten ist immens hoch, sodass die Konformität von neuen Produktentwürfen mit bestehenden Prozesselementen und Prozessketten besonders erstrebenswert ist (Özbayrak et al. 2004). Um dem kausalen Zusammenhang zwischen Fertigung und der Produktgestalt gerecht zu werden, muss möglichst frühzeitig Fertigungswissen in den Entwicklungsprozess integriert werden (Feldhusen et al. 2013).

Durch die Multimaterialität und die Notwendigkeit von mehrstufigen Fertigungsprozessen wird ein großer Lösungsraum aufgespannt, der bei einer Entwurfsbewertung der Fertigungskonformität eines Bauteils untersucht werden muss. Die Herausforderung besteht in der Formalisierung des Fertigungswissens und der gezielten Lösungsraumexploration für die zu entwerfenden Bauteile, um Rückschlüsse im Kontext des Design for Manufacturing auf realisierbare Produktgestalten erlaubt. Dafür ist eine holistische Betrachtung der späteren Prozessketten und der zur Herstellung der Fertigteilgeometrie notwendigen Fertigungsstufen erforderlich (Anjum et al. 2012). So lassen sich neben prozessspezifischen auch prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen in der Entwicklung berücksichtigen, die sich aus dem Zusammenwirken einzelner Prozesse ergeben (Herrmann et al. 2021a). Hierbei ergibt sich die Forschungsfrage: *Wie kann die prozessketten-orientierte Entwurfsbewertung von mehrstufig hergestellten Tailored-Forming-Bauteilen durch wissensbasierte Assistenzsysteme unterstützt werden?*

Dieser Beitrag stellt am Beispiel einer komplexen Tailored Forming Prozesskette zur Herstellung einer multimateriellen Welle eine constraint-basierte Modellierungsstrategie vor, um Fertigungswissen, wie die Gestaltung der Fertigungsstufen, prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen oder einsetzbare Fertigungshilfsmittel, für die Produktgestaltung zu formalisieren und im Kontext des Design for Manufacturing für Produkt- und Prozessgestaltungsentscheidungen bereitzustellen. Zudem wird ein Konfliktlöser vorgestellt, der für verletzte Fertigungsrestriktionen Maßnahmen zu dessen Lösung ableitet.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Konzept eines Fertigungsstufenmodells

Die Herausforderung bei der Formalisierung von Prozesskettenwissen ist die Abstraktion der Prozessschritte. Besonders bei mehrstufigen Prozessketten in der unterschiedliche Fertigungsverfahren involviert sind, muss bei der Modellierung ein gemeinsames Abstraktionsniveau gefunden werden. So kann ein Biegeprozess durch explizite Gleichungen abgebildet werden. Wird jedoch ein Wärmebehandlungsprozess betrachtet, sind zur Beschreibung Finite Element Simulationen notwendig. Um dieser Thematik zu begegnen und aus dem formalisierten Prozesskettenwissen Rückschlüsse für die Produkt- und Prozessgestaltung zu ermöglichen, wird in diesem Beitrag das Konzept eines Fertigungsstufenmodells untersucht. Der Grundgedanke eines Fertigungsstufenmodells ist es, ausgehend von einem Fertigteilgeometriemodell eines Bauteils die zur Herstellung notwendigen Geometriemodelle der Fertigungsstufen abzuleiten und gleichzeitig Restriktionsprüfungen hinsichtlich

der Anforderungserfüllung alle involvierten Fertigungsschritte durchzuführen. Das Fertigungsstufenmodell ist damit ein Werkzeug für die Spätphase der Produktentwicklung, in der ein intensiver Informationsaustausch mit der Fertigungsplanung stattfindet, um eine herstellbare Produktgestalt und eine effektive Fertigung zu erreichen. Dieser Prozess ist in der Regel iterativ und zeitintensiv (Li et al. 2018). Durch das Fertigungsstufenmodell soll diese Zeit verkürzt werden, indem Teile dieses Informationsaustausches und anschließende Aktivitäten durch ein wissensbasiertes System übernommen werden. Das wissenschaftliche Ziel des Fertigungsstufenmodells ist die Herstellbarkeitsuntersuchung von Bauteilen im Hinblick auf ihre späteren Prozessketten durch eine holistische Betrachtungsweise, welche es erlaubt, auch prozessübergreifende Fertigungswechselwirkungen zu berücksichtigen (Herrmann et al. 2021a). Aus dem Fertigungsstufenmodell ergibt sich der Nutzen, die Herstellbarkeit von Bauteilgeometrien zu bewerten, Geometriemodelle für die Zwischenstufen in der Fertigung abzuleiten und die Spezifikation der jeweiligen Fertigungshilfsmittel zu unterstützen. Dies ermöglicht eine schnellere und effizientere Fertigungsplanung, indem erste Aktivitäten parallel zu der Spätphase der Produktentwicklung stattfinden und relevante Prozessketteninformationen automatisiert in die Gestaltung von Bauteilen einfließen können (vgl. Bild 1).

Ausgangspunkt des Fertigungsstufenmodells ist ein CAD-Modell des Fertigteils (1). Anschließend folgt die Auswahl von geeigneten Fertigungstechnologien sowie die Bildung einer Fertigungsreihenfolge durch Fertigungsexperten (2). Bei der Entwicklung von Prototypen oder Kleinserien sind in der Regel die später eingesetzten Fertigungsverfahren und Werkstoffgruppen bereits zu Beginn des Produktgestaltungsprozesses festgelegt, da sich bestimmte Verfahren in der Vergangenheit als optimal herausgestellt haben und das Know-how und die Investitionen dafür im eigenen Haus vorhanden sind (Ehrlenspiel et al. 2013). Mit der Auswahl der Prozesskette sind die Fertigungsfähigkeiten und die damit verbundenen Fertigungsrestriktionen an die Gestalt des Fertigteils zum Teil festgelegt (3). An dieser Stelle setzt das Fertigungsstufenmodell an. Es bietet die Möglichkeit Fertigungsrestriktionen zu formalisieren, automatisiert die zur Herstellung notwendigen Fertigungsstufen abzuleiten (4) und auf Basis eines formalen Modells eine prozesskettenorientierte Herstellbarkeitsbewertung durchzuführen (5). Abschließend gibt das Fertigungsstufenmodell Rückmeldung zur Herstellbarkeit und leitet gegebenenfalls Maßnahmen zur Erreichung der Herstellbarkeit ab, indem benötigte Fertigungsressourcen spezifiziert oder Fertigteilanpassungen vorgenommen werden (6).

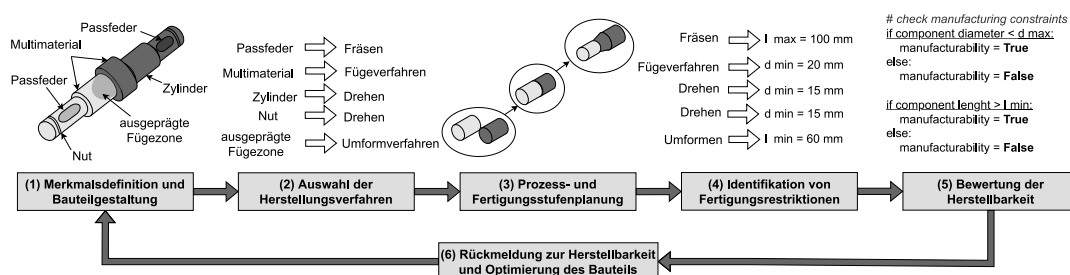


Bild 1: Ablauf des Fertigungsstufenmodells

2.2 Bisherige Arbeiten zum Fertigungsstufenmodell

In Herrmann et al. (2021a) wird das Fertigungsstufenmodell als inverses Prozesskettenmodell vorgestellt, wobei die Prozesskette über die Verknüpfung parametrischer Geometriemodelle von involvierten Fertigungsstufen modelliert wird. Die Verknüpfung der Fertigungsstufen erfolgt durch Transferfunktionen, die die geometrischen Transformationen des Werkstücks entlang der Prozesskette beschreiben. Eine Transferfunktion ist in diesem Kontext eine parametergebundene Zustandsänderung des Werkstücks durch einzelne Fertigungsprozesse und ist dabei abhängig von der Beschaffenheit des zugehörigen Fertigungsverfahrens, den genutzten Fertigungsressourcen und den Prozessparametern. Sie kann beispielsweise als mathematisches Gleichungssystem oder als numerische Simulation modelliert werden.

Herrmann et al. (2021b) bauen auf diesem Konzept auf und verstehen das Fertigungsstufenmodell als Abfolge von Analyse- und Synthese-Operationen, die eine Ableitung der Fertigungsstufen erlauben. Dabei wird die Analyse mittels numerischer Prozesssimulation und die Synthese über einen mathematischen Optimierer umgesetzt. Im Analyse-Synthese-Prozess wird die Gestalt einer vorgelagerten Fertigungsstufe iterativ angepasst, bis sie die Herstellung der nachgelagerten Fertigungsstufe mit den zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen und Prozessen ermöglicht. Verknüpft werden die Analyse- und Synthese-Operationen in generativen Geometriemodellen von den untersuchten Fertigungsstufen. Diese Modelle werden nach dem Generative Parametric Design Approach (Altun et al. 2022) aufgebaut, wodurch eine hohe Flexibilität in der Modellstruktur erreicht wird, da der Optimierer beim Ableiten der Fertigungsstufen nicht nur parametrische, sondern auch topologische Änderungen vornehmen kann, indem andere Gestaltelemente in ein Modellskelett gehängt werden. So kann ein größerer Lösungsraum für die Fertigungsstufen dargestellt werden. Die Modellierung des Fertigungsstufenmodells als Abfolge von Analyse- und Synthese-Operationen bringt jedoch Nachteile. Zum einen setzt die Modellierungsstrategie einen hohen Implementierungsaufwand voraus und resultiert in einer komplexen Modellstruktur. Zum anderen erfordert der iterative Einsatz von numerischen Simulationen eine große Rechenzeit. Des Weiteren fehlen in den bestehenden Ansätzen des Fertigungsstufenmodells die Aspekte, wie mögliche Fertigungskonflikte aufgedeckt und Maßnahmen zur Erreichung der Fertigungsgerechtigkeit abgeleitet werden können.

Innerhalb dieses Beitrags wird daher eine Modellierungsstrategie vorgestellt, die einerseits die Modellkomplexität verringert und andererseits einen Inferenzmechanismus zur Bewertung der Herstellbarkeit sowie zur Ableitung von gegebenenfalls darauffolgenden Maßnahmen beinhaltet. Dafür wird das Fertigungsstufenmodell als ein Konfigurationsproblem verstanden. Es wird nach einer Konfiguration aller Parameter der Fertigungsstufen gesucht, die allen Restriktionen der hinterlegten Prozesskette und deren Einzelprozessen gerecht wird. Dabei kommt ein Constraint-Satisfaction-Problem zum Einsatz, dessen zugrunde liegende Konfigurationsmechanismus eine hohe Performance, Automatisierbarkeit und Erweiterbarkeit verspricht (Felfernig et al. 2014).

2.3 Constraint Satisfaction Problem

Ein Constraint Satisfaction Problem (CSP) ist eine Aufgabenstellung aus der künstlichen Intelligenz und aus der Unternehmensplanung, bei der ein Zustand (d. h. Belegungen von Variablen) gesucht wird, der alle aufgestellten Bedingungen (Constraints) erfüllt. Dabei ist ein CSP durch eine endliche Menge von Variablen, eine Funktion, die jede Variable in einer endlichen Domäne abbildet und eine endliche Menge von Constraints, die die Wertebelegung der Variablen untereinander beschränken, definiert (Brailsford et al. 1999; Gembariski 2022). Im Unterschied zu anderen Optimierungsproblemen, in denen eine Näherungslösung gesucht wird, fordern CSPs vom Grundgedanken (es gibt auch Ausnahmen) eine vollständige Erfüllung jeder einzelnen Constraints. Sind die aufgestellten Constraints widersprüchlich zueinander, so gibt es keine Lösung des Problems. Ist dies nicht der Fall, besitzt das CSP ein oder durchaus auch mehrere Lösungen. Innerhalb eines CSPs werden verschiedene Constraint-Typen unterschieden: unäre Constraints (kontrollieren die Wertebelegung einer einzelnen Variablen), binäre Constraints (Verknüpfungen zwischen zwei Variablen) und Constraints höherer Ordnung (Verknüpfungen, die drei oder mehrere Variablen umfassen). Allgemeine Suchalgorithmen können zur Lösung von CSPs genutzt werden, jedoch gibt es Algorithmen, die speziell für diese Problemklasse entwickelt wurden und somit wesentlich effizienter sind als allgemeine Suchalgorithmen. Grundsätzlich gibt es für die Lösung eines CSPs zwei Arten von Algorithmen (Kumar 1992). Suchalgorithmen, wie das Backtracking, sind in der Lage, durch systematisches Ausprobieren von Werten eine Lösung für das CSP zu finden (Brailsford et al. 1999). Constraint Propagation-Algorithmen hingegen versuchen, die möglichen Werte der Variablen anhand der Einschränkungen zu reduzieren, um die Lösungssuche zu beschleunigen. Eine Herausforderung bei der Lösungssuche im CSP ist der Suchraum, der exponentiell mit der Anzahl an Variablen und Domänen wächst. Wird beispielsweise ein CSP mit 10 Variablen, deren Domänen jeweils von 1 bis 10 definiert sind, betrachtet, ergeben sich $10^{10}=10.000.000.000$ Wertekombinationen, die hinsichtlich möglicher Lösungen überprüft werden

müssen. An dieser Stelle können auch Kombination verschiedener Ansätze eingesetzt werden, wie zum Beispiel die Verwendung eines Suchalgorithmus als Ausgangspunkt und dann das Wechseln zu einem einschränkenden Algorithmus. Mit dem hybriden Suchen können die Stärken verschiedener Ansätze kombiniert werden, um schneller zu einer Lösung zu gelangen (Prosser 1993). Die Wahl einer effektiven Lösungsstrategie erfordert ein gutes Verständnis über das spezifische Problem und hängt von seiner individuellen Beschaffenheit ab.

3 Modellierungs- und Schlussfolgerungsstrategie des Fertigungsstufenmodells

Die Vorstellung der Modellierungs- und Inferenzstrategie erfolgt am Beispiel einer Multimaterial-Welle, welche im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 1153 „Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming“ hergestellt wird. Zu Beginn werden zwei monomaterielle Halbzeuge aus unterschiedlichen Werkstoffen durch Drehen bearbeitet, um eine angespitzte Fügezone zu erhalten. Dadurch kann beim nachfolgenden Reibschweißen ein Spitzkegel in einen gegenläufigen Hohlkegel des anderen Monomaterial-Halbzeugs eintauchen, was eine größere Reibfläche erzeugt und damit den Verbund stärkt. Anschließend wird das hybride Halbzeug durch einen Fließpressprozess thermo-mechanisch umgeformt. Durch die gemeinsame Umformung der gefügten Werkstoffe bildet sich eine intermetallische Phase in der Fügezone aus, welche die vorherrschende Verbindung verstärkt. Abschließend wird der umgeformte Rohling zur Endkontur zerspant, um Randzonen- sowie Oberflächeneigenschaften für das Bauteil einzustellen (vgl. Bild 2). (Behrens et al. 2019; Denkena et al. 2019)

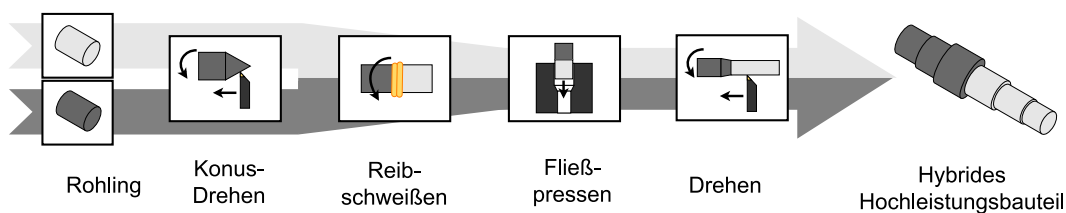


Bild 2: Tailored-Forming-Prozesskette einer Multimaterial-Welle

3.1 Formalisierung von Prozesskettenwissen innerhalb eines CSP

Zur rechnergestützten Umsetzung des Fertigungsstufenmodells ist eine formale Beschreibung der Fertigungsprozesskette erforderlich. Zur vollständigen Prozesskettenformalisierung sind drei Perspektiven notwendig (Martin 2005). (1) Die Prozessperspektive beschreibt die Schritte und das Verfahren, die zur Herstellung des Produkts erforderlich sind. Die genaue Beschreibung eines Fertigungsprozesses hängt dabei von dem spezifischen Eingangs- und Ausgangswerkstück und der verwendeten Fertigungstechnologie ab. Damit beschreibt die Prozessperspektive die Transformationen des Werkstücks durch die Fertigungsprozesse. (2) Die Produktperspektive beschreibt die Gestalt des Werkstücks entlang der Prozesskette. Aufgrund der Transformationen durch die Fertigungsprozesse muss die Produktperspektive sich adaptiv gegenüber den prozessinduzierten Gestaltänderungen verhalten. (3) Die Ressourcenperspektive beschreibt die Fertigungshilfsmittel, Werkzeuge und Maschinen, die während der Fertigung zum Einsatz kommen und damit die Fertigungsfähigkeiten und -restriktionen festlegen.

Zu Beginn wurden die Prozesskette und ihre Eingangs-, Zwischen- und Ausgangsprodukte analysiert. Dabei wurden zur Wissensakquise Interviews mit Expertinnen und Experten durchgeführt und Informationen aus einem SFB 1153 internen Forschungsdaten- und Wissensmanagementsystems entnommen. Das auf Semantic MediaWiki basierende Wissensmanagementsystem dient der prozessübergreifenden Koordinierung des Informations- und Wissensaustauschs zwischen den Teilprojekten. Dabei wird relevantes Prozess- und Ressourcenwissen semantisch annotiert und kollaborativ zur Verfügung gestellt (Sheveleva et al. 2023).

Dieses Produkt- und Prozesskettenwissen wird anschließend in ein CSP überführt. Dabei ist der Grundgedanke, das CSP als Graph aufzufassen, bei dem die geometrischen Transformationen der Fertigungsstufen sowie die Fertigungsrestriktionen in Form von Constraints als Kanten und die Produkt-, Prozess- und Ressourcenperspektiven als Knoten formuliert sind. Innerhalb des CSP werden die einzelnen Fertigungsprozesse in Prozesscontainer (eine Menge aus Variablen, Domänen und Constraints) abgebildet, in denen eine Abstraktion der Fähigkeiten des jeweiligen Prozesses, z. B. ressourcenbedingte Fertigungsrestriktionen, erreichbare Prozessfenster und vorhandene Werkzeuge, abgelegt sind. Die Verkettung der Prozesscontainer wird durch die Fertigungsstufen als Verbindungsglied erreicht. Die Fertigungsstufen stellen sowohl die Eingangsgrößen eines Einzelprozesses als auch die Ausgangsgröße des vorangegangenen Prozesscontainers dar. Im CSP können die Fertigungsstufen merkmalsbasiert über die Variablen explizit mit spezifischen Geometriedomänen als Produktperspektive formalisiert und später mittels eines CAD-Systems in eine geometrische Bauteilgestalt übersetzt werden. Die Fertigungshilfsmittel schränken maßgeblich die Prozessfähigkeit und damit verbunden die Transformation der Fertigungsstufen ein. Sie können ebenfalls merkmalsbasiert als Ressourcendomäne formalisiert werden. Zudem können auch limitierende Prozessparameter, wie eine maximale Durchschweißdicke oder Presskraft, als auch materialbezogene Eigenschaften, z. B. Streckgrenze, als Variablen mit prozesseinschränkenden Domänen im CSP formalisiert werden. Damit lässt sich ebenfalls die Prozessperspektive beschreiben. Die Modellierung der geometrischen Transformation der Fertigungsstufen entlang der Prozesskette erfolgt innerhalb der Prozesscontainer über die Constraints des CSPs. Dabei werden die gestaltgebenden Merkmale der Fertigungsstufen aus der Geometriedomäne über explizite binäre Constraints oder Constraints höherer Ordnung miteinander verknüpft. Dies ermöglicht die explizite Modellierung der gesamten Prozesskette. Um die Konformität der Fertigungsstufen mit der Prozesskette (Herstellbarkeitsbewertung) zu untersuchen, werden die geometrieeinschränkenden Fertigungsrestriktionen ebenfalls als Constraints zwischen den Geometriedomänen formalisiert und dem CSP-Graphen hinzugeführt. Bei der Modellierung der Constraints werden im CSP Hard- und Soft-Constraints unterschieden. Hard-Constraints stellen die geometrischen Transformationen und physikalischen oder prozessbedingten Restriktionen dar, welche nicht verletzt werden dürfen. Damit legen die Hard-Constraints feste Grenzen für den herstellbaren Lösungsraum für eine Fertigteilgeometrie als Menge aller möglichen Fertigungsstufenkonfigurationen fest. Dagegen stellen Soft-Constraints Zielanforderungen dar, mit denen dieser Lösungsraum zusätzlich eingeschränkt werden kann. An dieser Stelle wird die Ressourcenperspektive durch das Hinterlegen von ressourcenbedingten Fertigungsfähigkeiten von verfügbaren Fertigungshilfsmitteln eingebunden. Dabei werden zu den Soft-Constraints auch potentielle Kosten zu der bezogenen Fertigungsressource hinterlegt, die bei einer Neubeschaffung oder Anpassung entstehen. Dies ermöglicht später eine kostenorientierte Anpassung des Fertigungsprozesses, um eine Herstellbarkeit einer Fertigteilgeometrie zu erreichen.

Das Bild 3 zeigt die Modellierung für den Prozesscontainer eines Reibschweißprozesses zur Herstellung eines Multimaterial-Halbzeugs. Die Modellierung des CSPs kann durch drei Schritte erfolgen: (1) Parametrierung der Fertigungsstufen sowie Fertigungshilfsmittel und Anlegen von Produkt- und Ressourcendomänen als Variablen; (2) Formulierung der geometrischen Transformationen der Fertigungsstufen sowie prozessbedingten Einschränkungen als Hard-Constraints; (3) Einbindung von ressourcenbedingten Geometrierestriktionen als Soft-Constraints und hinterlegen von Kosten für das jeweilige Fertigungshilfsmittel. Die Schwierigkeit bei der Modellierung der Constraints ist das wechselwirkende Verhalten der Constraints zueinander. Daher ist wichtig die Wechselwirkungen zwischen den Constraints genau zu verstehen und zu berücksichtigen.

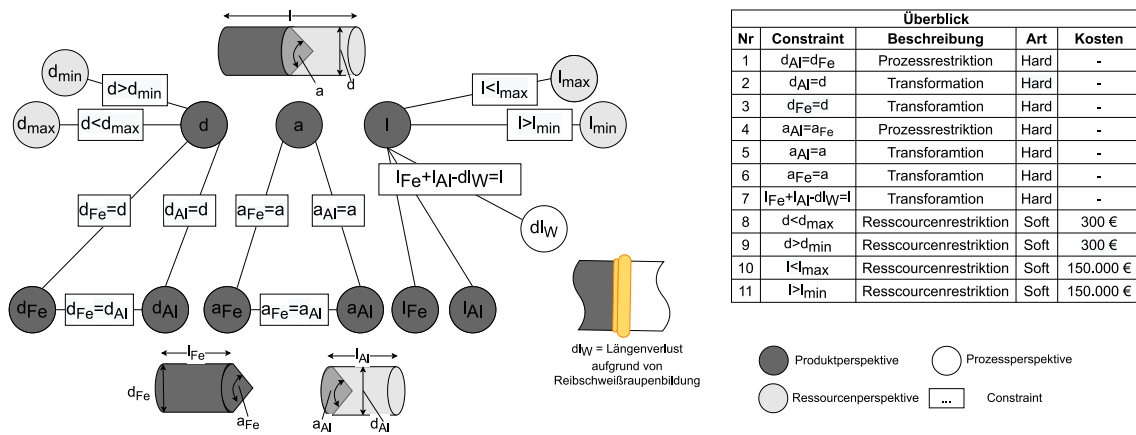


Bild 3: Modellierung des Prozesscontainers zum Reibschweißprozess

Das vollständige Constraint-Netzwerk der Prozesskette im Anwendungsbeispiel ist in Bild 4 dargestellt.

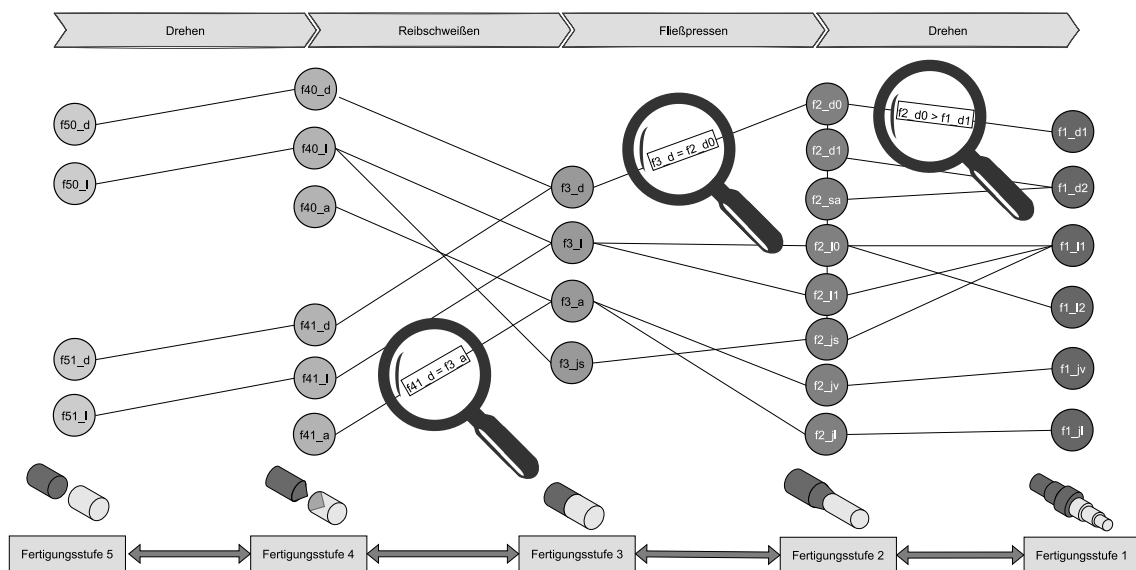


Bild 4: Constraint Netzwerk einer Tailored Forming Prozesskette

3.2 Implementierung und Inferenzstrategie des Fertigungsstufenmodells

Ist das Produkt- und Fertigungswissen formalisiert, kann der Lösungsprozess des CSPs als Inferenzmaschine verwendet werden, um Fertigungsstufen abzuleiten, mögliche Fertigungskonflikte aufzudecken und zu lösen. Wird mindestens eine gültige Parameterkonfiguration für alle Fertigungsstufen gefunden, entspricht diese einer Konformität der Fertigteilgeometrie mit der Prozesskette. Dies wird anschließend gemeinsam mit den Geometriemodellen der Fertigungsstufen zurückgemeldet. Kann keine valide Lösung gefunden werden, spezifiziert die Inferenzmaschine neue Fertigungshilfsmittel, welche die Herstellung ermöglichen. Allgemein folgt die Inferenz diesen Schritten: (1) Auslesen der Fertigteilgeometrie aus dem CAD als Eingabedaten; (2) Initialisieren des CSPs durch eine Modellierung der Prozesskette aus Variablen und Constraints; (3) Überprüfen der Herstellbarkeit der Fertigteilgeometrie mit Hilfe einer prozesskettenorientierten Restriktionsprüfung durch eine Lösungssuche im CSP; (4) Falls die Fertigteilgeometrie herstellbar ist, konfiguriert der Inferenzmechanismus die Geometriemodelle der Fertigungsstufen und gibt diese an die Konstruierenden aus; (5) Falls die Fertigteilgeometrie nicht herstellbar ist, spezifiziert der Inferenzmechanismus neue Fertigungshilfsmittel und startet die Lösungssuche aus Schritt 3 nochmal.

Die nachfolgende rechnergestützte Umsetzung des Fertigungsstufenmodells erfolgt mit einer Python-basierten Implementierung, da Python die Einbindung vieler externer Bibliotheken ermöglicht und eine Schnittstelle zu kommerziellen CAD Systemen besitzt.

Auslesen der Fertigteilgeometrie als Eingabedaten

Im ersten Schritt muss das Modell der zu untersuchenden Fertigteilgeometrie analysiert werden, da dieses die Inputdaten für das CSP liefert. Dafür wird die Fertigteilgeometrie in Autodesk Inventor modelliert und rechnergestützt umgesetzt, indem das hinterlegte Boundary-Representation Modell (B-Rep) ausgelesen wird. Hierbei werden relevante Merkmale wie Features und Abmessungen aus dem CAD Modell entnommen und dem CSP als Input zur Verfügung gestellt. Bezüglich des Anwendungsbeispiels werden an dieser Stelle die Materialien, die maximalen Durchmesser der beiden Werkstoff-Abschnitte sowie deren Längen ausgelesen.

Initialisierung des CSPs

Das CSP wird in Python über eine Klasse modelliert, welche die angelegten Variablen, Domänen und Constraints verwaltet und eine modulare Einbindung von einem oder mehreren CSP-Solvern ermöglicht. Das formale CSP-Modell der Prozesskette in Form von Variablen, Domänen und Constraints wird in der CSP-Klasse formalisiert. Zur Initialisierung wird eine CSP-Instanz erstellt und alle Variablen, Domänen und Constraints der Prozesskette inklusive der Fertigungsstufen und Fertigungshilfsmittel über eine Excel-Tabelle innerhalb der Instanz angelegt. Die Informationen der Fertigteilgeometrie werden anschließend durch das Einschränken von Domänen eingebunden. Dafür werden die Domänen der ausgelesenen Längen und Durchmesser innerhalb der finalen Fertigungsstufe auf einen, den ausgelesenen Wert, beschränkt. Damit ist das CSP vollständig definiert.

Lösungssuche

Die Modellierung des CSP-Solvers erfolgt über eine separate Objektklasse, in der unterschiedliche Algorithmen zur Constraint Propagation und Lösungssuche implementiert werden können. Durch eine Verknüpfung zum CSP-Objekt kann das formalisierte CSP durch die implementierten Algorithmen gelöst werden. Als Lösungsstrategie wird im Fertigungsstufenmodell ein kombinierter Ansatz verfolgt. Dabei werden zu Beginn die Domänen durch Constraint Propagation so weit eingeschränkt, bis eine Kantenkonsistenz erreicht wird. Dies wird über den AC-3 Algorithmus (Kumar 1992) umgesetzt, indem die Konsistenz der binären Constraints untersucht wird. Constraints höherer Ordnung werden dabei nicht berücksichtigt. Da das Netzwerk über keine unären Constraints verfügt, wurde auf eine Untersuchung der Knotenkonsistenz verzichtet. Nach dem Einschränken der Domänen folgt eine konkrete Lösungssuche durch einen rekursiv implementierten Backtracking Algorithmus.

Spezifikation benötigter Fertigungshilfsmittel

Ergibt die Lösungssuche keine befriedigende Parameterkombination, spezifiziert die Inferenzmaschine neue Fertigungshilfsmittel, welche die Fertigung des Fertigteils ermöglichen. Dafür erfolgt zuerst die Identifikation der verletzten Soft-Constraints (bzw. die einschränkenden Fertigungshilfsmittel), indem Soft-Constraints relaxiert werden. Dadurch werden während des Lösungsprozesses einzelne oder mehrere Soft-Constraints unterdrückt. Wird nach der Unterdrückung eine gültige Lösung gefunden, kann implizit darauf geschlossen werden, dass die unterdrückten Soft-Constraints bzw. die dahinter formalisierten Fertigungsressourcen den Lösungsraum so einschränken, dass eine Herstellbarkeit der untersuchten Fertigteilgeometrie nicht gegeben ist. Die notwendige Relaxationslogik wird ebenfalls über eine eigene Objektklasse implementiert. Die Constraint-Relaxations-Klasse identifiziert im ersten Schritt alle Soft Constraints und erstellt eine Liste von allen Kombinationen der unterdrückten Soft Constraints. Für jede dieser Kombination wird ein separater Lösungsprozess durch den CSP-Solver gestartet, um zu untersuchen, welche Kombination unterdrückter Soft Constraints bei der Lösungsfindung verletzt werden. Da die Lösungsprozesse der Kombinationen unabhängig voneinander laufen, wird die Rechenzeit durch die parallele Durchführung der Solver-Prozesse (Multi-Threading) reduziert. Die Lösungsfindung erfolgt durch die CSP-Solver-Klasse. Kann eine Lösung gefunden werden, sind die verletzten Soft Constraints identifiziert. Anschließend werden die zugehörigen ressourcenbezogenen Variablen ausgelesen, ihre Domäne geöffnet und über einen weiteren

Lösungsprozess die Domänen bestimmt, die die Herstellung des Fertigteils ermöglichen. Das bedeutet, dass die bezogenen Fertigungsressourcen von ihren Variablen getrennt werden und das jeweilige Merkmal der Fertigungsressource nun durch den CSP-Solver neu konfiguriert werden kann.

Dazu ein Beispiel, es wird zur Fertigung eines Bauteils eine Matrize benötigt, die über einen Durchmesser d_{Matrize} beschrieben werden kann. Von dieser Matrize sind zwei verfügbar, eine mit einem Durchmesser von 30 mm und die andere mit einem Durchmesser von 40 mm . Daraus folgt für d_{Matrize} eine Domäne mit $[30,40]$. Für die Fertigung des Bauteils wird jedoch ein Matrizendurchmesser $d_{\text{erforderlich}}$ von 20 mm benötigt. In diesem Fall wird der Soft-Constraint, in der d_{Matrize} mit dem Bauteil verknüpft ist, zum Beispiel $d_{\text{Matrize}} = d_{\text{erforderlich}}$, identifiziert und die Domäne von d_{Matrize} zu beispielsweise $[1, 2, \dots, 99, 100]$ erweitert. Mit dieser geöffneten Domäne wird der Lösungsprozess nochmal gestartet und der CSP-Solver wird d_{Matrize} auf 20 mm konfigurieren. Abschließend werden die erhaltenen Lösungen anhand ihrer Kosten bewertet und die kostengünstigste zurückgemeldet. Aus der Anpassung der Soft-Constraints resultiert, dass zur Herstellung der Fertigteilegeometrie neue oder angepasste Fertigungsressourcen benötigt werden.

Feedback

Schlussendlich werden die Informationen zur Herstellbarkeit sowie die Lösungen der Fertigungsstufen zurückgemeldet. Dafür werden die konfigurierten Merkmale der Fertigungsstufen an Autodesk Inventor übergeben. Dort werden die Geometriemodelle der Fertigungsstufen durch zuvor angelegte parametrische Geometrie-Templates erstellt und können als CAD Geometriemodelle exportiert werden. Gleiches gilt auch für gegebenenfalls neu konfigurierte Fertigungshilfsmittel. Für das Fertigungsstufenmodell wurde ein webbasiertes User Interface mit Hilfe der Python Bibliothek Flask erstellt, um es innerhalb des Entwicklungsprozesses nutzerfreundlich zur Verfügung zu stellen.

4 Diskussion

Mit der vorgestellten Modellierungsstrategie ist das Fertigungsstufenmodell ein Entscheidungsunterstützungssystem, um kollaborative Aktivitäten bei der Abstimmung zwischen Produktentwicklung und der Fertigungsplanung zu erleichtern. Das Fertigungsstufenmodell ist in der Lage, eine prozesskettenorientierte Restriktionsprüfung zur Herstellbarkeitsbewertung durchzuführen und automatisiert Fertigungsstufen sowie Fertigungshilfsmittel zu konfigurieren. Damit liefert das Fertigungsstufenmodell relevante Informationen über die Herstellbarkeit einer Fertigteilegeometrie und bietet einen besseren Startpunkt für die nachgelagerte Fertigungsplanung zur Prozessentwicklung. Abseits von der vorgestellten Prozesskette ist das Fertigungsstufenmodell auch auf andere Prozessketten anwendbar. In der vorgestellten Prozesskette wurden die involvierten Fertigungsprozesse über explizite Gleichungen abstrahiert. Dies hat zur Folge, dass das komplexe Verhalten der Fertigung nicht in der Tiefe abgebildet werden kann, wie es bsw. prozessspezifische Fertigungssimulationen können. Zu nennen sei das thermo-mechanische Materialverhalten, was zu Gefügeveränderungen im Werkstück führt. Dieser Umstand kann jedoch aufgelöst werden, indem reale oder simulative Fallbasen in die Prozesscontainer integriert werden. Der Einsatz der Fallbasen hat den Vorteil, dass die Rechenzeit reduziert werden kann, da Simulationen nicht parallel zum CSP ausgeführt werden müssen, sondern die Rechenzeit durch Parameterstudien vorgelagert wird. Die Erkenntnisse daraus können anschließend über einen fallbasierten Schlussfolgerungsalgorithmus zur Verfügung gestellt werden. Die Modellierung als CSP eröffnet dahingehend großes Potential für die weitere Forschung. So ist es möglich neben der Spezifikation von Fertigungshilfsmitteln auch die Auswahl von Prozessschritten einer Prozesskette zu konfigurieren. Auch eine automatisierte Anpassung einer Fertigteilegeometrie zur Erreichung einer Fertigungsgerechtigkeit ist im Fertigungsstufenmodell noch nicht möglich, aber für die weitere Forschung geplant. Das Fertigungsstufenmodell grenzt sich durch die Modellierung als CSP von bestehenden Ansätzen zum Design of Manufacturing und der rechnergestützten Fertigungsplanungsunterstützung ab. Ansätze, die sich auf ganze Prozessketten beziehen, konzentrieren sich dabei eher auf die Auslegung von Fertigungsprozessen, wie bsw. die Prozess- und Prozesskettenspezifikation (Rippel et al. 2016, Kulkarni

et al. 2014, Lee et al. 2022, Milisavljevic-Syed et al. 2019, Nellippallil et al. 2018) und berücksichtigen weniger die Perspektive der Produktentwicklung hinsichtlich der Gestaltung einer Fertigteilgeometrie und die Ausgabe resultierender Fertigungsstufen. Ansätze, welche die Herstellbarkeit einer Bauteilgestalt untersuchen, Fertigungskonflikte aufzeigen und teilweise Maßnahmen vorschlagen, beziehen sich in der Regel auf spezifische Fertigungsprozesse und deren Arbeitsfolgen und weniger auf heterogene Prozessketten (Albrecht and Anderl 2016, Li et al. 2018, Nguyen and Martin 2015). In dieser Hinsicht bietet das Fertigungsstufenmodell eine verallgemeinerte Modellierungsstrategie in der die Formalisierung und Verkettung von auch heterogenen Fertigungsverfahren mit unterschiedlicher Detailtiefe ermöglicht wird. Mit dem modellierten Funktionsumfang schließt das Fertigungsstufenmodell eine Forschungslücke und ergänzt bestehende Ansätze zum Design of Manufacturing und der rechnergestützten Fertigungsplanungsunterstützung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt eine Modellierungsstrategie für ein Fertigungsstufenmodell vor. Das Fertigungsstufenmodell kann die Herstellbarkeit eines Bauteils mit Hilfe einer holistischen Betrachtung der späteren Fertigungsprozesskette analysieren. Dabei werden die zur Herstellung notwendigen Fertigungsstufen und gegebenenfalls Maßnahmen automatisiert abgeleitet, um eine Fertigungsgerechtigkeit zu erreichen. Damit werden bereits in der Produktentwicklung wichtige prozesskettenbezogene Restriktionen identifiziert und bei der Gestaltung berücksichtigt. Zudem unterstützt das Fertigungsstufenmodell die Spezifikation der jeweiligen Fertigungshilfsmittel. Formalisiert wird das Fertigungsstufenmodell durch ein Constraint Satisfaction Problem, das über Variablen, Domänen und Constraints, eine Modellierung einer Fertigungsprozesskette ermöglicht. Dabei werden die Produktperspektive, Prozessperspektive und Ressourcenperspektive zur Beschreibung einer Prozesskette aufgegriffen. Die Inferenzfähigkeit des Fertigungsstufenmodells ist regelbasiert über Constraint Propagation und einem Backtracking Algorithmus umgesetzt. Eine Verknüpfung mit einem CAD-System ermöglicht zusätzlich die drei-dimensional Darstellung der abgeleiteten Fertigungsstufen und Fertigungshilfsmittel. Das Fertigungsstufenmodell bietet viele Anknüpfungspunkte für die weitere Forschung. Ein nächster Schritt ist es, neben den ressourcenseitigen Maßnahmen auch die Bauteilgestalt anhand der Restriktionsprüfung gezielt automatisiert anzupassen, um Fertigungskonflikte aufzulösen. Auch die Modellierungsgenauigkeit der Fertigungsprozesse kann durch die Einbindung von externen Ersatzmodellen, wie Fallbasen oder FE-Simulationen, bei komplexen Fertigungszusammenhängen erhöht werden. Um die Ressourcenbereitstellung weiter zu strukturieren, lassen sich auch externe Wissensbasen, wie fertigungsbezogene Ontologien (Lemaignan et al. 2006) einsetzen. Abschließend kann durch eine dynamische Generierung von Tailored-Forming-Prozessketten die statische Prozesskettenmodellierung im Fertigungsstufenmodell aufgelöst werden, um die Untersuchung und die Bewertung von unterschiedlichen Prozesskettenvarianten zu ermöglichen. Dabei bieten verteilte CSPs mit einem Multi-Agenten Ansatz eine interessante Forschungsgrundlage (Yokoo et al. 1998).

Danksagung

Die Ergebnisse dieser Publikation sind im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1153 „Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming“ innerhalb des Teilprojekts C2 entstanden. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle und organisatorische Unterstützung des Projektes (Projektnummer: 252662854).

Literatur

- Albrecht and Anderl 2016 ALBRECHT, Katharina; ANDERL, Reiner: Information Model for the Integration of Manufacturing Restrictions into the Algorithm Based Product Development Process. In: *Procedia CIRP* Bd. 50 (2016), S. 819–824
- Altun et al. 2022 ALTUN, Osman; KUTAY, Yıncan; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Procedure to create an automated design environment for functional assemblies. In: *Proceedings of the Design Society* Bd. 2 (2022), S. 553–562
- Anjum et al. 2012 ANJUM, Najam; HARDING, Jennifer A.; YOUNG, Robert I. M.; CASE, Keith: Manufacturability verification through feature-based ontological product models. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Bd. 226 (2012), Nr. 6, S. 1086–1098
- Ashby and Cebon 1993 ASHBY, M. F.; CEBON, D.: Materials selection in mechanical design. In: *Journal de Physique IV (Proceedings)* Bd. 03 (1993), Nr. C7, S. C7-1-C7-9
- Behrens et al. 2019 BEHRENS, Bernd Arno; BONHAGE, Martin; BOHR, Dieter; DURAN, Deniz: Simulation assisted process development for Tailored Forming. In: *Materials science forum* Bd. 949 (2019), S. 101–111
- Brailsford et al. 1999 BRAILSFORD, Sally C.; POTTS, Chris N.; SMITH, Barbara M.: Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications. In: *European journal of operational research* Bd. 119 (1999), Nr. 3, S. 557–581
- Brockmüller et al. 2020 BROCKMÖLLER, Tim; SIQUEIRA, Renan; GEMBARSKI, Paul C.; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Computer-aided engineering environment for designing tailored forming components. In: *Metals* Bd. 10 (2020), Nr. 12, S. 1589
- Denkena et al. 2019 DENKENA, Berend; BERGMANN, Benjamin; BREIDENSTEIN, Bernd; PRASANTHAN, Vannila; WITT, Matthias: Analysis of potentials to improve the machining of hybrid workpieces. In: *Production engineering* Bd. 13 (2019), Nr. 1, S. 11–19
- Ehrlenspiel et al. 2013 EHRENSPIEL, Klaus; KIEWERT, Alfons; LINDEMANN, Udo; MOERTL, Markus: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 8. Aufl. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2020
- Feldhusen et al. 2013 FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- Felfernig et al. 2014 FELFERNIG, Alexander; HOTZ, Lothar; BAGLEY, Claire; TIHONEN, Juha: Knowledge-Based Configuration From Research to Business Cases. In: *Knowledge-Based Configuration*. Boston: Morgan Kaufmann, 2014
- Gembarski 2022 GEMBARSKI, Paul Christoph: Joining constraint satisfaction problems and configurable CAD product models: A step-by-step implementation guide. In: *Algorithms* Bd. 15 (2022), Nr. 9, S. 318, DOI: 10.3390/a15090318
- Gouker et al. 2006 GOUKER, Regina M.; GUPTA, Satyandra K.; BRUCK, Hugh A.; HOLZSCHUH, Tobias: Manufacturing of multi-material compliant mechanisms using multi-material molding. In: *The international journal of advanced manufacturing technology* Bd. 30 (2006), Nr. 11–12, S. 1049–1075. DOI: 10.1007/s00170-005-0152-4
- Herrmann et al. 2021a HERRMANN, Kevin; BROCKMÖLLER, Tim; GEMBARSKI, Paul Christoph; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für mechanische Bauteile. In: *Proceedings of the of the Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021*, 20. May 2021, Stuttgart, Germany, 2021
- Herrmann et al. 2021b HERRMANN, Kevin; ALTUN, Osman; WOLNIAK, Phillip; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Methodischer Aufbau von Entwicklungsumgebungen nach dem Generative Parametric Design Approach. In: *DS 111: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X: The Design Society*, 2021, DOI: 10.35199/dfx2021.14
- Herrmann et al. 2022 HERRMANN, Kevin; BODE, Behrend; WURST, Johanna; GEMBARSKI, Paul Christoph; MOZGOVA, Iryna; Lachmayer, Roland: Quantification of the material-related

- environmental impact of topology-optimized multi-material components. In: DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022): The Design Society, 2022, DOI: 10.35199/dfx2022.01
- Kulkarni et al. 2014 KULKARNI, Nagesh; GUPTA, Rahul; KHAN, Danish; GAUTHAM, B. P.; ALLEN, Janet K.; PANCHAL, Jitesh; MISTREE, Farrokh: Inverse Design of Manufacturing Process Chains. Bd. 2B: 40th Design Automation Conference, 08 2014
- Kumar 1992 KUMAR, Vipin: Algorithms for Constraint-Satisfaction Problems: A Survey. In: AI Magazine Bd. 13 (1992), Nr. 1, S. 32. DOI: 10.1609/aimag.v13i1.976
- Lee et al. 2022 LEE, Chang-Ho; LEE, Dong-Hee; BAE, Young-Mok; CHOI, Seung-Hyun; KIM, Ki-Hun; KIM, Kwang-Jae: Approach to derive golden paths based on machine sequence patterns in multistage manufacturing process. In: Journal of intelligent manufacturing Bd. 33 (2022), Nr. 1, S. 167–183
- Lemaignan et al. 2006 LEMAIGNAN, S.; SIADAT, A.; Dantan, J-Y; SEMENENKO, A.: MASON: A proposal for an ontology of manufacturing domain. In: IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06): IEEE, 2006
- Li et al. 2018 LI, Zhi ; ZHOU, Xiaowu ; WANG, W. M. ; HUANG, George ; TIAN, Zonggui ; HUANG, Shaowei: An ontology-based product design framework for manufacturability verification and knowledge reuse. In: The international journal of advanced manufacturing technology Bd. 99 (2018), Nr. 9–12, S. 2121–2135.
- Martin 2005 MARTIN, Patrick: Some aspects of integrated product and manufacturing process. In: Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 215–226
- Milisavljevic-Syed et al. 2019 MILISAVLJEVIC-SYED, Jelena; COMMURI, Sesh; ALLEN, Janet K.; MISTREE, Farrokh: A method for the concurrent design and analysis of networked manufacturing systems. In: Engineering Optimization Bd. 51, Taylor & Francis (2019), Nr. 4, S. 699–717
- Nellippallil et al. 2018 NELLIPPALLIL, Anand Balu; RANGARAJ, Vignesh; GAUTHAM, B. P.; SINGH, Amarendra Kumar; ALLEN, Janet K.; MISTREE, Farrokh: An inverse, decision-based design method for integrated design exploration of materials, products, and manufacturing processes. In: Journal of mechanical design (New York, N.Y.: 1990) Bd. 140 (2018), Nr. 11, S. 111403
- Nguyen and Martin 2015 NGUYEN, Von Dim; MARTIN, Patrick: Product design-process selection-process planning integration based on modeling and simulation. In: The international journal of advanced manufacturing technology Bd. 77 (2015), Nr. 1–4, S. 187–201
- Özbayrak et al. 2004 ÖZBAYRAK, M.; AKGÜN, M.; TÜRKER, A. K.: Activity-based cost estimation in a push/pull advanced manufacturing system. In: International journal of production economics Bd. 87 (2004), Nr. 1, S. 49–65
- Prosser 1993 PROSSER, Patrick: Hybrid algorithms for the constraint satisfaction problem. In: Computational intelligence Bd. 9 (1993), Nr. 3, S. 268–299.
- Rippel et al. 2016 RIPPEL, Daniel; LÜTJEN, Michael; FREITAG, Michael: Geometrieorientierter Prozesskettenentwurf für die Mikrofertigung. In: Industrie Management Bd. 32 (04 2016), S. 50–53
- Sheveleva et al. 2023 SHEVELEVA, Tatyana; HERRMANN, Kevin; WAWER, Max Leo; KAHRA, Christoph; NÜRNBERGER, Florian; KOEPLER, Oliver; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Ontology-based documentation of quality assurance measures using the example of a visual inspection. In: Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 415–424, DOI: 10.1007/978-3-031-16281-7_39
- Yokoo et al. 1998 YOKOO, M.; DURFEE, E. H.; ISHIDA, T.; KUWABARA, K.: The distributed constraint satisfaction problem: formalization and algorithms. In: IEEE transactions on knowledge and data engineering Bd. 10 (1998), Nr. 5, S. 673–685

Potentiale von NLP-basierten Assistenzsystemen im Anforderungsmanagement

Potentials of NLP-based Assistance System in Requirements Management

Judith van Remmen, Dennis Horber, Jessica Pickel, Stefan Goetz, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen
van_remmen@mfk.fau.de
horber@mfk.fau.de
pickel@mfk.fau.de
goetz@mfk.fau.de
wartzack@mfk.fau.de

Abstract (deutsch): Die Anwendung und Integration bestehender NLP-basierter Ansätze in das Anforderungsmanagement wird derzeit durch verschiedene Faktoren, darunter mangelndes Expertenwissen und Know-how, gehemmt. Motiviert durch das Fehlen einer Entscheidungshilfe für die Konzeptionierung NLP-basierter Assistenzsysteme fokussiert der vorliegende Beitrag die Entwicklung einer systematischen Handlungsempfehlung zur Potentialidentifikation und Risikominimierung. Die Entscheidungshilfe berücksichtigt dabei die Unternehmensdefinition hinsichtlich der Art des Unternehmens, dessen Produkttypologie und Referenzsysteme. Sie dient dazu, potentiell kritische Anforderungen zu identifizieren und daraus Voraussetzungen für die Umsetzung des NLP-unterstützten Soll-Prozesses abzuleiten. Die qualitative Anforderungserfüllung kann dabei als Indikator für das Potential oder Risiko in der Entscheidungsfindung genutzt werden. Diesbezüglich können bereits Herausforderungen für die eigene Implementierung des konzeptionierten Assistenzsystems oder die Beauftragung eines Softwarezulieferers abgeleitet und klar kommuniziert werden. Das entwickelte Konzept wird anhand eines akademischen Beispiels kritisch diskutiert.

Keywords (deutsch):

Natural Language Processing, Anforderungsmanagement, Digital Engineering

Abstract (english): The application and integration of existing NLP-based approaches in requirements engineering is currently limited by various factors, including the lack of expertise and know-how. Motivated by the lack of a decision support for the conceptual design of NLP-based assistance systems, this paper focuses on the development of a systematic workflow for identifying potentials and minimising risks. The decision support takes the classification of a company regarding its type, product typology and product reference systems into account. It is used to identify potentially critical requirements and to assess the applicability of the desired NLP-support. The qualitative fulfillment of requirements can be used as an indicator for the potential or risk in the decision-making process. Furthermore, challenges for the own implementation of the assistance system or the commissioning of a software supplier can already be derived and clearly communicated. The developed concept is critically discussed using an academic example.

Keywords (english):

Natural Language Processing, Requirements Engineering, Digital Engineering

1 Einleitung und Motivation

Der kontemporäre Trend Richtung steigender Produktkomplexität und zunehmenden Qualitäts- sowie Funktionsansprüchen setzt einen systematischen Entwicklungsprozess voraus, weswegen entwicklungsmethodische Vorgehensweisen, wie das Systems Engineering (SE) nach ISO/IEC/IEEE 15288 (2015), zunehmend an Bedeutung gewinnen. Daran angrenzende Schlüsseltechnologien wie das Model-based Systems Engineering (MBSE) liefern die Grundlage für die Modellierung verschiedener Facetten des Systems, beispielsweise des Systemverhaltens mit Aktivitätsdiagrammen oder von Anforderungen an ein System, z. B. über User Stories sowie Anforderungs- oder Use-Case-Diagramme (Weilkiens 2014). Im Kontext des Anforderungsmanagements und des Systementwurfs fokussieren Unternehmen unabhängig ihrer Größe und Branche den Einsatz von SE zur Definition und Dokumentation von Systemanforderungen in den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung (Dumitrescu et al. 2021). Mithilfe von Modellierungssprachen, wie z. B. der SysML, wird es ermöglicht, diese Anforderungen in einem standardisierten Format zu beschreiben und die dadurch modellierten Diagramme disziplinübergreifend als Kommunikationsgrundlage zu verwenden (Weilkiens 2014).

Aufgrund der zunehmenden Zahl an Anforderungen – bedingt durch die eingangs adressierte Komplexitätssteigerung und Zunahme der Stakeholder-Ansprüche – steigt die Bedeutung von Anforderungsmanagementprozessen. Erschwerende Faktoren in diesem Kontext sind beispielsweise unklare oder mehrdeutige Anforderungsdefinitionen, insbesondere begründet durch deren natürlichsprachliche Formulierung (Krisch 2017). Damit geht eine erhöhte Fehleranfälligkeit durch z. B. Fehlinterpretationen oder Unvollständigkeit sowie ein damit verbundenes Risiko von Kosten- und Aufwandssteigerungen einher (Fritz 2021). Wie Studien von Adam et al. (2013) und FIR e.V. (2021) zeigen, findet die Formulierung in natürlicher Sprache dennoch mehrheitlich Anwendung. In etwa 71 % der Unternehmen liegen diese in semi-formalisierter (z. B. über Use Cases), natürlicher Sprache vor. Wohingegen in 59 % der befragten Organisationen natürliche Sprache ohne jegliche Strukturierungsvorlagen Verwendung findet. Die damit einhergehenden Probleme motivieren eine zunehmende Computerunterstützung und Automatisierung im Anforderungsmanagement (FIR e.V. 2021). Um diese Unterstützung und Automatisierung zu ermöglichen, ist es notwendig Computer zu befähigen, natürliche Sprache zu „verstehen“. Zur Verarbeitung von natürlicher Sprache wird daher künstliche Intelligenz (KI) in Form von Natural Language Processing (NLP) angewandt. In Bezug auf dessen Anwendung z. B. im Anforderungsmanagement zeigen Studien, dass sich Unternehmen – insbesondere KMU – vor allem Prozessverbesserungen, Kosten- und Zeiteinsparungen und Qualitäts- sowie Nutzensteigerungen erhoffen (Reder 2021; FIR e.V. 2021). Nach Reder (2021) geben Unternehmen unabhängig ihrer Größe fehlendes Fachpersonal, unzureichende Programmierkenntnisse und Mangel an Know-how als größte Hindernisse bei der Anwendung von Machine Learning an. Toolhersteller hingegen heben vor allem die unzureichende Datenqualität hervor (FIR e.V. 2021). Bezugnehmend auf das Anforderungsmanagement zeigen Gausemeier et al. (2013) in einer Studie, dass die Ausgangssituation zwischen einzelnen Unternehmen sehr unterschiedlich ist. So ist in KMU oftmals kein Standard im Anforderungsmanagement etabliert, wodurch z.B. die Qualitätssicherung von Anforderungen erschwert wird. Die Herausforderung besteht somit oftmals darin, die Vollständigkeit und Einheitlichkeit der Anforderungen zu garantieren. Im Gegensatz dazu nutzen große Unternehmen mit komplexen Produkten bereits dedizierte Software-Werkzeuge des Anforderungsmanagements. Die Herausforderung bei Großunternehmen liegt daher vermehrt in der Wiederverwendung, Nachverfolgbarkeit und Konsistenzerhaltung der Anforderungsspezifikationen. Dalpiaz et al. (2018) identifizieren dahingehend zukünftige Forschungsfelder im Bereich der Unterstützung des Anforderungsmanagements mittels NLP. Dabei wird neben dem Bewusstsein über die Anforderungsmanagementprozesse und dem Überblick über die NLP-Technologien auch die Sensibilisierung der Industrie als wichtiger Forschungsbereich genannt. Oftmals fehlt in der Industrie das notwendige Fachwissen zum Einsatz von NLP-Werkzeugen im Anforderungsmanagement, insbesondere im Hinblick auf die notwendigen Voraussetzungen, die Unternehmen erfüllen müssen,

um NLP-Technologien einsetzen zu können. Dabei sollen NLP-Technologien nicht die Aufgaben des Anforderungsmanagementprozesses ersetzen, sondern unterstützen. Im Rahmen einer solchen Human-in-the-Loop Anwendung muss dahingehend der menschliche und der maschinelle Bereich klar definiert werden. (Dalpiaz et al. 2018) Die genannten Hemmnisse, unterschiedliche Voraussetzungen der Unternehmen und die Zukunftspotentiale von NLP bedingen die Notwendigkeit, das Bewusstsein unternehmensspezifischer Limitationen zu schärfen, um somit den Zusammenhang zwischen der Voraussetzungserfüllung für den Einsatz von NLP und den offenliegenden Potentialen für Unternehmen abzuleiten. Ziel ist es, dass Limitationen bereits frühzeitig berücksichtigt werden, um Risiken von Projektfehlschlägen zu vermeiden und Potentiale zu identifizieren.

2 Stand der Technik

Bezugnehmend zum entwicklungsmethodischen Vorgehen im SE, dessen Prozess in Normen wie der ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) festgehalten ist, werden die Bedarfe und Zielsetzungen an das System aller Stakeholder als Grundlage für die Ableitung und Definition der Anforderungen sowie letztendlich für deren Modellierung verwendet. Diese Ableitungsbeziehungen können in den Phasen der Verifikation und Validierung zur Prüfung der erfolgreichen Umsetzung von Funktionen verwendet werden (Horber et al. 2021). Durch den direkten Einfluss der Anforderungen in der Systemmodellierung ist jedoch beispielsweise die Sicherstellung einer ausreichenden Qualität der zumeist natürlichsprachlich formulierten Anforderungstexte notwendig. Kamata und Tamai (2007) stellen fest, dass eine hohe Qualität der Anforderungen einen Beitrag zum Erfolg eines Produktentwicklungsprojekts liefert. Die Verarbeitung von Anforderungen mittels NLP ist daher ein probates Mittel zur Verbesserung der Anforderungsmanagementaktivitäten (Sonbol et al. 2022; Zhao et al. 2021; FIR e.V. 2021). NLP wird dabei verwendet, um Sätze auf lexikalischer, syntaktischer und semantischer Ebene zu verarbeiten (Russell und Norvig 2021). In diesem Kontext existieren vielfältige wissenschaftliche Ansätze, welche zum Teil bereits in kommerziellen Werkzeugen des Anforderungsmanagements (z. B. IBM Doors) integriert sind. Limitiert werden NLP-Verfahren jedoch z. B. durch die Notwendigkeit einer hinreichenden Datenqualität und -quantität für das Training KI-basierter Ansätze.

Im Anforderungsmanagements adressiert der Einsatz von NLP unterschiedliche Aufgaben und Schritte des Prozesses. Zhao et al. (2021) verweisen hierbei auf die Erkennung linguistischer Fehler in Anforderungsdokumenten, die Extraktion wesentlicher Konzepte, die Anforderungsklassifikation, die Identifikation von Modellierungskonzepten, die Detektion von Zusammenhängen für die Rückverfolgbarkeit und das Abrufen von Anforderungen aus bestehenden Datenbanken. Diese Aufgaben adressieren eine oder mehrere Phasen im Anforderungsmanagementprozess, wie z. B. die Anforderungsanalyse, die Qualitätsbewertung, die Modellierung, die Anforderungsableitung oder deren Dokumentation (Sonbol et al. 2022). Innerhalb dieser Aufgaben werden verschiedene NLP-Techniken angewandt, z. B. zur Vorverarbeitung von Texten durch part-of-speech tagging für die Identifikation von Stoppwörtern und deren Entfernung oder der named-entity recognition zur Erkennung bestehender Begrifflichkeiten, wie z. B. der Fahrer (Actor) in einem Use Case (Zhao et al. 2021). Unter Verwendung von NLP können beispielsweise Qualitätsverbesserungen von Anforderungsdokumenten (Krisch 2017) mithilfe von computerlinguistischen Systemen erzielt werden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Fritz (2021), welcher die Qualitätsverbesserung über eine automatische Vervollständigung von Anforderungen anhand der Einhaltung von Satzschablonen fokussiert. Zudem werden im Rahmen dieses Ansatzes auch Koreferenzen geprüft und identifiziert, um z. B. stets das System „PKW“ eindeutig benennen zu können und dieses mit den Kontextelementen „es“ und „Auto“ zu verknüpfen (Fritz 2021). Daneben bestehen Ansätze zur Erkennung allgemeiner Abhängigkeiten zwischen Anforderungen, wie Gräßler et al. (2022) mit einem transformer-basierten NLP-Ansatz zeigen. Hiermit können Auswirkungen von Anforderungsänderungen über Beziehungen wie „required“ analysiert werden. Zichler und Helke (2017) verwenden hingegen einen Ontologie-basierten Ansatz zur Relationsprüfung, dessen Vorteil in der Integration der gesamten Prozesskette in die Ontologie liegt, z. B. für den Austausch von Daten über PDF und XML.

3 Forschungsproblem und Forschungsziel

Wie der derzeitige Stand der Technik zeigt, existieren viele NLP-basierte Insellösungen (Sonbol et al. 2022; Zhao et al. 2021) mit ihren individuellen Voraussetzungen an die IT-Infrastruktur und Prozesslandschaft im Unternehmen. Fehlende Kenntnisse über die vorliegenden Herausforderungen erschweren deren Implementierung. Für die durchgängige Unterstützung des Anforderungsmanagements wird im Kontext dieses Beitrages die Verwendung eines einzelnen NLP-Ansatzes sowie die Kombination aus mehreren Ansätzen als Assistenzsystem verstanden. In bisherigen Forschungsarbeiten wird insbesondere die Kombination mehrerer Ansätze nicht thematisiert, welches die Konzeptionierung eines Assistenzsystems erschwert. In digitalen Prozessketten können darüber hinaus Methoden ohne NLP-Bezug für ein Assistenzsystem notwendig sein, beispielsweise für den Im- oder Export von Daten. Die Einschätzung zur Voraussetzungserfüllung für die Umsetzung durch Unternehmen erfordert daher eine zeit- und kostenaufwendige Einarbeitung sowie Expertenwissen. Abgeleitet aus den Hindernissen zur Anwendung NLP-basierter Ansätze im Anforderungsmanagement (Reder 2021) ist die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Voraussetzungserfüllung für den Einsatz von NLP und den offenliegenden Potentialen für Unternehmen bislang eingeschränkt. Das zunehmende Bestreben zur Computerunterstützung im Anforderungsmanagement durch NLP-basierte Methoden und das Fehlen einer geeigneten Methode motiviert daher die Zielsetzung des vorliegenden Beitrages, welche eine systematische Handlungsempfehlung zur Potentialabschätzung und Risikominimierung durch Unternehmen bei der Konzeptionierung eines NLP-basierten Assistenzsystems fokussiert. Nachfolgend wird daher das hierfür entwickelte Konzept in Abschnitt 4 vorgestellt. Dessen exemplarische Anwendung an einem akademischen Beispiel in Abschnitt 4.4 liefert dabei die Grundlage für eine kritische Diskussion und das Aufzeigen dessen Limitationen (Abschnitt 5). Abschließend wird der Beitrag zusammengefasst und ein Ausblick auf künftige Forschungsarbeiten aufgezeigt (Abschnitt 6).

4 Konzept zur Potentialabschätzung NLP-basierter Assistenzsysteme

Der entwickelte Prozessablauf in **Bild 1** bildet die Grundlage für die systematische Handlungsempfehlung. Damit verbunden ist die Befähigung von Unternehmen zur Einschätzung der Umsetzbarkeit eines konzeptionierten Assistenzsystems für die NLP-basierte Unterstützung des Anforderungsmanagements. Beginnend mit einer Kategorisierung des Unternehmens ist der Ablauf anschließend in drei wesentliche Phasen gegliedert. Diese Phasen werden nachfolgend in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 detailliert.

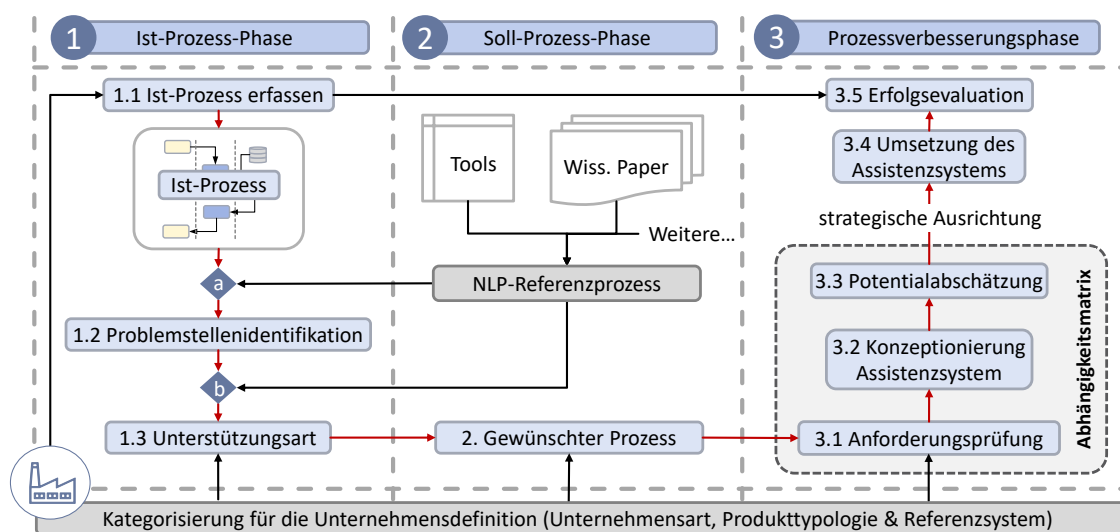


Bild 1: Prozessablauf des Konzepts (rote Pfeile) und verwendete Informationsquellen (schwarze Pfeile)

Zunächst erfolgt die Kategorisierung des Unternehmens (**Bild 1**, unten). Diese fokussiert die grobe Einteilung anhand dreier Dimensionen und ist eine initiale Grundlage für die spätere Potentialabschätzung. Die Kategorisierung trägt dazu bei, das Bewusstsein hinsichtlich potentieller Herausforderungen bei der Umsetzung eines Assistenzsystems zu schärfen. Diese können beispielsweise aus datenbezogenen Voraussetzungen, wie z. B. der notwendigen Datenqualität oder personellen Ressourcen, resultieren, welche in unterschiedlichen **Unternehmensarten** auftreten können. Hierzu werden KMU von Großunternehmen unterschieden. Daneben unterscheidet die **Produkttypologie** das zu entwickelnde Produkt und betrachtet basierend auf Homburg (2017) Gebrauchsgüter, das Zuliefergeschäft und das Produktgeschäft. Gebrauchsgüter umfassen dabei Konsumprodukte, welche über verschiedene Vertriebskanäle an Endkunden vertrieben werden, wie beispielsweise elektrische Werkzeuge. Produkte werden in der Unterscheidung in diesem Beitrag daher nicht aus der Kundenperspektive beauftragt, sondern für einen Marktbedarf entwickelt. Demgegenüber fokussiert das Zuliefergeschäft Produkte aus der Beziehung von beauftragenden und liefernden Unternehmen, wie beispielsweise aus der OEM-Supplier-Lieferkette. Ein Produkt wird dabei lediglich nach einem gesonderten Auftrag eines beauftragenden Unternehmens an das Zulieferunternehmen entwickelt. Das Produktgeschäft umfasst hingegen alle Produkte, Anlagen und Systeme, welche basierend auf einem Marktbedarf entwickelt, aber individuell auf Kundenwünsche angepasst werden können, beispielsweise die Entwicklung einer Werkzeugmaschine. Die Involvierung des Kunden und die damit verbundene Individualisierungsleistung grenzt das Produktgeschäft von den Produkten des Typs Gebrauchsgüter ab. Diese Unterscheidung beschreibt nicht unmittelbar die Gesamtheit des Produktportfolios eines Unternehmens, sondern vielmehr das einzelne Produkt und die damit verbundenen Entwicklungsprozesse. Demnach können Unternehmen Produkte aus mehreren Kategorien der Typologie entwickeln. Dieser Umstand erlaubt auch die Berücksichtigung etwaiger **Referenzsysteme**, wie Vorgängerprodukte, welche die Entwicklung beeinflussen können. So besteht die Möglichkeit zur Verwendung bestehender Daten, um beispielsweise NLP-Ansätze in Verbindung mit Machine Learning einsetzen zu können. Dies ist wiederum erschwert, sofern lediglich ein Benchmark auf dem Markt existiert, welcher zwar eine Ableitung von ähnlichen Anforderungen erlaubt, aber keine explizite Datengrundlage liefert. Insbesondere das Fehlen eines solchen Produktes auf dem Markt verstärkt diesen Umstand, obgleich artverwandte Referenzprodukte ein Startpunkt für die Entwicklung sein können (Albers et al. 2020). Zusammengefasst liefert die Kategorisierung im Hinblick auf die **Unternehmensart**, die **Produkttypologie** und das **Referenzsystem** eine initiale Definition des Unternehmens, welche nach der Ist-Prozess-Phase (vgl. Abschnitt 4.1) für die Beschreibung des produktindividuellen Anforderungsmanagementprozesses notwendig ist.

4.1 Ist-Prozess-Phase (1)

Nach Abschluss der Unternehmensdefinition werden die Randbedingungen für die Erfassung des derzeitigen Ist-Standes des Anforderungsmanagementprozesses definiert (**Bild 1: 1.1 Ist-Prozess erfassen**). Durch die Produktfokussierung werden die Einflüsse eines umfassenden Produktportfolios und etwaiger variabler Unterschiede in Entwicklungsprozessen reduziert. Für die Prozessfassung und -beschreibung liefert die Anforderungsmanagementliteratur, wie Rupp (2021), eine Vielzahl an geeigneten Methoden und hilfreichen Tipps. Empfehlenswert ist dabei die Unterscheidung zwischen den Anforderungsmanagement-Aufgaben Wissen ermitteln, Anforderungen herleiten, vermitteln und verwalten, siehe **Tabelle 1**. Als Ergebnis daraus kann der derzeitige Ist-Prozess mit potentiellen Referenzprozessen verglichen werden, um damit verborgene Problemstellen im bisherigen Prozess zu identifizieren oder unbekannte Verbesserungspotentiale offenzulegen (**Bild 1: 1.2 Problemstellenidentifikation**). Diese Referenzprozesse können aus Anwendungsfällen von bereits im Markt bestehenden Softwarelösungen, wissenschaftlichen Beiträgen oder Best-Practices aus der Industrie resultieren. In **Tabelle 1** sind potentielle NLP-basierte Methoden aus der Wissenschaft zur Unterstützung der jeweiligen Aufgaben des Anforderungsmanagements aufgeführt und zugeordnet. Daneben listen systematische Rechercharbeiten wie Sonbol et al. (2022) oder Zhao et al. (2021) den aktuellen Stand der Technik hierzu auf, die zur Erweiterung der Tabelle dienen können. Neben den

dargestellten NLP-Bausteinen existieren auch allgemeine Bausteine, wie beispielsweise *Anforderungen natürlichsprachlich formulieren* (Rupp 2021), welche aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit in der tabellarischen Darstellung nicht aufgeführt sind.

Tabelle 1: NLP-Bausteine und exemplarische Ansätze für verschiedene Aufgaben im Anforderungsmanagement

Aufgaben im Anforderungsmanagementprozess, basierend auf Rupp (2021)	NLP-Bausteine	Exemplarische Ansätze
Wissen ermitteln	Extraktion von Anforderungen	Zichler und Helke (2017)
	Generierung von User Stories aus Kundenfeedback	Guo und Singh (2020)
Anforderungen herleiten	Qualitätsprüfung und -verbesserung	Krisch (2017)
	Relationsprüfung	Gräßler et al. (2022)
	Automatisierte Ableitung von Anforderungen aus Use Cases	Meziane et al. (2008)
Anforderungen vermitteln	Automatisierte Modellierung von Verhaltensdiagrammen	Maatuk und Abdelnabi (2021)
	Automatisierte Use Case-Modellierung aus User Stories	Gilson et al. (2020)
Anforderungen verwalten	Anforderungsklassifizierung	Horber et al. (2020)
	Ableitung von implizitem Wissen aus Anforderungssätzen	Goetz et al. (2021)

Diese systematische Auflistung dient zur initialen Schärfung des Bewusstseins über die Existenz NLP-basierter Ansätze sowie deren Einsatz, auch ohne eine umfassende vorhergehende Einarbeitung. Die Formalisierung der Ansätze bietet dabei zukünftig das Potential für eine weitere Reduktion der notwendigen Vorkenntnisse. Anwendung findet diese Auflistung anschließend auch bei der Identifikation potentieller Nutzungsszenarien NLP-basierter Ansätze im derzeitigen Ist-Prozess (**Bild 1: 1.3 Unterstützungsart**). Diese Szenarien können neben dem Vorhandensein konkreter Problemstellen (z. B. widersprüchliche Anforderungstexte) im derzeitigen Prozess auch aus einer angestrebten Prozessverbesserung (z. B. Reduktion zeitaufwendiger Routinetätigkeiten) resultieren. Bei der Unterstützungsart sind daneben auch alle relevanten Stakeholder im Prozess zu definieren und insbesondere solche, welche bei der Nutzung des späteren Assistenzsystems involviert sind.

4.2 Soll-Prozess-Phase (2)

Basierend auf dem erfassten Ist-Prozess, den potentiellen Ansätzen und der definierten Unterstützungsart ist im daran anschließenden Schritt der angestrebte Prozess zu beschreiben (**Bild 1: 2. Gewünschter Prozess**). Der Fokus liegt hier auf einer formalen Beschreibung des unterstützten Prozesses mittels eines durchgängigen Assistenzsystems und den vorhandenen Softwarelösungen für das Anforderungsmanagement im Unternehmen, ohne bereits Einschränkungen hinsichtlich der möglichen Ansätze zu definieren. Die Formalisierung der Prozessbeschreibung erfolgt durch die Nutzung der zuvor identifizierten allgemeinen und NLP-fokussierten Bausteine und deren Verortung im Soll-Prozess (vgl. Beispiele in **Bild 2**). Die Verknüpfung der Bausteine erfolgt über In- und Outputs, welche für die Aneinanderreihung unterschiedlicher Ansätze zur Kompatibilitätsprüfung verwendet werden können. Daneben sind weitere Schnittstellen, beispielsweise zu verwendeter Software und damit verbundenen Datenformaten möglich. Ebenso ist die Berücksichtigung von Interaktionschnittstellen über grafische Benutzeroberflächen (GUI) denkbar, siehe auch Beispiel in **Bild 2a**) nach Horber et al. (2020). Das Konzept verfolgt die Nutzung durch Produktentwickelnde, welche die von Stakeholdern erfassten Ziele in Anforderungen überführen und diese mittels einer GUI

natürlichsprachlich formulieren. Anschließend werden diese klassifiziert und das Ergebnis wird den Produktentwickelnden ausgegeben. Bei zufriedenstellender Klassifikation wird die jeweilige Anforderung in eine Datenbank geschrieben. Unterschiede zwischen der Vielzahl an Ansätzen zeigt z. B. ein Vergleich zu Krisch (2017), welcher die NLP-basierte Qualitätsprüfung fokussiert (**Bild 2b**). Hierbei wird das Anforderungsset statt dem Verfassen in einer GUI aus bestehenden Dateien importiert und anschließend in einer Anforderungsdatenbank gespeichert.

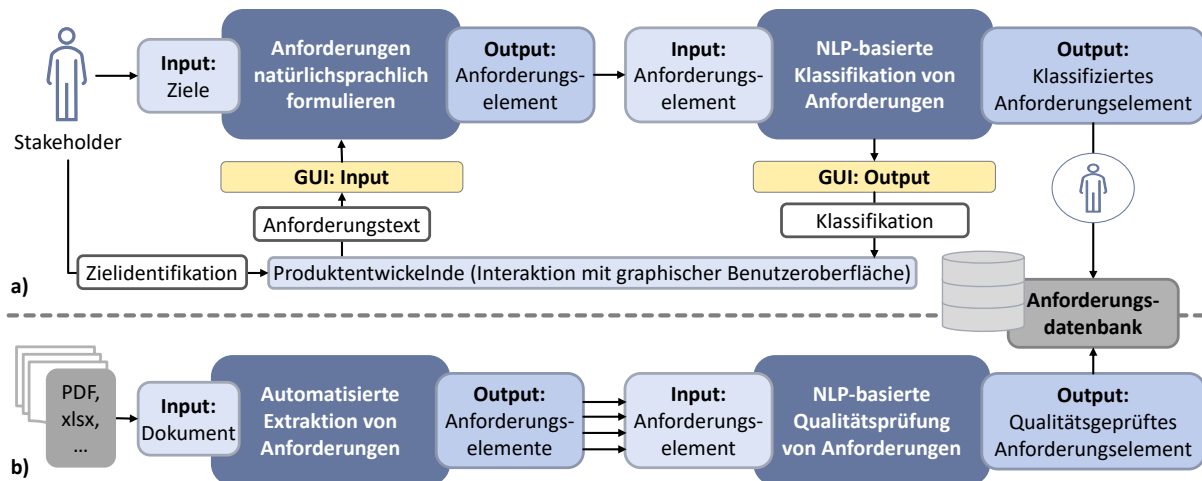


Bild 2: Assistenzsysteme zur NLP-basierten Anforderungsklassifikation (a, basierend auf Horber et al. (2020)) und zur automatisierten Extraktion sowie NLP-basierten Qualitätsprüfung (b, basierend auf Krisch (2017))

4.3 Prozessverbesserungsphase (3)

Im Anschluss an die Beschreibung des formalen Soll-Prozesses folgt die Prozessverbesserungsphase. Hierbei werden die zuvor generierten Ergebnisse, wie die Kategorisierung und die Prozessdefinition, verwendet, um diese in eine Entscheidungshilfe und Potentialabschätzung für die Umsetzung eines Assistenzsystems im Unternehmen zu überführen. Der allgemeine Ablauf ist in **Bild 3** visualisiert. Die rot markierten Zellen sind hierbei relevant für das spätere akademische Beispiel in Abschnitt 4.4.

Grundlage liefert demnach insbesondere die Kategorisierung des Unternehmens aus den vorhergehenden Schritten (**Bild 3** (1)), woraus potentiell kritische Anforderungen Unternehmensspezifisch identifiziert werden (**Bild 3** (2)); respektive **Bild 1: 3.1 Anforderungsprüfung**. Hierzu dient die in **Bild 3** (oben) dargestellte Tabelle, welche die Kategorisierung und diese Anforderungen in Beziehung setzt. Unternehmen können mithilfe einer Selbsteinschätzung (rechte Spalte, rote Kreuze) die potentiell kritischen Anforderungen identifizieren und zur Unterstützung je Kategorie aus der Unternehmensdefinition auf mögliche Vorschläge (Zelleneintrag (X)) zurückgreifen. Diese sind jedoch nicht allgemeingültig und daher im Einzelfall zu prüfen. Insgesamt sieht das Konzept derzeit Anforderungen hinsichtlich der Datenqualität, -quantität und -verfügbarkeit vor, welche insbesondere für datengetriebene Ansätze, wie beispielsweise das Training eines Klassifikationsalgorithmus, notwendig sind. Daneben ist die IT-Infrastruktur zur Integration in der bestehenden Software- sowie Hardwarelandschaft von Bedeutung. Neben diesen Anforderungen hinsichtlich der Umsetzung eines potentiellen Assistenzsystems sind die personellen und finanziellen Ressourcen limitierende Faktoren, welche frühzeitig in der Entscheidungsfindung in Betracht gezogen werden müssen.

Die identifizierten Anforderungen, welche zuvor als potentiell kritisch eingestuft wurden, werden für den nachfolgenden Schritt in eine Abhängigkeitsmatrix übertragen und in Bezug zu den zur Verfügung stehenden NLP-basierten Bausteinen (**Bild 3** (3)) gesetzt. Anschließend wird diese Matrix für den in **Bild 1** dargestellten Prozessschritt **3.2 Konzeptionierung Assistenzsystem** verwendet. Das Vorgehen ist orientiert am morphologischen Kasten, welcher nach Homburg (2017) ein systematisch-analytisches Vorgehen zur Kombination verschiedener Merkmale in eine Produktidee ist. Im vorliegenden Fall ist damit die Zusammenstellung mehrerer allgemeiner sowie NLP-basierter Bausteine (respektive

Merkmale im morphologischen Kasten) zu einem Assistenzsystem (Produktidee) zu verstehen. Das vorgestellte Konzept unterliegt der Einschränkung, dass im Falle der unzufriedenstellenden Erfüllung einer Anforderung durch das Unternehmen ein Baustein aus dieser Prozesskette (Merkmal) ausgelassen werden kann, um das Risiko einer unbrauchbaren Implementierung (Produktidee) frühzeitig zu vermeiden. In der Abhängigkeitsmatrix werden alle relevanten Ansätze für den gewünschten Soll-Prozess aus wissenschaftlichen Beiträgen sowie der kommerziell erhältlichen Softwarelösungen gesammelt. Diese wurden bereits im Vorfeld hinsichtlich der genannten Anforderungen eingeschätzt, um die potentiell kritischen Anforderungen mit den Voraussetzungen der Ansätze zu verknüpfen. Dabei kann keine, eine grundlegende (+) oder eine starke Abhängigkeit (++) eines jeden Ansatzes in Bezug auf die jeweilige Anforderung bestehen. Beispielsweise sind ML-basierte Methoden gegenüber regelbasierten stark abhängig von der Datenqualität und -quantität.

Potentiell kritische Anforderungen	Identifikation basierend auf der Unternehmensdefinition								Individuelle Einschätzung
	Unternehmensart		Produkttypologie			Referenzsystem			
	KMU	Großunternehmen	Gebrauchsgüter	Zulieferergeschäft	Produktgeschäft	Vorgängerprodukt	Benchmarkprodukt	keins	
Datenqualität	(X)	(X)	(X)		(X)	(X)	(X)	(X)	X
Datenquantität	(X)		(X)		(X)		(X)	(X)	X
Datenverfügbarkeit	(X)		(X)		(X)		(X)	(X)	
IT-Infrastruktur	(X)		(X)	(X)	(X)	-	-	-	
Finanzielle Ressourcen	(X)		(X)	(X)	(X)	-	-	-	X
Personelle Ressourcen	(X)		(X)	(X)	(X)	-	-	-	
...									

Anforderungen	Ansätze wissenschaftlicher Paper			Kommerzielle Software		
	Fritz (2021)	Horber et al. (2020)	...	z.B. Tool zur Qualitätsprüfung	z.B. Tool zur Klassifizierung	...
	Qualitätsprüfung und -verbesserung	Anforderungsklassifizierung	...	Qualitätsprüfung und -verbesserung	Anforderungsklassifizierung	...
Datenqualität		+			++	
Datenquantität	+				++	
Datenverfügbarkeit	+	+		+	+	
IT-Infrastruktur				+	+	
Finanzielle Ressourcen	+	+		++	++	
Personelle Ressourcen	+	+				
...						
Herausforderungen/Einschränkungen	Keine Office-basierte Softwarelösung	Qualitativ gut formuliertes Anforderungsset		Anforderungsim-/ -export über ReqIF	Trainings- und Testdatenset notwendig	

Bild 3: Vorgehen für die methodisch gestützte Entscheidungsunterstützung zur Konzeptionierung eines Assistenzsystems mit beispielhaften Einordnungen (Legende: (X): potentiell kritische Anforderung, rotes X: individuelle Einschätzung durch das Unternehmen, +: Abhängigkeit von Anforderung, ++: starke Abhängigkeit von Anforderung)

Die Potentialabschätzung (**Bild 1: 3.3 Potentialabschätzung**) erfolgt dabei qualitativ unter Berücksichtigung der potentiell kritischen Anforderungen und der Einschätzung der Abhängigkeit von der jeweiligen Anforderung je Ansatz. Insbesondere die starke Abhängigkeit von einer kritischen Anforderung reduziert das gewonnene Potential eines Ansatzes für die Berücksichtigung in einem Assistenzsystem. Die Durchführung dieser Prüfung für die gesamte Abhängigkeitsmatrix erlaubt demnach eine Entscheidungshilfe zur Abschätzung des Potentials oder des Risikos für die Umsetzung eines Ansatzes (**Bild 3 (4)**). Darüber hinaus kann hierfür bei jedem Ansatz ein individueller Vermerk hinsichtlich seiner Herausforderungen oder Einschränkungen für die Implementierung berücksichtigt werden, welcher beispielsweise dazu dient, relevante Voraussetzungen für die Umsetzung des Assistenzsystems zu definieren. Kann zum Beispiel bei der Verwendung einer bestehenden Softwarelösung für die Dokumentation von Anforderungen kein Plugin geschrieben werden, so muss der Datenaustausch zu angrenzenden Prozessschritten über die vorhandenen Schnittstellen erfolgen, wie beispielsweise über das standardisierte Format ReqIF.

Die abgeleitete Entscheidungshilfe kann nachfolgend in die Entscheidung über den Einsatz einzelner oder mehrerer NLP-basierter Ansätze für die Prozessverbesserung des Anforderungsmanagements oder die Beseitigung bestehender Problemstellen verwendet werden. Das Potential resultiert dabei neben dem Risiko auch aus der Anwendungshäufigkeit des Tools und den erwarteten Aufwandseinsparungen, welche zu einer Kostenreduktion führen. Diese Faktoren müssen für die Entscheidung abgeschätzt oder aus vergleichbaren Projekten ermittelt werden. Dabei sind auch die strategische Ausrichtung des Unternehmens sowie dessen Risikobereitschaft und die finanziellen Rahmenbedingungen von Bedeutung.

Fällt die Entscheidung für die Umsetzung des konzeptionellen Assistenzsystems (**Bild 1: 3.4 Umsetzung des Assistenzsystems**), so besteht durch die Anwendung des in diesem Beitrag vorgestellten Konzepts bereits ein detailliertes Verständnis des Ist- sowie des gewünschten Soll-Prozesses und dessen Unterstützung durch ein Assistenzsystem inklusive der relevanten Stakeholder. Daneben besteht ein Bewusstsein für potentielle Randbedingungen und Herausforderungen hinsichtlich der Implementierung des Assistenzsystems, welche im Falle einer Eigenentwicklung des Systems berücksichtigt oder bei Beauftragung eines externen Softwaredienstleisters kommuniziert werden können. Langfristig ist die Umsetzung in Bezug auf den initialen Ist-Prozess zu bewerten, um eine quantitative Erfolgsmessung durchzuführen (**Bild 1: 3.5 Erfolgsevaluation**).

4.4 Exemplarische Anwendung des Konzepts

Zur Verdeutlichung und initialen Anwendungsevaluation der Potentialabschätzung dient nachfolgend das akademische Beispiel eines auf den Prüfstandbau spezialisierten KMU, welches eine Verbesserung des unternehmensinternen Anforderungsmanagementprozesses fokussiert (**Bild 4**). Die Identifikation der potentiell kritischen Anforderungen auf Basis der aus den Vorschlägen abgeleiteten Selbsteinschätzung (**Bild 3 rechts**) liefert das Ergebnis, dass insbesondere die Datenqualität und -quantität zu Herausforderungen bei der Umsetzung NLP-basierter Ansätze führen können. Ebenso schließen die eingeschränkten finanziellen Ressourcen einen Kauf einer kostenintensiven Softwarelösung aus (**Bild 3 rot eingefärbte Zellen**). Beim klassischen Entwicklungsvorgehen mit Office-basierten Pflicht- und Lastenheften besteht zunächst noch wenig Potential für die Unterstützung durch NLP (**Bild 4 roter Graph**), da das Unternehmen begründet durch die **Produkttypologie** keine Nutzung von Use Cases sowie User Stories vorsieht. Das Potential wächst demnach im weiteren Entwicklungsprozess durch die Vervollständigung des initialen Anforderungssets (Lastenheft) und die damit verbundene Anforderungszahl an, da die Auswirkungen eines potentiellen Assistenzsystems somit bei jeder einzelnen Anforderung wirksam werden. Insofern ist insbesondere die Klassifikation von Anforderungen zur Verbesserung einer eindeutigen Formulierung (Horber et al. 2020) anwendbar. Durch die Voraussetzung von qualitativ hochwertig formulierten Anforderungen ist demnach auch eine automatische Qualitätsprüfung zur Vermeidung von unklaren Formulierungen oder Fehlern (Krisch 2017) empfehlenswert. Diese Annahme bestätigt sich beispielsweise durch erfolgreich abgeschlossene Forschungsprojekte im KMU-Umfeld (Fritz 2021).

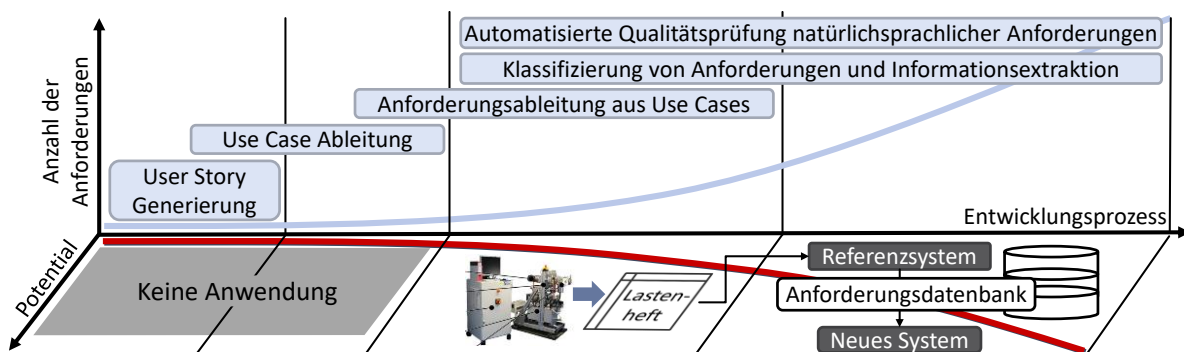


Bild 4: Umsetzungspotential von NLP-basierten Ansätzen am Beispiel eines exemplarischen KMU

5 Diskussion

Das im vorliegenden Beitrag vorgestellte Konzept zur Entwicklung einer Entscheidungshilfe für die Konzeptionierung eines NLP-basierten Assistenzsystems für das Anforderungsmanagement fokussiert das Ziel, Unternehmen eine Möglichkeit zur Potentialabschätzung für die Anwendung bestehender NLP-Ansätze aus Forschung und Industrie zu liefern. Die Anwendbarkeit wurde initial an einem exemplarischen Beispiel untersucht. Daraus abgeleitet zeigt sich, dass sich das Bewusstsein für die Herausforderung NLP-basierter Ansätze mittels eines systematischen Vorgehens in eine Entscheidungshilfe integrieren lässt. Das Konzept obliegt derzeit Limitationen, die vorrangig die Vollständigkeit der Ansätze und Softwarelösungen aus dem Stand der Technik betreffen. Hierzu können zukünftig weitere Ansätze aus systematischen Rechercharbeiten, wie beispielsweise von Sonbol et al. (2022) oder Zhao et al. (2021), integriert werden. Des Weiteren sind in diesem Zuge die Ansätze und Softwarelösungen auf deren Kompatibilität zu prüfen, wonach ein Potential zur Integration einer Kompatibilitätsmatrix – analog des House of Quality – in die bestehende Abhängigkeitsmatrix verbleibt. In der industriellen Praxis sind weitere und spezifischere Anforderungen für die Auswahl der Ansätze relevant, deren Erfassung mittels geeigneter Studien erfolgen kann. Dies betrifft daneben auch die Kategorisierung hinsichtlich Unternehmensdefinition und Produkttypologie, deren Anpassungsbedarf im Rahmen einer empirischen Studie in Verbindung mit Unternehmen erfasst und in das vorgestellte Konzept integriert werden können. Um den vorgestellten Ansatz unternehmensübergreifend nutzen zu können, muss zudem ein gemeinsamer Standard zur Formalisierung der NLP-Methoden gefunden werden (vgl. Bild 2)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration bestehender NLP-basierter Ansätze in das Anforderungsmanagement wird derzeit durch Faktoren, wie z. B. das Fehlen von Expertenwissen und Know-how, gehemmt. Motiviert durch den Mangel an einer Entscheidungshilfe für die systematische Konzeptionierung NLP-basierter Assistenzsysteme fokussiert der vorliegende Beitrag die Befähigung zur Potentialabschätzung für die Umsetzung eines NLP-basierten Assistenzsystems. Die im Rahmen des Beitrags entwickelte Entscheidungshilfe berücksichtigt die Unternehmensdefinition hinsichtlich der Unternehmensart, dessen Produkttypologie und etwaiger Referenzsysteme. Sie dient dazu, kritische Anforderungen zu identifizieren und diese anhand eines Soll-Prozesses und den enthaltenen NLP-Bausteinen einzuschätzen. Das Potential resultiert aus der qualitativen Einschätzung der Voraussetzungserfüllung. Des Weiteren können Herausforderungen für die Implementierung des konzeptionierten Assistenzsystems oder die Beauftragung eines Softwarezulieferers klar kommuniziert werden.

Das vorgestellte Konzept enthält unter anderem einen initialen Ansatz zur einheitlichen Formalisierung NLP-bezogener Ansätze und angrenzender Methoden. Diese fokussieren die Beschreibung von Bausteinen mit spezifischen In- und Outputs sowie grafischen Benutzeroberflächen. Zur Verbesserung der Anwendbarkeit der vorgestellten Entscheidungshilfe kann beispielsweise das Potential genutzt werden, bereits generierte Daten durchgängig in einem System zu speichern und so für zukünftige Entwicklungen zu nutzen. Hierzu eignen sich beispielsweise Ontologie-basierte Repräsentationen, nicht zuletzt auch durch die Möglichkeit zur Inferierung von neuem Wissen. So können z. B. Anforderungsrelationen bereits nach der Anforderungsspezifikation kontinuierlich abgeleitet werden (vgl. Zichler und Helke (2017)). Daneben bieten Ontologien die Möglichkeit zur Verknüpfung domänenspezifischer und universeller Ontologie-Ansätze zur Erweiterung des formalisierten Wissens in Unternehmen. Ein Anwendungsszenario hierfür ist die Wiederverwendung einer Ontologie im Anforderungsmanagement mit einer allgemeinen Produktentwicklungsontologie, um z. B. Wissen und Daten aus dem Anforderungsmanagement in Entscheidungssituationen zu integrieren. Zukünftig ist die Entwicklung eines detaillierten Bewertungsverfahrens zur objektivierten und quantifizierten Bewertung der Potentiale notwendig. Eine umfassende Evaluation des Konzepts in der Industrie sowie die Erweiterung um zusätzliche NLP-Methoden verbleiben zusammenfassend als nächste Zielsetzung.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung und Unterstützung des Projektes WA 2913/33-2 „PrOntoDecide“.

Literatur

- Adam et al. (2013) ADAM, Sebastian; WÜNCH, Christian; KOCH, Matthias: *Ergebnisbericht „RE-Kompass 2013“*. IESE-Report. Kaiserslautern: Fraunhofer IESE, 2013.
- Albers et al. (2020) ALBERS, Albert; RAPP, Simon; FAHL, Joshua; HIRSCHTER, Tobias; REVEI, Sven; SCHULZ, Micha; STÜRMLINGER, Tobias; SPADINGER, Markus: *Proposing a Generalized Description of Variations in Different Types of Systems by the Model of PGE – Product Generation Engineering*. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1 (2020)*, S. 2235–2244.
- Dalpiaz et al. (2018) DALPIAZ, Fabiano; FERRARI, Alessio; FRANCH, Xavier; PALOMARES, Cristina: *Natural Language Processing for Requirements Engineering: The Best Is Yet to Come*. In: *IEEE Software* 35 (2018), Nr. 5, S. 115–119.
- Dumitrescu et al. (2021) DUMITRESCU, Roman; ALBERS, Albert; RIEDEL, Oliver; STARK, Rainer; GAUSEMEIER, Jürgen: *Engineering in Deutschland: Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft, Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*. Paderborn: Fraunhofer IEM, 2021.
- FIR e.V. (2021) FIR E.V.: *Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur Sprachverarbeitung: Anwendung von Natural-Language-Processing in der Industrie*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2021.
- Fritz (2021) FRITZ, Simon: *Ein Assistenzsystem zur kontextsensitiven Unterstützung des anforderungsbasierten Wissensmanagements*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation 2021
- Gausemeier et al. (2013) GAUSEMEIER, Jürgen; DUMITRESCU, Roman; STEFFEN, Daniel; CZAJA, Anja; WIEDERKEHR, Olga; TSCHIRNER, Christian: *Studie Systems Engineering in der industriellen Praxis*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, 2013.
- Gilson et al. (2020) GILSON, Fabian; GALSTER, Matthias; GEORIS, François: *Generating Use Case Scenarios from User Stories*. In: *International Conference on Software and System Processes*. New York, USA: ACM, 2020, S. 31–40.
- Goetz et al. (2021) GOETZ, Stefan; HORBER, Dennis; SCHLEICH, Benjamin; WARTZACK, Sandro: *Simultaneous Definition of Key Characteristics in Order to Facilitate Robust Design in Early Product Development Stages*. In: Design Society (Hrsg.): *23rd International Conference on Engineering Design (ICED21)*, 2021, S. 2691–2700.
- Gräßler et al. (2022) GRÄBLER, Iris; OLEFF, Christian; HIEB, Michael; PREUß, Daniel: *Automated Requirement Dependency Analysis for Complex Technical Systems*. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 2 (2022)*, S. 1865–1874.
- Guo und Singh (2020) GUO, Hui; SINGH, Munindar P.: *Caspar: Extracting and Synthesizing User Stories of Problems from App Reviews*. In: *ICSE '20: 42nd International Conference on Software Engineering*. IEEE, 2020, S. 628–640.
- Homburg (2017) HOMBURG, Christian: *Marketingmanagement: Strategie - Instrumente - Umsetzung - Unternehmensführung*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler, 2017

- Horber et al. (2020) HORBER, Dennis; SCHLEICH, Benjamin; WARTZACK, Sandro: *Conceptual model for (semi-) automated derivation of evaluation criteria in requirements modelling*. In: *Design Society: DESIGN Conference 1* (2020), S. 937–946.
- Horber et al. (2021) HORBER, Dennis; WILKING, Fabian; SCHLEICH, Benjamin; WARTZACK, Sandro: Durchgängige Systemmodellierung - Integration von Zielen in technische Systemmodelle im Kontext des Anforderungsmanagements. In: BINZ, Hansgeorg; BERTSCHE, Bernd; SPATH, Dieter; ROTH, Daniel (Hrsg.): *6. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2021*, 2021, S. 163–174.
- ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) ISO/IEC/IEEE 15288: *Systems and software engineering: System life cycle processes*. 2015-05-15, 2015.
- Kamata und Tamai (2007) KAMATA, Mayumi Itakura; TAMAI, Tetsuo: How Does Requirements Quality Relate to Project Success or Failure? In: IEEE (Hrsg.): *15th IEEE International Requirements Engineering Conference*. Los Alamitos/USA: IEEE Computer Society, 2007, S. 69–78.
- Krisch (2017) KRISCH, Jennifer: *Sprachliche Kontrolle von Anforderungsdokumenten*. Hildesheim, Universität Hildesheim. Dissertation 2017
- Maatuk und Abdelnabi (2021) MAATUK, Abdelsalam M; ABDELNABI, Esra E: Generating UML Use Case and Activity Diagrams Using NLP Techniques and Heuristics Rules. In: LARA TORRALBO, Juan Alfonso (Hrsg.): *International Conference on Data Science, E-learning and Information Systems 2021*. New York, United States: Association for Computing Machinery, 2021, S. 271–277.
- Meziane et al. (2008) MEZIANE, Farid; ATHANASAKIS, Nikos; ANANIADOU, Sophia: *Generating Natural Language specifications from UML class diagrams*. In: *Requirements Engineering 13* (2008), Nr. 1, S. 1–18.
- Reder (2021) REDER, Bernd: *Studie Machine Learning 2021*. München: IDG Business Media GmbH, 2021.
- Rupp (2021) RUPP, Christine: *Requirements-Engineering und -Management: Das Handbuch für Anforderungen in jeder Situation*. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2021.
- Russell und Norvig (2021) RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter: *Artificial intelligence: A modern approach*. Fourth edition. Hoboken: Pearson, 2021
- Sonbol et al. (2022) SONBOL, Riad; REBDAWI, Ghaida; GHNEIM, Nada: *The Use of NLP-Based Text Representation Techniques to Support Requirement Engineering Tasks: A Systematic Mapping Review*. In: *IEEE Access 10* (2022), S. 62811–62830.
- Weilkiens (2014) WEILKIENS, Tim: *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur*. 3. Auflage. Sebastopol/USA: dpunkt-Verlag, 2014.
- Zhao et al. (2021) ZHAO, Liping; ALHOSHAN, Waad; FERRARI, Alessio; LETSHOLO, Keletso J.; AJAGBE, Muideen A.; CHIOASCA, Erol-Valeriu; BATISTA-NAVARRO, Riza T.: *Natural Language Processing (NLP) for Requirements Engineering: A Systematic Mapping Study*. In: *ACM Computing Surveys 54* (2021), Nr. 3, S. 1–41.
- Zichler und Helke (2017) ZICHLER, Konstantin; HELKE, Steffen: Ontologiebasierte Abhängigkeitsanalyse im Projektlastenheft. In: DENCKER, P.; KLENK, H.; KELLER, H. B.; PLÖDEREDER, E. (Hrsg.): *Automotive Safety & Security 2017: Sicherheit und Zuverlässigkeit für automobile Informationstechnik*. Bonn: Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, 2017, S. 121–134

Klassifizierung von Anwendungen der künstlichen Intelligenz in der Produktentwicklung

Classification of artificial intelligence applications in product development

Jonas Fastabend¹, Dr. Daniel Roth¹, Prof. Dr. Matthias Kreimeyer¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
jonas.fastabend@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Die zunehmende Digitalisierung und das steigende Datenvolumen in der Industrie fördern die Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz (KI) in der Produktentwicklung (PE). Derzeit existiert noch keine Übersicht über bereits vorhandene KI Anwendungen in der industriellen PE. In diesem Beitrag wird eine Sammlung bestehender KI-Anwendungen mit Bezug zu PE erzeugt. Aufbauend wird eine Klassifizierung dieser KI-Lösungen durchgeführt. Ziel ist es, Anwendungscluster für KI in der Produktentwicklung zu definieren, um Nutzer bei der Auswahl geeigneter KI-Anwendungen für die PE zu unterstützen. Auch sollen Forscher unterstützt werden, Forschungsansätze in Bezug auf KI in der PE mit praktischen Anwendungen vergleichen zu können. Eine praxisnahe Untersuchung wird gewährleistet, indem Zeitschriftenartikel, die sich mit KI in der PE im industriellen Kontext beschäftigen, als Grundlage für diese Arbeit verwendet werden. Die systematische Durchsicht dieser Artikel führte zur Identifizierung von 40 unabhängigen Anwendungen von KI in der PE. Basierend auf deren Eigenschaften konnten fünf Cluster von Anwendungstypen mit zwölf Aufgaben identifiziert werden, die diese KI-Lösungen in der PE erfüllen.

Keywords: Digital Engineering, Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Abstract (english): Increasing digitalization and data volumes in industry are fostering the possibilities of artificial intelligence (AI) in product development (PD). Currently, there is no overview of already existing AI applications in industrial PD. In this paper, a collection of existing AI applications related to PD is made and a classification of these AI solutions is performed. The goal is to define application clusters for AI in product development to assist users in selecting appropriate AI applications for PD. It also aims to help researchers to compare research approaches related to AI in PD with existing industrial applications. A practical investigation is ensured by using journal articles dealing with AI in PD in an industrial context as a basis for this work. Systematic review of these articles led to the identification of 40 independent applications of AI in PD. Based on their characteristics, it was possible to identify five clusters of application types with twelve tasks performed by these AI solutions in PD.

Keywords: Digital Engineering, Artificial Intelligence, Machine Learning, Knowledge Management in Product Development

1 Introduction and Motivation

During the last decade, the potential of artificial intelligence (AI) and especially machine learning (ML) applications in an industrial context increased (Krauß et al. 2019). Ongoing digitization and an exponential growth of available data through digitized processes combined with low cost computing power provide the basis for data intensive technologies like AI and ML (Reinhart et al. 2021). Furthermore, AI is becoming increasingly important in product development (PD) and supports various sub-processes in the development process, for example through recommendation systems in CAD design (Stark 2022). Further application examples from different development phases are the simplification of simulations or the modelling of requirements (Digital Engineering 2022a).

There are numerous scientific approaches and projects for the use of AI in PD in an academic context and also literature reviewing papers giving an overview about these approaches (Plappert et al. 2020). Studies with a practical focus primarily look at commercially relevant applications of AI with a broad scope across different lifecycle phases, but without a clear focus on PD. The AI landscape initiative of the German Ministry of Education and Research and the Ministry of Economics and Climate Protection provides an overview of AI projects in Germany in a broad range of domains (BMBF and BMWK 2019). The Start-up-Monitor from Applied AI provides a synopsis over German Start-ups related to AI (Applied AI 2022). A PD related approach with practical scope is the AI Marketplace project (AI-marketplace 2022). The aim is to set up a platform for AI solutions and data sets with regards to product development. Currently, however, only six AI solutions are present on the platform. In the academic literature, reviews and meta-reviews provide a holistic overview of AI in PD under certain constraints. Bernijazov et al. (2021) did a rough classification of AI solutions to product creation phases and Plappert et al. (2020) consider the topic with respect to knowledge-based engineering. In his work, Luo presents a mapping of different ML strategies to individual product development phases (Luo 2022).

Due to their focus on scientific work, those do not necessarily represent the industrial approaches for AI in PD (Cockburn et al. 2019). In a broad meta review on AI in product creation it was shown that only 6,74% of the case studies were based on an application that could be localized to an industrial standard in a real development project and an overview of such PD related AI solutions was identified as a research gap (Bernijazov 2021 et al.). This paper aims to close this gap with an investigation on industry related and mature AI solutions in PD. A categorized overview on existing AI solutions in PD will be provided. On this basis, a well justified interpretation of underlying patterns in PD related AI solutions should be given. Overall, it can be assumed that useful AI solutions in PD can be assigned to general pattern that sum up different use cases. These clusters could be identified by analysing the solution space of real-world AI solutions in PD leading to the following research question for the contribution:

What are the categories of practically applied AI solutions in PD?

In summary, the results are expected to assist users in selecting appropriate AI applications for PD. It will also help researchers to compare their research approaches related to AI in PD with practical applications.

2 Research Method

To identify patterns in the usage of PD related AI solutions in an industrial context, a collection of AI applications related to PD is first created. Subsequently, these AI applications are put into a standardized form based on classification criteria. Finally, the resulting tabular overview forms the basis for defining individual clusters for AI applications in PD. An overview of the underlying research methodology is given in Figure 1.

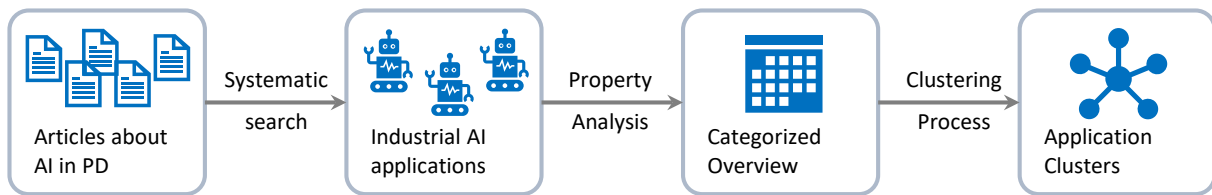


Figure 1: Cluster Definition Process

In a brief study in advance of this paper, various Internet sources were examined to determine whether suitable publications on market-ready applications of AI in PD could be found. In particular, such articles could be found in journals on machine design and product development. The articles describe isolated software solutions for PD processes and present a strong practical focus, due to the fact that they already provide a value in industrial PD processes. Therefore, these articles form the primary basis for the collection of AI applications. Relevant journal articles are identified and evaluated through a systematic search. First, suited magazines are identified. Decisive influencing factors for this step are the circulation of the journal and a focus on PD. Also, the investigation is limited to German magazines. The regular circulation of the journal should be at least 10.000 so that the study is limited to the most important journals. Table 1 provides an overview of the magazines identified. Relevant articles are detected by a keyword search (artificial intelligence, machine learning, neural network). Articles published before 2017 will not be considered. For the first filtering step, the headlines of the articles are analysed. Subsequently, abstracts and figures are analysed and remaining articles are read in full. Duplicates are identified, removed and a collection of independent AI applications is formed. The keyword search led to 4239 articles in total. After the headline-based filtering step, 304 articles remained. The analysis of abstracts and figures reduced this amount to 100. After reading the full texts and removing the duplicates, 40 AI applications were identified in total.

Table 1: Identified journals for systematic search

Journal	Circulation	PD related focus
Konstruktionspraxis Vogel	23.100 (Vogel 2023a)	Design methods, tools and machine components
Konstruktion	19.310 (VDI 2022)	Machine components and design tools
KEM	17.300 (Konradin 2022)	Machine components and design tools
Digital Engineering	11.000 (Fachzeitungen 2022)	Digital Engineering
MaschinenMarkt	39.000 (Vogel 2023b)	Late phases of PD and Production

The classification criteria are then defined in order to create the basis for clustering the AI applications. It must be considered that the information base about different AI applications is highly heterogeneous. No company has an interest in disclosing all the details of its AI solution. Some articles therefore remain relatively superficial, while others contain more detailed information, for example about the algorithms used. Due to this characteristic, a compromise has to be found for the classification criteria which, on the one hand, exploits the information content of the articles as far as possible and, on the other hand, does not allow speculation about the expression of individual criteria. Therefore, the criteria can only be formed a posteriori after reading the articles. Since the criteria assignment in turn requires the review of the articles, an iterative analysis process follows. A logical framework for defining the criteria arises from the focus of this paper on AI in PD. Both AI-related and PD-related criteria need to be formed iteratively to ensure a targeted focus when analysing AI applications. In addition, it is necessary to capture the added value of the AI application to enable an appropriate definition of application clusters. Based on the classified collection of AI applications, the clusters are formed. Crucial to this process are the similarities in the characteristics of individual AI applications. Since the clusters are formed to map the usage patterns of AI in PD, the added value offered by an AI application is weighted qualitatively more than the other criteria.

3 Results

A total of 40 AI applications with a value for industrial PD were identified through the systematic search. The assignment of articles to AI applications and vice versa is not injective. The results present some articles that describe several AI applications as well as AI applications that are mentioned in several articles. In some cases, different AI applications are integrated under the same name in the same software system. For example, Up2Parts' software includes CAD-based AI solutions for estimating manufacturing costs and identifying similar parts (MaschinenMarkt 2021b). Based on the 40 identified AI applications, the classification criteria are formed and the clusters are assigned.

3.1 Definition and Assignment of Classification Criteria

The classification criteria are formed inductively from the relevant articles to consider their heterogeneous information content. In order to be able to answer the research question with the help of the clusters, the dimensions AI, PD, and added value of AI applications must be represented by the criteria. An overview of the defined classification criteria is given in Table 2. The different models describing PD and corresponding PD norms have the task to define an overarching standard (VDI 2221 2021). Therefore, the widely used norms VDI 2221 and VDI 2206 are used to define classification criteria for PD (VDI 2206 2021, VDI 2221 2021). A time-based phase model is used according to these standards, consisting of phases for requirements, concept, geometric design, verification and further artefacts, like the generation of manufacturing models for example. Moreover, an additional category for side activities is used. VDI 2221 describes PD as an iterative problem-solving process (PSP) in which the current problem is captured by an analysis and the result is generated by a synthesis (VDI 2221 2021). Analysis and synthesis can therefore be used as a further classification criterion. If AI is used to obtain new knowledge about the problem, an analysis is performed. If AI is used to generate a new state of development, synthesis is performed in the context of this paper. Since not all AI applications can be classified by this, another category called translation is introduced. A translation is performed when a data model is transferred between different environments by AI. This happens for example in the translation of technical texts between different languages. An indicator for the assignment of AI applications is whether the amount of data from input to output decreases (analysis), increases (synthesis) or remains the same (translation). As there are usually no quantitative information available about the data size in the articles, this property is approximated qualitatively. Regarding AI as relevant subject area, the level of detail of the articles on data processing by AI is highly heterogeneous. Therefore, no overarching information base about used algorithms and learning strategies can be generated. This leads to a black-box description of AI applications with the classification criteria data-input and data-output. The expressions of these criteria were inductively formed from the articles and are listed in Table 2. The data types Text and CAD are self-explanatory. The Scan data type describes the data structures of spatially scanned objects, for example in the form of point clouds. In addition, concepts, such as active surfaces and guiding structures, as well as parameterized simulation models can be used as data input. Simulation results, such as cost estimates or CFD simulation results, can be generated as data output. Modelling elements, such as application commands for CAD modelling, can also be generated as output.

Table 2: Classification criteria for the clustering process

PSP type	PD Phase	Data-Input	Data-Output
Analysis (A)	Requirements	Concept	Model Element (ME)
Synthesis (S)	Concept	CAD	CAD
Translation (T)	Geometric	Simulation Model (SM)	Simulation Result (SR)
	Verification	Text	Text
	Further Artefacts	Scan	Scan
	Side Activity	Other	Other

Even if no information can be collected about the data processing algorithms used, the articles always describe clearly what value is accomplished by AI regarding PD problems and the related criteria Core Value (CV) provides a framework to capture this property. The expressions of this criteria are explained in the chapter on clusters, since the content description of the clusters is largely based on the CVs.

The distribution of classification criteria associated with the PD process is visualized in Figure 2. The criteria are plotted clockwise in the pie chart according to their order in Table 2. Regarding the problem-solving process (PSP) type, it is noticeable that more than half of the tasks support product development with an analysis task. The synthesis of data models for product development is supported in 15 applications. Translation of development models between different environments has a minor role and is implemented in four AI applications found. Examples are the translation of technical texts into other languages (MaschinenMarkt 2020b) or the voice control of CAD software (Konstruktionspraxis 2022a). As for the PD process phase, especially numerous AI applications are used in the late development phases of geometric design, verification, and further artefacts. This is consistent with the findings from other studies (Plappert et al. 2020). However, individual AI applications have already been implemented in the concept phase and requirements phase, such as AI-supported quality inspection of requirements according to the INCOSE standard (KEM 2019b).

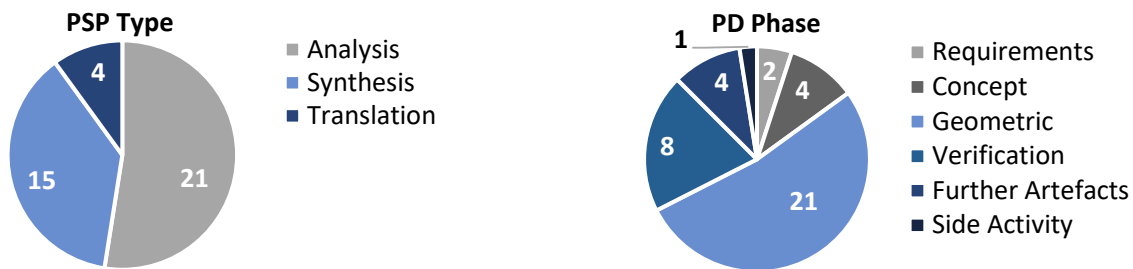


Figure 2: Classification criteria associated with the PD process

The primary focus of the AI applications on the late PD phases is also reflected in the data used. An overview of the applications' data input and output is shown in Figure 3. In particular, CAD models and simulation models form the basis for the use of AI in PD. Concept models, such as effective surfaces and load scenarios, are also used for AI-supported synthesis of CAD models. The generation of simulation results by AI is done in particular by analysing CAD data and processing simulation models. Based on all of these insights and the CVs of the AI applications, the clusters are formed.

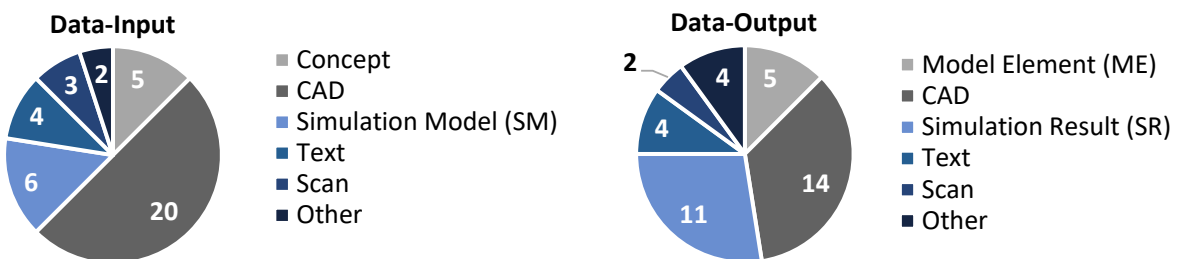


Figure 3: Classification criteria associated with the data flow of AI applications

3.2 Definition of clusters and allocation of AI applications

A total of five application clusters were defined on the basis of the surveyed classification criteria and the PD related value that the AI applications offer in practice. The resulting clusters are briefly explained below and the associated classification tables of the AI applications are shown. The first cluster is the human-machine interface cluster, which includes nine AI applications. Their purpose is to enable more efficient and intuitive human-machine communication. An overview is given in Table 3. The systems are primarily based on the processing of text and CAD data and provide comprehensive

support in the PD process. Output data are model elements and text. The Human-Machine Interface cluster is built up on two CVs. Recommender systems (RS) fulfil the purpose of making AI-based suggestions to the user for the further development of his engineering model. Those systems thus encapsulate the complexity of using IT tools and they are used as add-ons to common engineering tools such as CAD systems and requirements management systems. Translator systems (TS) translate a user's input into a format that can be processed by the machine. An example is the processing of natural language inputs into model elements for a CAD modelling process (Konstruktionspraxis 2022a).

Table 3: AI Applications of the Human-Machine Interface Cluster

Name	PSP	PD Phase	Input	Output	CV	Journal Article
Round and Chamfer Search	A	Geometric	CAD	ME	RS	(Konstruktionspraxis 2022a)
NX Command Prediction	A	Geometric	CAD	ME	RS	(KEM 2019a)
iMachining	A	Further Artefacts	CAD	ME	RS	(MaschinenMarkt 2021a)
Elise	A	Geometric	Concept	ME	RS	(Konstruktionspraxis 2022b)
Voice-Assistant	T	Geometric	Other	ME	TS	(Konstruktionspraxis 2022a)
Quality Monitor	S	Verification	CAD	Other	RS	(Digital Engineering 2022a)
Requirements Assistant	A	Requirements	Text	Text	TS	(KEM 2019b)
Quality Assistant	S	Requirements	Text	Text	RS	(KEM 2019b)
Insight Engine	A	Side Activity	Text	Text	RS	(Digital Engineering 2022b)

The purpose of the eleven identified AI applications from the Generative Engineering cluster is to synthesize engineering models with AI in a predefined and limited solution space. Associated applications and their properties can be found in Table 4. A characteristic for these applications is the synthesis as PSP type and a strong focus on CAD data in input and output. The main CV is Geometric Model Generation (GG). Data-Outputs from this CV are always CAD-Models. The CAD models can be optimized based on an existing CAD-Model or generated based on a concept model of load and effective surfaces. The Web-App Optimate for example uses AI to identify weak spots of sheet metal parts and generates an optimised CAD-Model regarding the manufacturing process (Konstruktionspraxis 2022c). Another CV is named Manufacturing Model Generation (MG) and includes one AI application which performs the generation of CAM-Code from CAD data.

Table 4: AI Applications of the Generative Engineering Cluster

Name	PSP	PD Phase	Input	Output	CV	Journal Article
NX Sketch	S	Concept	CAD	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2022a)
Blockify	S	Concept	CAD	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2018a)
Release V20	S	Geometric	CAD	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2020a)
Optimate	S	Geometric	CAD	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2022c)
M.OPT	S	Geometric	CAD	CAD	GG	(MaschinenMarkt 2018)
Autodesk Fusion 360	S	Geometric	Concept	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2022d)
PTC Generative Design	S	Geometric	Concept	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2020b)
NX Generative Engineering	S	Geometric	Concept	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2018b)
Elise	S	Geometric	Concept	CAD	GG	(Konstruktionspraxis 2022b)
Aurivus	S	Geometric	Scan	CAD	GG	(Konstruktion 2020)
Scale NC	S	Further Artefacts	CAD	Other	MG	(MaschinenMarkt 2020a)

The eight AI Applications from the CAD Analysis cluster perform an AI driven analysis of CAD-Data with aimed knowledge discovery about the given geometric specification. Mandatory for related applications is the analysis as PSP-type and CAD data as data input. AI applications are used in the geometric design phase and data outputs are simulation results or CAD data. Depending on the goal of the CAD analysis, three CVs belong to this cluster. The first CV sums up applications for an AI based cost estimation (CE) for manufacturing costs, like the milled parts calculating application Spanflug (MaschinenMarkt 2021b). The second CV "Manufacturability Analysis" (MA) is a feasibility analysis of

the manufacturing process, which is performed by three applications. In addition to a manufacturing analysis for sheet metal parts and additive components, there is also an application to investigate assembly processes (Konstruktionspraxis 2019). Further, AI is used to find similar geometries to a model in a CAD dataset. This last CV is called Similarity Analysis (SA) and associated AI applications assist to reuse already designed components for new constructions. Table 5 provides an overview.

Table 5: AI Applications of the CAD Analysis Cluster

Name	PSP	PD Phase	Input	Output	CV	Journal Article
Protiq	A	Geometric	CAD	SR	CE	(KEM 2021a)
Spanflug	A	Geometric	CAD	SR	CE	(MaschinenMarkt 2021b)
Up2Parts	A	Geometric	CAD	SR	CE	(MaschinenMarkt 2021c)
Neuro-CAD	A	Further Artefacts	CAD	SR	MA	(Konstruktionspraxis 2019)
Optimate	A	Geometric	CAD	SR	MA	(Konstruktionspraxis 2022c)
Protiq	A	Geometric	CAD	SR	MA	(Konstruktionspraxis 2021a)
Similarity Search	A	Geometric	CAD	CAD	SA	(KEM 2022)
Up2Parts	A	Geometric	CAD	CAD	SA	(MaschinenMarkt 2021b)

The Surrogate Systems (SS) cluster is built up on only one CV with the same name and contains six AI applications. These AI applications have been trained to perform computational processes in simulations more efficiently through heuristic estimation. Table 6 summarizes their characteristics. The AI applications from the Surrogate Systems cluster have consistent values for the classification criteria. They are used for analysis in the verification phase and they process simulation models to produce simulation results. For example, the small medium enterprise CFD Schuck uses an associated AI application, to shorten simulation times for the CFD analysis of cooling elements (Konstruktionspraxis 2021b). Only the application "AIMM" has different characteristics and processes test data to material models (KEM 2021b).

Table 6: AI Applications of the Surrogate System Cluster

Name	PSP	PD Phase	Input	Output	CV	Journal Article
Varimos	A	Verification	SM	SR	SS	(Konstruktionspraxis 2022e)
Neural Concept	A	Verification	SM	SR	SS	(Digital Engineering 2018)
Monolith	A	Verification	SM	SR	SS	(Konstruktionspraxis 2022f)
Engineering Data Processor	A	Verification	SM	SR	SS	(Konstruktionspraxis 2022g)
CFD Schuck	A	Verification	SM	SR	SS	(Konstruktionspraxis 2021b)
AIMM	A	Verification	SM	Other	SS	(KEM 2021b)

The fifth cluster "Other" captures the remaining six AI applications. The characteristics of the classification criteria are therefore different and are given in Table 7. Four CVs belong to this cluster. It includes an application for language translation (LT) with focus on technical documents and one application for variant selection (VS) in the concept phase. Two applications form the CV data completion (DC). These applications enhance scanned spatial models with missing geometries. The remaining applications build up the CV model translation (MT) and transfer CAD models to another environment by preparing them for simulations.

Table 7: AI Applications of the "Other" Cluster

Name	PSP	PD Phase	Input	Output	CV	Journal Article
OneMTPE	T	Further Artefacts	Text	Text	LT	(MaschinenMarkt 2020b)
Fast Concept Modeler	T	Concept	CAD	CAD	MT	(Digital Engineering 2021)
Renumics	T	Verification	CAD	CAD	MT	(Digital Engineering 2017)
Hearables 3D	S	Geometric	Scan	Scan	DC	(Konstruktionspraxis 2021c)
VConv-DAE	S	Geometric	Scan	Scan	DC	(KEM 2017)
E-Motor Selection	A	Concept	Other	Other	VS	(Konstruktionspraxis 2021d)

An overview over the 5 identified clusters and the associated core values is given in Figure 4. It summarizes the results of this paper.

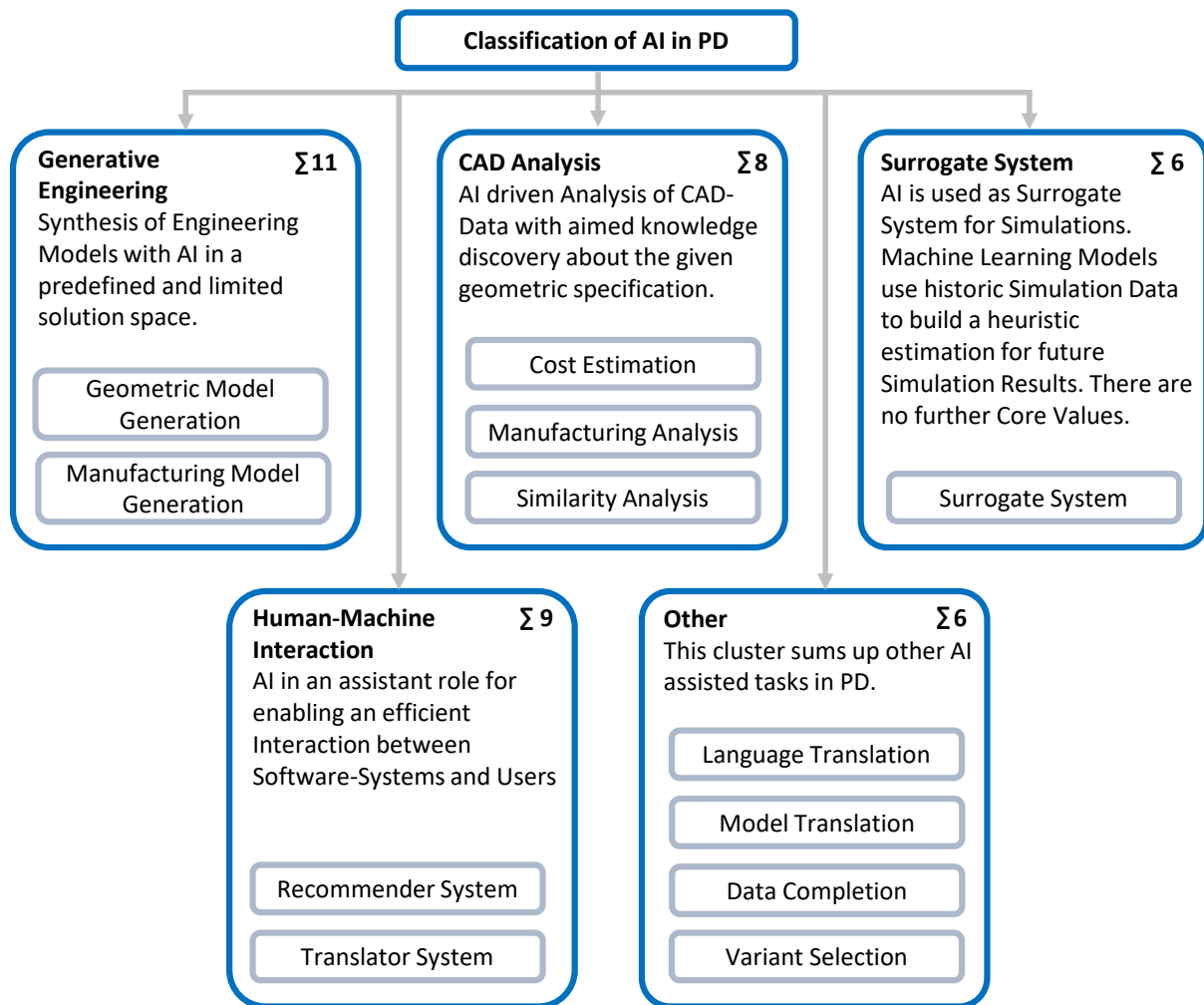


Figure 4: Identified Clusters and Core Values of PD related AI applications

4 Discussion

In the results chapter, five clusters and twelve core values were defined for AI in PD. Identification by classification criteria worked better for some clusters than for others. Applications from the Surrogate Systems and CAD Analysis clusters can be identified reliably based on their properties. The assignment of AI applications to the Generative Engineering cluster works well via a combination of the classification criteria and the CV which is achieved. Applications from the “Other” cluster are very diverse and therefore cannot be assigned based on properties. The AI applications of the Human-Machine Interaction cluster are also diverse. They are primarily classified on the basis of the CV that is generated. The product development-specific view of the Human-Machine Interaction cluster leads to different characteristics in the PSP-type and PD process categories. This could be related to the fact that human-machine interaction as an application cluster is very generic for different environments and similar applications can also be useful outside of product development processes. The remaining clusters are more limited to product development and specific PD process phases.

In addition, the demarcation of individual PD process phases is not always clear-cut. For example, the application “NX Sketch” supports CAD sketches that can be used for both geometric concepts and geometric designs (Konstruktionspraxis 2022a). Besides, the assignment of the correct PD process

phase is also not always clear for applications of the CAD Analysis cluster, since the analysis of a CAD model can also serve to verify the desired properties. The assignments were made on the basis of the use case that is most likely. For example, for AI applications that perform cost estimation based on CAD data, the use during geometric design was assumed, because CE is not a classical simulation task like finite-element-analysis or multi-body-simulation. The assignment of characteristics of other classification criteria is much clearer than the assignment of the PD process phase.

Also, the identified clusters are not completely isolated and partially blur into each other. An example of this phenomenon is the application Quality Monitor from the company Invenio (Digital Engineering 2022a). This AI application examines large assemblies on collisions. When a collision is detected, an image of the component and periphery is generated to make the localization process more intuitive for the user. Due to this main function, the application is assigned to the Human-Machine-Interface cluster, however, an assignment to the CAD Analysis or the Generative Engineering cluster is also plausible due to the fact, that the CAD Model is analysed and a picture of the component is generated. In addition, some applications of the CAD Analysis cluster have a similar approach to surrogate systems. Manufacturing costs and manufacturability are estimated from historical model data, as well as simulation models are estimated from historical model data for surrogate systems. The difference lies in the complexity of the estimated model. If the AI in applications from the Generative Engineering Cluster learns the optimization of a component in such a way that a conventional simulation such as FEM in topology optimization is substituted, there is also a similarity to surrogate systems. Unfortunately, the information on the functioning of the AI systems is usually too coarse in the articles examined to be able to carry out such investigations.

5 Conclusion and Outlook

Overall, the goal of the paper was achieved. Through a systematic review of journal articles on AI in PD, 40 mature AI systems were identified. Through classification criteria and a consideration of the achieved value, five clusters and twelve core values were defined, so that the research question could be answered. The categorized and practice-oriented collection of AI applications has the potential to support product developers in digitizing their processes by providing exemplary use cases and enables researchers to compare their approaches with practical applications. With regard to AI in PD, it can be summarized that artificial intelligence is used in particular in the late phases of development. In addition, there are only a few systems in the applications studied that enable AI-based translation between different domains. This might be a future research topic. However, it must be clarified in advance whether the training data situation is sufficiently high in the individual case to be able to expect a successful use of AI. It must be noted that the clusters are not completely disjoint and partially merge into each other. It might be useful to identify a more integrative view on PD processes, that allows a more precisely investigation of this property. Through the identified clusters, it was shown how AI already provides versatile benefits in PD and enhances the capabilities of product developers. Further work can investigate how this potential affects the properties and complexity of future products.

References

- AI marketplace 2022 *KI-Marktplatz*, 2022, <https://plattform.ki-marktplatz.com/aimw/serviceandapps> retrieved: 30.12.22
- Applied AI 2022 *AI Startup Landscape 2021*, 2021, https://www.appliedai.de/hub/2021-ai-german-startup-landscape?token=eGYr5z7XmFjEDxFbr31H_YpDu5-417rj, retrieved: 2.1.23
- Bernijazov et al. 2021 BERNIJAZOV, Ruslan; DICKS, Alexander; DUMITRESCU, Roman; FOULLOIS, Marc; HANSELLE, Jonas; HÜLLMEIER, Evke; KARAKAYA, Gökce; KÖDDING, Patrick; LOHWEG Volker;

- MALATYALI Manuel; MEYER AUF DER HEIDE, Friedhelm; PANZNER, Melina: *A Meta Review on Artificial Intelligence in Product Creation*. In: *Proceedings of the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21)*, 2021
- BMBF and BMWK 2019 BMBF and BMWK, KI-Landkarte 2019, <https://www.plattform-lernende-systeme.de/startseite.html>, retrieved: 02.01.23
- Cockburn et al. 2019 COCKBURN, Iain; HENDERSON, Rebecca; STERN, Scott: *The Impact of Artificial Intelligence on Innovation*. In: Agrawal, Gans, and Goldfarb (Hrsg.): *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*, 2019
- Digital Engineering 2017 DIGITAL ENGINEERING: *CAE-Prozesse mit künstlicher Intelligenz automatisieren*. <https://www.digital-engineering-magazin.de/cae-prozesse-mit-kuenstlicher-intelligenz-automatisieren/> retrieved: 02.01.23
- Digital Engineering 2018 DIGITAL ENGINEERING: *Aerodynamischer dank künstlicher Intelligenz*. <https://www.digital-engineering-magazin.de/aerodynamischer-dank-kuenstlicher-intelligenz/> retrieved: 02.01.23
- Digital Engineering 2021 DIGITAL ENGINEERING: *Konzeptoptimierung: So kann KI schnell & effektiv komplexe Rahmenstrukturen optimieren*. <https://www.digital-engineering-magazin.de/konzeptoptimierung-so-kann-ki-schnell-und-effektiv-helfen/> retrieved: 02.01.23
- Digital Engineering 2022a DIGITAL ENGINEERING: *Quality-Monitor: Wie KI die Fahrwerksentwicklung unterstützt*. <https://www.digital-engineering-magazin.de/quality-monitor-wie-ki-die-fahrwerksentwicklung-unterstuetzt/> retrieved: 02.01.23
- Digital Engineering 2022b DIGITAL ENGINEERING: *Wissensmanagement-Lösung: Wie KI aus Daten Mehrwerte generiert*. <https://www.digital-engineering-magazin.de/wissensmanagement-loesung-wie-ki-aus-daten-mehrwerte-generiert/> retrieved: 02.01.23
- Fachzeitschriften 2022 DIGITAL ENGINEERING MAGAZIN: www.fachzeitschriften.de/zeitschrift-magazin-digital-engineering-magazin, retrieved: 27.12.23
- KEM 2017 KEM: *Digitale Objekte aus unvollständigen 3-D-Daten*. <https://kem.industrie.de/allgemein/digitale-objekte-aus-unvollstaendigen-3-d-daten/> retrieved: 03.01.23
- KEM 2019a KEM: *Künstliche Intelligenz von IBM bietet Unterstützung im Anforderungsmanagement* <https://kem.industrie.de/systems-engineering/kuenstliche-intelligenz-ibm-anforderungsmanagement/> retrieved: 03.01.23
- KEM 2019b KEM: *Siemens erweitert NX um KI und maschinelles Lernen*. kem.industrie.de/produktentwicklung/schneller-staerker-intelligenter/ retrieved: 03.01.23
- KEM 2021a KEM: *Protiq kalkuliert Angebote automatisch mittels KI*. <https://kem.industrie.de/3d-druck/protiq-kalkuliert-angebote-automatisch-mittels-ki/> retrieved: 03.01.23
- KEM 2021b KEM: *KI im Bereich Werkstoffmodellierung lässt neue Fahrzeugkonzepte entstehen*. <https://kem.industrie.de/werkstoffe/elringklinger-forscht-zu-ki-im-bereich-der-werkstoffmodellierung/> retrieved: 03.01.23
- KEM 2022 KEM: *Siemens erweitert Xcelerator der NX-Software mit KI-Funktionen*. <https://kem.industrie.de/produktentwicklung/siemens-erweitert-xcelerator-der-nx-software-mit-ki-funktionen/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktion 2020 Konstruktion: *KI-Technologie erzeugt 3D-Gebäudemodelle*. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/bauprozess/ki-technologie-erzeugt-3d-gebaeudemodelle/> retrieved: 03.01.23
- Konradin 2022 KEM Konstruktion, <https://media.industrie.de/kem-konstruktion/>, ret: 2.12.22

- Konstruktionspraxis 2018a KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Konstruktionen schneller umsetzen*. www.konstruktionspraxis.vogel.de/konstruktionen-schneller-umsetzen-a-773172/ retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2018b KONSTRUKTIONSPRAXIS: *La Bandita: Maßgeschneiderter Traumflitzer auf Knopfdruck*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/la-bandita-massgeschneiderter-traumflitzer-auf-knopfdruck-a-734134/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2019 KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Konstruieren für die Automatisierung*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/konstruieren-fuer-die-automatisierung-a-865058/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2020a KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Sechs Neuheiten für die Arbeit mit CAD-Daten*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/sechs-neuheiten-fuer-die-arbeit-mit-cad-daten-a-977972/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2020b KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Creo 7.0: Simulation ist schneller als die Kaffeemaschine* <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/creo-70-simulation-ist-schneller-als-die-kaffeemaschine-a-941946/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2021a KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Deep Learning in der additiven Fertigung*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/deep-learning-in-der-additiven-fertigung-a-1009664/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2021b KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Aus Alt mach Neu*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/aus-alt-mach-neu-a-1080805/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2021c KONSTRUKTIONSPRAXIS: *3D-gedruckte Silikonaufsätze optimieren In-Ear-Kopfhörer*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/3d-gedruckte-silikonaufsaetze-optimieren-in-ear-kopfhoerer-a-1002385/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2021d KONSTRUKTIONSPRAXIS: *KI hilft beim Designprozess im Elektromaschinenbau*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/ki-hilft-beim-designprozess-im-elektromaschinenbau-a-1013062/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2022a KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Wie neue Funktionen in NX Konstruktionen optimieren*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/wie-neue-funktionen-in-nx-konstruktionen-optimieren-a-1097989/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2022b KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Automatisiert zum passenden Bauteil dank Generative Engineering* www.konstruktionspraxis.vogel.de/automatisiert-zum-passenden-bauteil-dank-generative-engineering-a-7d6c9bc9b3fd7f40a380ff28f8c4eb73/ retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2022c KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Blechbauteile automatisiert analysieren und optimieren*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/blechbauteile-automatisiert-analysieren-und-optimieren-a-63006c10494bde9749616fad641112a1/> 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2022d KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Fahrzeuge leicht gemacht – dank KI*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/fahrzeuge-leichtgemacht-dank-ki-a-099190bb4c1f7b7acdeee32e961069d4/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2022e KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Neue Produkte rund um CAE, digitale Zwillinge und Prozesssimulation*. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/neue-produkte-rund-um-cae-digitale-zwillinge-und-prozesssimulation-a-60677b4a5f668058c25f586d23622e3b/> retrieved: 03.01.23
- Konstruktionspraxis 2022f KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Wie BMW-Ingenieure KI in der Fahrzeugentwicklung einsetzen*. www.konstruktionspraxis.vogel.de/wie-bmw-ingenieure-ki-in-der-fahrzeugentwicklung-einsetzen-a-c1ed1f9858dc879e94b8f55881719252/ ret: 3.1.23

- Konstruktionspraxis 2022g KONSTRUKTIONSPRAXIS: *Acht Lösungen rund um CAD-Daten.* <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/acht-loesungen-rund-um-cad-daten-a-1108997/> retrieved: 03.01.23
- Krauß et al. 2019 KRAUß Jonathan; DORIßEN, Jonas; MENDE, Hendrick; FYRE, Maik; SCHMITT Robert: *Machine Learning and Artificial Intelligence in Production: Application Areas and Publicly Available Data Sets*, In: Wulfsberg, J.P., Hintze, W., Behrens, BA. (Hrsg.), *Production at the leading edge of technology*, 2019, S. 493–501
- Luo 2022 LUO, Jianxi: *Data-Driven Innovation: What is it?* In: IEEE Transaction on Engineering Management (Volume: 70, Issue: 2, February 2023), p. 784-790, published: 8.2.22
- MaschinenMarkt 2018 MASCHINENMARKT: *Digitaler Zwilling verhindert Verzugsprobleme.* <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/digitaler-zwilling-verhindert-verzugsprobleme-a-764449/> retrieved: 04.01.23
- MaschinenMarkt 2020a MASCHINENMARKT: *Trumpf schickt zwei neue Digital-Start-ups für die Blechteilefertigung ins Feld.* <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/trumpf-schickt-zwei-neue-digital-start-ups-fuer-die-blechteilefertigung-ins-feld-a-965900/> retrieved: 04.01.23
- MaschinenMarkt 2020b MASCHINENMARKT: *Technische Texte mithilfe von Künstlicher Intelligenz übersetzen.* <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/technische-texte-mithilfe-von-kuenstlicher-intelligenz-uebersetzen-a-964525/> retrieved: 04.01.23
- MaschinenMarkt 2021a MASCHINENMARKT: *Trends setzen statt ihnen zu folgen.* <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/trends-setzen-statt-ihnen-zu-folgen-a-1070963/> retrieved: 04.01.23
- MaschinenMarkt 2021b MASCHINENMARKT: *Schnell vom CAD-Modell zum Fertigungsauftrag.* <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/schnell-vom-cad-modell-zum-fertigungsauftrag-a-1014312/> retrieved: 04.01.23
- MaschinenMarkt 2021c MASCHINENMARKT: *Wie Sie Bauteile 80 Prozent schneller kalkulieren.* <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/wie-sie-bauteile-80-prozent-schneller-kalkulieren-a-1054681/> retrieved: 04.01.23
- Plappert et al. 2020 PLAPPERT Stefan; GEMBARSKI Paul; LACHMAYER Roland: *The Use of Knowledge-Based Engineering Systems and Artificial Intelligence in Product Development*, 2020. In: Świątek, J., Borzowski, L., Wilimowska, Z. (Hrsg.): *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 40th Anniversary International Conference on Information Systems Architecture and Technology*, 2019, S. 62–73
- Reinhart et al. 2021 REINHART, Joachim; MAYER, Oliver; GREINER, Christian: *Künstliche Intelligenz - eine Einführung*. Vogel Communications Group, 2021.
- Stark 2022 STARK Rainer: *Virtual Product Creation in Industry*. Springer Berlin Heidelberg, 2022.
- Vogel 2023a VOGEL COMMUNICATIONS GROUP: *Factsheet*. <https://b2bmarketing.vogel.de/pages/konstruktionspraxis>, retrieved: 2.1.23
- Vogel 2023b VOGEL COMMUNICATIONS GROUP: *Factsheet*. <https://b2bmarketing.vogel.de/pages/mm-maschinenmarkt>, retrieved: 2.1.23
- VDI 2022a VDI:*Mediadaten2022*. www.vdi-fachmedien.de/wp-content/uploads/2018/12/05_Konstruktion_VDI_Fachmedien_2022_RZ.pdf, retrieved: 30.12.23
- VDI 2221 2021 Norm VDI 2221 TEIL 1 2021, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE.
- VDI 2206 2021 Norm VDI/VDE 2206 *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme* 2021, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE.

VR-gestützte Produktentwicklung in der universitären Lehre: Entwicklung und Evaluation einer Lehr-Lerneinheit

VR-Supported Product Development in University Teaching: Development and Evaluation of a Teaching Unit

Adrian Henrich¹, Stefania Kontokosta¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Stuttgart

Adrian.Henrich@iat.uni-stuttgart.de

Stefania.Kontokosta@iat.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Unternehmen setzen als Teil der digitalen Transformation zunehmend auf Werkzeuge wie Virtual Reality (VR). Angehende Ingenieurinnen und Ingenieure müssen daher im Rahmen ihres Studiums im Umgang mit dieser Technologie ausgebildet und dazu befähigt werden, sich kritisch mit ihrem Einsatz auseinanderzusetzen. In diesem Paper wird deshalb die Entwicklung einer Lehr-Lerneinheit beschrieben, die Studierende in die Lage versetzt, ihr Konstruktionsprojekt mit VR zu unterstützen. Dabei sollen sie einerseits die Möglichkeiten und Herausforderungen der Technologie für ihr späteres Arbeitsumfeld kennenlernen und andererseits von einem VR-induzierten Lerneffekt profitieren. Inwieweit diese Ziele erreicht werden konnten, wird anhand der Ergebnisse der entwicklungsbegleitenden Längsschnittstudie diskutiert.

Keywords (deutsch):

Ingenieurausbildung, Lehre, Konstruktion, Produktentwicklung, Virtual Reality

Abstract (english): As part of digital transformation companies increasingly use tools like Virtual Reality (VR). Therefore, future engineers must be trained in the framework of their studies to use this technology. Beyond that they should be getting educated to critically assess the use of VR in future work-related scenarios. This paper therefore describes the development of a teaching unit that enables students to support their design project with the help of VR hard- and software. On the one hand, they should learn about the possibilities and challenges of the technology regarding their future working environment and, on the other hand, they should benefit from a VR-induced learning effect. The extent to which these goals could be achieved is discussed based on the results of a longitudinal study accompanying the development.

Keywords (english):

Engineering Education, Adult Education, Product Development, Technical Design, Virtual Reality

1 Einleitung

Aktuelle Ereignisse wie die Corona-Pandemie, die Ukraine-Krise, die daraus folgende Energieverteilung sowie Lieferengpässe und Ausfälle diverser Zulieferer führen dazu, dass Unternehmen zunehmend unter Druck geraten (Tan 2022). Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen existierende Produkte an die neuen Umstände angepasst werden und neue Produkte in deutlich verkürzten Zeiträumen vor dem Hintergrund eines hochvolatilen Umfelds entwickelt werden (Anayi et al. 2022). Dieser Herausforderung begegnen Unternehmen unter anderem mit dem Einsatz digitaler Technologien wie Virtual Reality (VR). Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass Studierende der Ingenieurwissenschaften nach ihrem Abschluss zunehmend in virtuellen Arbeitsumgebungen arbeiten und mit der Unterstützung von VR-Technologie Produkte modifizieren oder neu entwickeln werden (Zinn 2019).

Vor diesem Hintergrund ergibt sich das Ziel des in diesem Beitrag beschriebenen Forschungsprojekts, VR in bestehende Praxisübungen zur Produktentwicklung während des Grundstudiums zu integrieren. Dabei sollen die Studierenden die aus der Vorlesung bekannte Theorie in ihren eigenen Entwicklungsprojekten zur Anwendung bringen und dadurch Praxiserfahrungen in der VR-unterstützten Produktentwicklung sammeln. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen des vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst geförderten Forschungsprojekts ViRAI. Hinter dem Akronym verbirgt sich eine Kooperation zwischen der Universität Stuttgart, repräsentiert durch das Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), der Universität Tübingen, mit dem Ludwig-Uhland-Institut für Empirische Kulturwissenschaft (LUI), und dem Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). ViRAI steht für »Virtual Reality in der universitären Ausbildung im Ingenieurwesen« und das Projekt begleitet die VR-Einführung in zwei Modulen an der Universität Stuttgart. Neben dem in diesem Paper behandelten Modul »Grundzüge der Produktentwicklung I/II« werden die Möglichkeiten von VR für das Modul »Virtuelles Engineering« technisch, didaktisch und kulturwissenschaftlich untersucht.

2 Stand der Technik und Forschungslücke

Unter Virtual Reality (VR) wird die interaktive Immersion in einer vollkommen virtuellen Umgebung verstanden, was in der Regel mittels sogenannter VR-Brillen und -Controller umgesetzt wird (Riener 2015; Zinn 2019). Diese Form der Virtualität ist Teil der sogenannten Extended Reality (XR) und steht im Kontrast zur Realität (Real Environment, RE), welche in Bild 1 auf der gegenüberliegenden Seite im Reality-Virtuality Continuum eingeordnet ist.

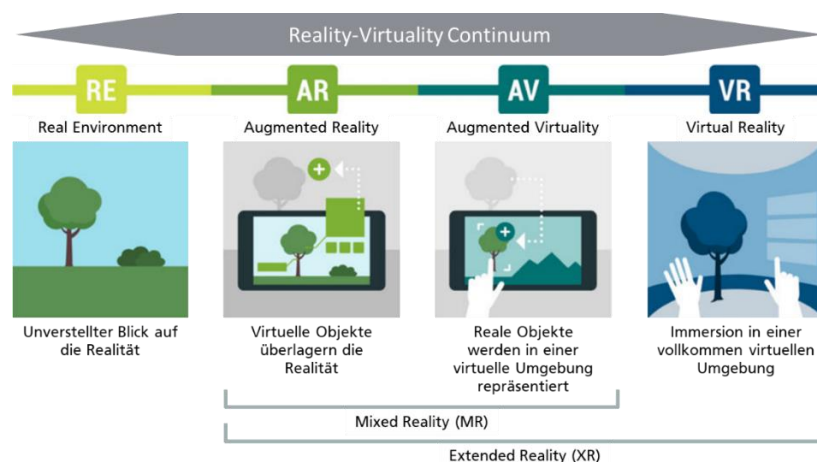


Bild 1: Abgrenzung im Reality-Virtuality Continuum; eigene Darstellung, aufbauend auf Farshid et al. (2018), in Anlehnung an Shaviro (2007)

Zwischen RE und VR findet eine Vermischung realer und virtueller Elemente statt, weshalb dieser Bereich als Mixed Reality (MR) bezeichnet wird. Die Konstellation, bei der virtuelle Objekte die Realität überlagern, heißt Augmented Reality (AR). Werden in einer ansonsten virtuellen Umgebung reale Objekte eingefügt, ist die Rede von Augmented Virtuality (AV). (Farshid et al. 2018, S. 659)

Sämtliche Formen der Extended Reality sind bereits technologisch ausgereift genug, um für den Einsatz in der Lehre in Betracht zu kommen. Für die Immersion in der virtuellen Realität oder für AV gibt es VR-Brillen und -controller mehrerer Hersteller und zur Überlagerung der Realität mit interaktiven Informationselementen können AR-Brillen oder Smartphones genutzt werden. Für das Lehrkonzept wird jedoch aus mehreren Gründen nur VR berücksichtigt und AR außen vorgelassen: Die vollkommene Immersion der Nutzer in die Entwicklungsumgebung setzt eine 1:1 Skalierung des Bauraums und der Bauteilschnittstellen voraus. In AR wäre hierfür ein mindestens ebenso großer Raum notwendig, während die Dimensionen in VR unbegrenzt sind. Zudem ist das Betreten virtueller Umgebungen, wie beispielsweise Räume, Gebäude oder große Fahrzeuge, in AR nicht möglich.

Obwohl AR kostengünstig eingesetzt werden kann, wenn als zugehörige Hardware die Smartphones der Nutzer verwendet werden, zieht diese Vorgehensweise auch einen hohen Wartungs- und Betreuungsaufwand für diverse Smartphonemodelle und die Pflege der jeweiligen Software-Schnittstellen (APIs) nach sich. Die Verwendung von AR-Brillen vermeidet dieses Problem, dadurch wird jedoch auch der Kostenvorteil stark reduziert. Daher wird im Folgenden ausschließlich Virtual Reality in Kombination mit handelsüblichen Head-Mounted Displays (HMDs) bzw. VR-Brillen berücksichtigt, um die Vorteile der Immersion in die virtuelle Realität für alle Beteiligten (Studierende und Universität) kosteneffizient nutzen zu können.

2.1 VR-Einsatz in der Industrie

Wo in der Industrie bereits VR-Hard- und Software zum Einsatz kommt, berichten laut einer US-Studie aus dem Jahr 2019 knapp über die Hälfte (57 %) der Anwender von positiven Auswirkungen auf ihr Unternehmen (Langer 2020). Dazu zählt neben dem Bootsbauer Beneteau, Porsche, Mercedes-Benz und der Ford Motor Company auch Lockheed Martin. Das Unternehmen gibt an, während der Produktentwicklung und bei der Ausbildung von Wartungspersonal durch den Einsatz von VR-Technologie jährlich 10 Millionen US-\$ zu sparen (Russell 2017). Derzeit wird VR hauptsächlich für Design Reviews sowie für Präsentationen genutzt, in denen der Schwerpunkt auf dreidimensional visualisierbaren Sachverhalten liegt (Clerk et al. 2019). VR wird hier also als Arbeitsmedium eingesetzt, um einen sichtbaren (bspw. finanziellen oder zeitlichen) Projektnutzen zu erzielen.

2.2 VR-Einsatz in der Ausbildung

Werden in der Aus- und Weiterbildung VR-Umgebungen verwendet, dann meist, um mit vergleichbar geringem Aufwand und dem Vorteil der Wiederholbarkeit Abläufe trainieren zu können, die bisher an Modellen geübt wurden. Ziel ist die Vermittlung späterer, realer Abläufe. Dieser Einsatz von VR als Lernmedium findet beispielsweise in der Kfz- und Bergbauausbildung oder in der Medizintechnik statt (Akbulut et al. 2018, S. 920). Neben physischen Abläufen kann auch Zusatzwissen vermittelt werden, indem situationsspezifisch Objekte hervorgehoben oder mit zusätzlichen Erläuterungen ergänzt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die verwendeten HMDs weniger Platz benötigen, als konventionelle Übungsstationen und rein softwarebasierte Anpassungen keine Fertigungs- und Materialkosten nach sich ziehen. (Tallig et al. 2017)

2.3 VR-Einsatz in der Hochschullehre

In der Hochschullehre wird seltener die Kenntnis und Durchführung von Abläufen und häufiger Fach- und Methodenwissen vermittelt. Dazu gehört beispielsweise das Verständnis mechatronischer Komponenten und Funktionen in einer Waschmaschine. Kaminska et al. (2017) beschreibt, wie Studie-

rende der Mechatronik in einem virtuellen Labor eine solche Maschine zerlegen und untersuchen können.

Eine ähnliche Vorgehensweise ermöglicht es Elektrotechnik-Studierenden, einfache Schaltkreise anzulegen und zu testen. Dabei werden sie von Lehrkräften unterstützt und beraten. VR wird hier also als Lehrmedium eingesetzt, um Inhalte zu vermitteln. (Zavalani und Spahiu 2012)

Die bekanntesten Anwendungsbeispiele von VR als Lern- oder Übungsmedium kommen aus dem Medizinstudium, wo Studierende virtuell Leichen präparieren und Operationen üben können (Akbulut et al. 2018; Langer 2020). Im Vergleich zu konventionellen Übungen mit Literatur und Modellen ohne VR-Unterstützung konnte eine Studie 24,6 % weniger Fehler bei nachfolgenden Autopsieprüfungen feststellen (Maresky et al. 2019).

2.4 VR-Studien und Forschungslücke

Zusammengefasst werden die Möglichkeiten der virtuellen Realität bereits in der Ausbildung und auch in der universitären Lehre genutzt. Dabei werden VR-Applikationen meistens als Lern- oder Lehrmedien zur Vermittlung von Wissen oder Abläufen eingesetzt. Eine Ausnahme macht eine Studie, im Rahmen derer die Studierenden ihr architektonisches Design in VR begehen und beispielsweise hinsichtlich des Lichteinfalls und der Raumaufteilung untersuchen konnten (Sampaio et al. 2010). Im Bereich der Ingenieurslehre sind solche Einsatzszenarien mit potenzieller späterer Verwendung im Beruf jedoch noch nicht verbreitet.

Hierzu zählt die Verwendung von VR als Arbeitsmedium, um beispielsweise Design-Reviews während der Produktentwicklung durchzuführen (vgl. Kapitel 2.1), oder Abläufe an virtuellen Prototypen zu simulieren (ESI Group 2022). Hier setzt die diesem Paper zugrundeliegende Forschungsarbeit an.

Die Entwicklung des VR-Didaktikkonzepts soll darüber hinaus von einer umfassenden Evaluation begleitet werden, um eine weitere Forschungslücke zu schließen. Rüdiger (2021) beschreibt in seiner Sammlung 31 aktueller VR-Lehrstudien 28 Aussagen zum Lernerfolg der Studierenden oder Auszubildenden. Jedoch fehlen in sieben dieser Studien Vergleiche zu konventionellen Lehr-Lernarrangements. Es wird also nicht aufgezeigt, ob und in welchem Umfang sich VR besser zur Vermittlung von Lerninhalten eignet als konventionelle Lehrmedien. Darüber hinaus werden mehrere mögliche Wechselwirkungen in diesen Studien nicht berücksichtigt. Zu diesen zählt beispielsweise der Einfluss der bereits vor der Untersuchung vorhandenen Vorkenntnisse und intrinsischer Motivation, da diejenigen Lernenden, die während der Studien VR benutzten, in der Regel freiwillig der Untersuchungsgruppe beitraten. In manchen Fällen wurde die durch VR unterstützte Lehr-Lerneinheit von Tutoren oder anderen Lehrpersonen begleitet, wohingegen im konventionellen Szenario keine oder geringere Unterstützung bereitstand. Der Anteil dieser Betreuung am Lernerfolg wird in den Studien jedoch nicht untersucht. Findet ein Vergleich zwischen den VR-unterstützten Lernenden und einer Kontrollgruppe statt, ist stellenweise kein Rückschluss auf die Ursache entdeckter Unterschiede möglich, da die grundlegende Lehr-Lernmethode eine andere ist. Die Bewertung der Lehr-Lerneinheit wird in den meisten Fällen aus der Begeisterung der Lernenden abgeleitet. Zuletzt variiert die Ausprägung eines methodischen Entwicklungsrahmens für die Lehr-Lerneinheiten stark. (Rüdiger 2021)

Diese zwei Forschungslücken sollen daher im Rahmen der Entwicklung und Evaluation geschlossen werden. Ziel ist die Entwicklung eines Didaktikkonzepts, in dessen Rahmen VR primär als Arbeitsmedium für Ingenieurstudierende zum Einsatz kommt. Die Tauglichkeit (Lernerfolg und Auswirkungen auf die Motivation und das Verständnis der Studierenden) des Konzepts wird im praktischen Lehreinsetz überprüft. Die Basis für die Konzeptentwicklung bildet die Übung zum bereits im ersten Kapitel erwähnten Modul »Grundzüge der Produktentwicklung I/II«, die aus zwei einsemestrigen Semesterprojekten besteht. In diesen Projekten entwickeln Studierende der Universität Stuttgart in Sechsergruppen Zahnradgetriebe (Wintersemester) oder Produkte (Sommersemester) anhand von Lastenheftvorgaben. Dadurch sollen sie das eigenständige Konstruieren im Projektkontext erlernen. Als Arbeitsmedium verwenden sie dafür die CAD-Software Siemens NX. Für dieses Szenario der praktischen Konstruktionslehre wird im Folgenden das VR-Didaktikkonzept entwickelt, welches zusätzlich die virtuelle Produktentwicklung vermitteln soll und in der Lehr-Lerneinheit evaluiert wird (Kapitel 4).

3 Entwicklung des Didaktikkonzepts

Unter dem Begriff »Didaktik« (gr. διδάσκω [di'ðasko] = lehren, unterrichten, lernen) wird die praktische Vermittlung theoretischen Wissens sowie die Theorie der Lehre und des Lernens verstanden. Die Didaktikforschung widmet sich der Beziehung zwischen Lernstoff, Lernenden und Lehrenden. (Hippel et al. 2019)

Kron et al. (2014) unterteilt die Didaktik nach ihrer Praxisnähe in »Theorie«, »Modell«, »Konzept« und »Lehrpraxis«. Daraus lässt sich eine vierphasige Vorgehensweise ableiten, die mit den unter Ingenieuren bekannteren vier Phasen der Produktentwicklung nach VDI 2221 (2019) vergleichbar ist. Parallel zur Vorgehensweise in der Produktentwicklung wird in der Didaktik eine neue Lehr-Lerneinheit geplant und in mehreren Schritten zum Endergebnis ausgearbeitet. Auf Basis einer oder mehrerer Didaktiktheorien wird ein Modell erstellt (mit einem Produkt- bzw. Dienstleistungskonzept vergleichbar), welches dann zu einem konkreteren Konzept (vgl. Entwurf) weiterentwickelt wird. Validiert wird dieses in der Lehrpraxis, wobei die Validierungs- bzw. Evaluationsergebnisse wieder in die Entwicklung zurückgeführt werden. Vergleichbar mit dem Testen in der Ausarbeitungsphase der Produktentwicklung wird dadurch das Didaktikkonzept verfeinert und mögliche Fehler werden verbessert. Im Folgenden wird dieses Vorgehen für jenes Didaktikkonzept ausführlicher beschrieben, welches die VR-gestützte Produktentwicklung in den Semesterprojekten des Moduls »Grundzüge der Produktentwicklung I/II« ermöglichen soll.

3.1 Didaktiktheorie

Das Ziel der Hochschullehre ist, dass die Studierenden Kompetenzen erwerben, die auf bereits vorhandenem Vorwissen aufbauen und im Rahmen von Transferleistungen auf spätere Anwendungen übertragbar sind (Fabry 2016). Wie die Lernenden diese Kompetenzen erwerben, wird in der Didaktiktheorie zu erklären versucht. Unterschiedliche Theorieansätze unterscheiden sich unter anderem im Grad der Selbststeuerung bzw. der Betreuungsintensität durch die Lehrperson(en) (vgl. u. a. Erpenbeck 2013). Während in Vorlesungen und Seminaren häufig auf fremdgesteuertes Lernen zurückgegriffen wird, setzen Übungen, Projekte und Praktika in der Regel selbstgesteuertes und -organisiertes Lernen voraus. Im Rahmen der hier beschriebenen Forschungsarbeit wird die Theorie des Konstruktivismus fokussiert. Dieser geht davon aus, dass Wissen nicht einfach weitergegeben werden kann, sondern vielmehr in den Lernenden auf Basis bereits existenten Vorwissens und des eigenen Verständnisses entsteht, bzw. konstruiert wird. Wie in der dem zu entwickelnden VR-Didaktikkonzept zugrundeliegenden konventionellen Konstruktionsübung agieren Lehrpersonen im Konstruktivismus hauptsächlich als passiv unterstützende Tutoren. Diese können den Lernenden Wissen nicht einflößen, sondern helfen durch die Klärung von Fragen und Missverständnissen dabei, das in den Köpfen der Lernenden entstehende Verständnis der Lerninhalte zu formen und ihren Fortschritt in der Entwicklungsarbeit der Übung zu unterstützen.

3.2 Methodisches Vorgehen der Modellerstellung

Auf dieser theoretischen Basis wird nun ein Didaktikmodell erstellt. Dabei handelt es sich um einen abstrakten Prototyp einer Lehr-Lerneinheit, der aus einer Kombination von Lehr-Lernmethoden zusammengesetzt wird. Im ersten Schritt findet daher eine Auswahl geeigneter Methoden statt. Zunächst werden im Rahmen einer Literaturrecherche Methodensammlungen ausgewählt, die sich mit der Berufs- und Hochschullehre im Allgemeinen und mit der Ingenieurausbildung im Speziellen befassen. Aus diesen Sammlungen, die um die an der Universität Stuttgart zur Anwendung kommenden Methoden ergänzt wird, ergibt sich eine Liste mit 137 infrage kommenden Methoden. Diese werden im nächsten Schritt im Rahmen eines Filtersystems analysiert (Bild 2).

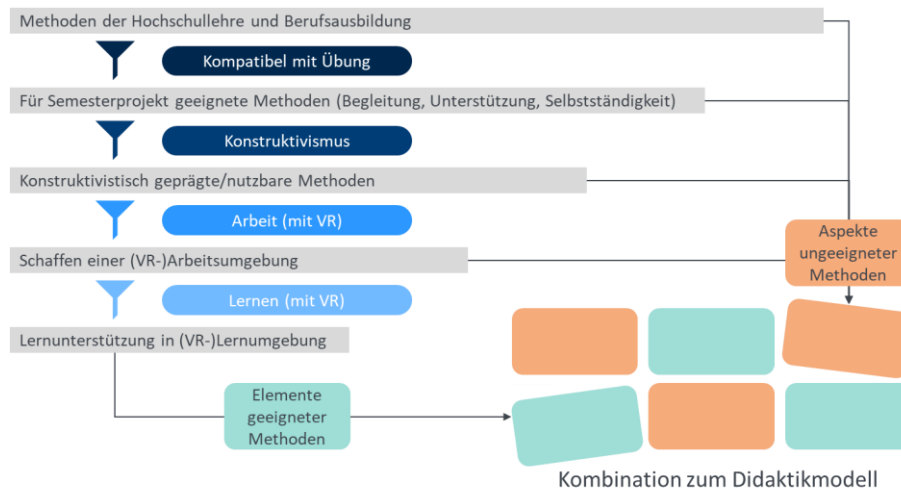


Bild 2: Filtersystem zur Findung geeigneter Lehr-Lernmethoden; eigene Darstellung

Untersucht wird zunächst, ob die betrachteten Methoden mit der Makromethode (Projektarbeit bzw. Konstruktionsprojekt) der zugrundeliegenden Übung kompatibel sind. Ungeeignete Methoden, bei denen beispielsweise keine eigenständige Arbeit vorgesehen ist, oder mit denen die Lernziele (Eigeninitiative, Analysefähigkeit, Problemlösungsfähigkeit, Konstruktionsfähigkeit und technisches Zeichnen) nicht erreichbar sind, werden aussortiert und in den folgenden Filterschritten nicht weiter berücksichtigt. Sollten die ausgefilterten Methoden jedoch Aspekte beinhalten, die auf das Didaktikmodell potenziell nutzbar sind, werden diese beim Ausscheiden der Methoden notiert und bei der Modellerstellung berücksichtigt.

Im zweiten Filterschritt wird überprüft, ob die Lehr-Lernmethoden mit den lerntheoretischen Aspekten des Konstruktivismus harmonieren, also beispielsweise aktives, zielgerichtetes und sozial-kollaboratives Lernen fördern.

Danach wird die Anpassung der Methoden auf den Einsatz von VR als Arbeitsmedium analysiert. Methoden, die beispielsweise durch einen hohen Abstraktionsgrad keine realitäts- und berufsnahe Erfahrung zulassen, werden ausgeschlossen. Ansätze, die Design-Reviews und die technische Konstruktion im Allgemeinen beinhalten oder ermöglichen, kommen bis zum vierten Filterschritt.

In diesem Schritt wird untersucht, ob eine Lernumgebung gestaltet werden kann, in der die Studierenden aus eigenen Fehlern lernen und fehlende Vorkenntnisse ergänzen können. Methoden, die auf Fehler mit Strafe (z.B. soziale Strafe beim Eckenrechnen oder Punktabzug in der Bewertung) reagieren oder keine Arrangements vorsehen, um Vorkenntnisse, beispielsweise anhand von Beispielen, zu ergänzen, werden aussortiert.

Von den insgesamt 137 betrachteten Methoden werden entlang des eben beschriebenen Vorgehens 78 als inkompatibel mit der Übung aussortiert. Weitere 16 Methoden unterstützen die fünf Punkte des Konstruktivismus nicht. Ebenso viele der verbliebenen Methoden (16 von 43) erweisen sich als ungeeignet, die Lernenden auf die spätere Arbeitssituation vorzubereiten. Im letzten Filterschritt werden vier Methoden ausgefiltert, die keine geeignete (fehlertolerante) Lernumgebung schaffen können. Übrig bleiben 23 nutzbare Methoden. Diese werden durch übertragbare Aspekte aus 73 zuvor aussortierten Methoden ergänzt.

Die dadurch gesammelten 96 Methoden bzw. Methodenbausteine werden in einem morphologischen Kasten den Anforderungen an die Lehr-Lerneinheit gegenübergestellt, welche aus den Filterkriterien abgeleitet wurden. Aus dieser strukturierten Übersicht wird im letzten Schritt das Didaktikmodell durch eine Kombination geeigneter Bausteine abgeleitet.

Das Modell sieht ein Tutorium zu Semesterbeginn vor, um die Studierenden mit der VR-Hard- und Software vertraut zu machen. Während des Semesters sollen in VR-Sessions Planungsbesprechungen mit 3D-Skizzen in VR sowie Design-Reviews zur Analyse der studentischen Konstruktionen in VR durchgeführt werden. Den Studierenden ist dabei selbst überlassen, wie häufig und wie lange sie

dieses Angebot in Anspruch nehmen und welche Aktionen sie in VR durchführen. Um Hemmschwellen abzubauen, ist allerdings mindestens eine Session verpflichtend zu besuchen (vgl. Persike 2019). Um die Selbstständigkeit der Studierenden zu fördern, begleiten die Tutoren die Sessions wie Coaches. Statt auf Nachfragen Lösungen bereitzustellen, werden die Studierenden durch offene Fragen und das Durchspielen von was-wäre-wenn-Szenarien zum Mitdenken und eigenständigen Problemlösen angeregt. So sollen sie auch in VR mit möglichst geringer Einflussnahme durch die Tutoren Konstruktionsfehler ermitteln, in der Gruppe diskutieren und gemeinsam lösen. Die Tutoren stehen für Expertenbefragungen zur Verfügung, um fehlende Vorkenntnisse der Studierenden zu ergänzen. In VR können die Studierenden ihre Konstruktion visuell analysieren, Ergonomiestudien durchführen oder die Montage der Komponenten und Baugruppen erproben. Während der VR-Sessions findet keine Bewertung durch die Tutoren statt und eine kollaborative und ergebnisfokussierte Zusammenarbeit der Studierenden untereinander und mit den Tutoren wird angestrebt. Erst bei den Abgaben nehmen die Tutoren wieder die Rolle der Projektleitung oder des Kunden bzw. Nutzers ein und bewerten die Arbeitsleistung.

3.3 Ableitung des Konzepts

Aus dem bis hierhin beschriebenen Modell entsteht das Didaktikkonzept, indem den Anforderungen und Rahmenbedingungen konkrete Lösungen (Räumlichkeiten, Organisation, Hardware, Software) gegenübergestellt werden. Der Schwerpunkt liegt im Folgenden auf der Ausgestaltung der VR-Software. Auf dem Markt gibt es bereits VR-Softwareanwendungen, die es ermöglichen, Objekte in einer virtuellen Umgebung darzustellen und mittels einer VR-Brille zu betrachten. Zhang (2020) untersucht und bewertet in Ihrer Forschungsarbeit insgesamt elf aktuelle VR-Programme. Dazu zählen unter anderem die native VR-Umgebung des CAD-Konstruktionsprogramms Siemens NX, ein Plug-In für SolidWorks und Rhino, Mindesk, und die FreeForm-Designanwendung Flyingshapes. Die getesteten Anwendungen weisen zwar ein hohes Potenzial auf, sind jedoch aufgrund unterschiedlicher Einschränkungen für die geplante Lehr-Lerneinheit ungeeignet. Dazu zählen unter anderem (Zhang 2020) Bedenken zum Datenschutz, fehlende Analysetools (z. B. für Schnitte oder Montagesimulationen in VR), zu komplexe User Interfaces, die vom Lernziel ablenken könnten, sehr lange Ladezeiten, hohe Lizenzkosten sowie ein Fokus auf nichtparametrischer Konstruktion.

Aus diesen Gründen wird ein auf Unity basierendes Programm entwickelt, das die für die im Modell beschriebenen VR-Sessions notwendigen Funktionen in einem übersichtlichen User Interface bereitstellt. Die in Siemens NX erstellten Dateien der Studierenden können mittels Freeware in wenigen Sekunden aus dem .stp-Format in ein kompatibles Dateiformat, wie .glb, .obj oder .fbx konvertiert werden. Um eine Montagesituation nachstellen zu können, gibt es Funktionen zum Trennen und Verknüpfen von Komponenten zu Baugruppen. Darüber hinaus können Objekte gezielt ausgeblendet oder an einem Ort fixiert (gesperrt) werden, um unbeabsichtigtes Verschieben zu vermeiden. Mit einem Knopfdruck können Komponenten wieder in ihre Ursprungsposition in der Baugruppe zurückgesetzt werden. Zur Unterstützung der Analyse kann eine Schnittebene frei im Raum positioniert werden. Mit einem virtuellen Maßband können Schnittstellen ausgemessen werden. Zu Planungs- und Visualisierungszwecken gibt es die Möglichkeit, dreidimensionale Skizzen anzulegen und aktuelle Zustände zu jeder Zeit als .fbx-Datei zu exportieren. Dadurch können diese „3D-Screenshots“ den Studierenden auch zuhause zur Verfügung gestellt und mit dem unter Windows vorinstallierten Viewer geöffnet werden, um im Nachgang Zugriff auf die in den VR-Sessions erarbeiteten Ergebnisse zu haben.

Die verwendete Hardware besteht aus zwei Gaming-Rechnern mit zwei VR-Brillen (HP Reverb G2), die sich in einem gemeinsamen Subnetzwerk befinden. Verortet sind die Rechner im selben Übungsraum, der Platz für eine Sechsergruppe Studierender plus Tutoren bietet. Dadurch kann eine ganze Gruppe eine VR-Session durchführen, bei der zwei Personen gleichzeitig in derselben virtuellen Umgebung sind und sich wie gewohnt verständigen. Dieser Umstand erlaubt es, auf ein Kommunikationsinterface zu verzichten und vereinfacht den Wechsel in und aus VR. Die Anwesenden ohne VR-

Brille können das Geschehen über einen TV-Monitor mitverfolgen. Darauf wird entweder die Perspektive eines VR-Nutzers oder ein 3rd Person View, wie in Bild 3 zu sehen, gezeigt.



Bild 3: Montageanalyse der Getriebekonstruktion im 3rd Person View mit Menüleiste unten und geladenen Bauteilen links oben; Programm-Screenshot

Letztere ermöglicht es, vom Desktop-Rechner aus auf die virtuelle Umgebung zuzugreifen und dort Objekte zu laden, zu positionieren oder Statusänderungen durchzuführen (z.B. Bewegung und Aktivierung der Schnittebene aus der Ferne).

Um den Einfluss zu untersuchen, den die pädagogische Unterstützung der Tutoren während der VR-Sessions hat, wird das Didaktikkonzept in zwei Iterationsschritten eingeführt: In der ersten Konzeptvariante steht das eigenständige Entdecken und Ausprobieren möglicher Nutzungsszenarien von VR in der Produktentwicklung durch die Studierenden im Vordergrund. Die Tutoren bieten hierbei keine fachliche Hilfestellung an und helfen nur bei technischen Problemen mit der VR-Hard- oder Software aus. Obwohl erwartet wird, dass dieses Vorgehen zu einem geringeren Lernnutzen führen könnte, sind für diese Variante keine fachlich ausgebildeten Tutoren, sondern lediglich Aufsichten nötig. Solche Aufsichten können im Gegensatz zu Tutoren mit geringem Aufwand rekrutiert und schnell ausgebildet werden. Die Effizienz der Lehr-Lerneinheit wird also durch einen möglichst geringen Lehraufwand erzielt.

Die zweite Konzeptvariante bindet die Tutoren stark in die VR-Sessions ein. Von ihnen wird nun die Kollaboration mit den Studierenden sowie pädagogisches Geschick bei der Vermittlung von Wissen und Fähigkeiten verlangt. Die Studierenden sollen „in die richtige Richtung geschubst“ werden, indem die Tutoren Hinweise zur Nutzung von VR in der Produktentwicklung geben. Zugleich sollen keine Komplettlösungen oder Lösungswege vorgegeben werden. Es wird erwartet, dass der Grad der Eigeninitiative der Studierenden im Vergleich zur ersten Variante leicht sinkt und der Lehraufwand stark ansteigt. Eine gleichermaßen hohe Lehreffizienz muss also durch einen hohen Lernerfolg erreicht werden.

4 Evaluation des Konzepts in der Lehrpraxis

Die Konzeptevaluation begleitet die Lehrpraxis über mehrere Erhebungskanäle und -methoden. Um einen Vergleich anstellen zu können, verwendet stets nur die Hälfte der das Semesterprojekt bearbeitenden Studierendengruppen VR, während die andere Hälfte als Kontrollgruppe dient. Im Sinne der Gleichberechtigung haben Nicht-VR-Gruppen im Rahmen der zweiten Konzeptvariante ebenfalls

die Möglichkeit, Präsenzsprechstunden am Institut wahrzunehmen, wobei der Erstbesuch genauso verpflichtend ist, wie die erste VR-Session der VR-Gruppen. Zum Semesterwechsel tauschen die Gruppen (bei gleichbleibender Personeneinteilung) die Rollen, um Lernkurveneffekte zu negieren. Zur Erhebung einer möglichst objektiven Leistungsbewertung werden von den Tutoren während der Testatabgaben Fehlerstrichlisten geführt. Unterschiedlich großen Gruppen und unterschiedlich ausfallenden Abgabebereichen wird mit einem Fehlerquotienten Rechnung getragen, der die Fehlerhäufigkeit pro Studierenden und Fehlerbereich (Konzept, Fertigung, Montage, Formal) angibt. Der Fehlerquotient der untersuchten Gruppen (VR-Gruppen und Kontrollgruppen) wird über den Verlauf der evaluierten Semesterprojekte miteinander verglichen. Im Falle einer Abweichung wird dieser paarweise Vergleich mittels eines T-Tests ($\alpha=0,05$) auf Signifikanz überprüft.

Um ein Feedback aus der Perspektive der Studierenden zu erhalten, werden auf der Lernplattform ILIAS Umfragen vor und nach dem Semesterprojekt durchgeführt, welche geschlossene Fragen zu den Erwartungen und Erfahrungen der Teilnehmenden beinhalten. Ergänzt werden diese durch anonyme, offene Interviews, die in Kooperation mit dem Ludwig-Uhland-Institut für Empirische Kulturwissenschaft der Universität Tübingen durchgeführt werden. Die Eindrücke der Tutoren werden in Forschungsjournals festgehalten. Dabei wird zu jeder VR-Session oder Präsenzsprechstunde (bei der zweiten Konzeptvariante) notiert, was aus Sicht der betreuenden Tutoren gut oder schlecht läuft, welche Vorkommnisse auffallen und welche Fragen die Studierenden äußern.

5 Ergebnisdiskussion

Die Semesterprojekte bearbeiteten insgesamt 145 Studierende (WS2021+SS21: 74, WS2122+SS22: 71). Die Projekte wurden in Sechsergruppen durchgeführt, deren Zusammensetzung innerhalb eines Jahres gleich blieb. Anhand von 14 Sechsergruppen wurde die erste, anhand von 12 Gruppen die zweite Konzeptvariante evaluiert. Im ersten Evaluationsjahr fanden 27 VR-Sessions statt. Im zweiten Jahr wurden 23 VR-Session durch 20 Präsenzsprechstunden der Kontrollgruppen ergänzt. An den ILIAS-Umfragen nahmen im ersten Jahr 44 und im zweiten Jahr 42 Studierende teil und es wurden jeweils 12 Interviews geführt.

Die Evaluation der Lehr-Lerneinheit bezieht sich im Folgenden auf drei zentrale Fragestellungen:

1. Kann das Konzept den Studierenden die Vorteile und Herausforderungen der VR-unterstützten Produktentwicklung vermitteln?
2. Hat die verwendete Technologie (VR) einen Einfluss auf den Lernerfolg der Studierenden?
3. Wie stark ist der Effekt der pädagogischen Unterstützung (Konzeptvariante 2) auf den Lernerfolg der Studierenden? Dabei wird der Effekt isoliert und in Wechselwirkung mit der VR-Technologie betrachtet.

Die letzte Frage schließt auch die Effizienz des Konzepts mit ein. Ist der Effekt vernachlässigbar, kann auf eine fachlich geschulte Betreuung der VR-Einheiten verzichtet werden.

Aus den Interviews, dem Feedback der Studierenden während der VR-Sessions und dem Ergebnis der ILIAS-Umfragen wird deutlich, dass die Studierenden sich durch den Gebrauch von VR als Arbeitsmedium während der Projektbearbeitung ein differenziertes Bild vom Nutzen der Technologie in der Produktentwicklung machen konnten. Obwohl im Schnitt weniger als 30 % der Teilnehmenden zuvor Erfahrungen mit VR gesammelt hatte, konnten sie nach dem Tutorium zu Semesterbeginn das Angebot bis auf vereinzelte Nachfragen zur Steuerung eigenständig nutzen. Vorteile sehen sie insbesondere im Bereich der Montierbarkeitskontrolle sowie in der gemeinsamen Besprechung möglicher Konstruktionsanpassungen. VR konnte jedoch nicht bei der Zeichnungserstellung oder bei der Kontrolle der Fertigbarkeit von Bauteilen helfen. Einige Studierende (im Schnitt 2-3 der Umfrageteilnehmenden je Semester) verwiesen darauf, dass die Inspektion ihrer Konstruktion auf Fehler auch in CAD möglich gewesen wäre. Zugleich merkten sie an, dass es dennoch erst in VR zu einer Entdeckung kam, was auch auf die Rahmenmethode des Design-Reviews zurückzuführen sein könnte. Das Primärziel der Lehr-Lerneinheit, nämlich die kritische Auseinandersetzung mit VR und die eigenständige

Nutzung der Technologie im Rahmen der studentischen Produktentwicklung kann daher als erreicht und die erste Frage (s.o.) mit ja beantwortet werden.

Für die Beantwortung der zweiten und dritten Fragestellung wird zunächst der paarweise Vergleich der Fehlerquotienten herangezogen (siehe voriges Kapitel). Auf Basis dieser Untersuchung kann kein bemerkenswerter positiver oder negativer Einfluss von VR auf den Lernerfolg der Studierenden (gemessen an der Fehlerhäufigkeit während der Testatabgaben) ermittelt werden. Die Studierenden, die VR aktiv nutzten, schnitten in den Testatabgaben nur zweimal signifikant besser und ebenso häufig signifikant schlechter ab als ihre Kommilitonen, die noch keine VR-Session in Anspruch genommen hatten (Basis: 32 verwertbare Erhebungspunkte im ersten Untersuchungsjahr). Die in den Forschungsjournals festgehaltenen Wahrnehmungen der Tutoren deckt sich dabei mit den Aussagen der Studierenden in Umfragen und Interviews während des ersten Untersuchungsjahres: Viele der Teilnehmenden (50 % der Interviewpartner, 30 % der Umfrageteilnehmenden) fühlten sich während der Design-Reviews verloren und konnten nach eigener Angabe keine neuen Erkenntnisse erlangen. Insbesondere Studierende mit Lernschwierigkeiten oder fehlenden Vorkenntnissen konnten nicht von den VR-Sessions profitieren und schrieben der Technologie im Anschluss auch nur geringes Potenzial zu. Nichtsdestotrotz stellten die Tutoren in sämtlichen der 27 VR-Sessions kleinere und größere Erfolge fest, bei denen die Studierenden eigenständig fehlende oder falsch montierte Bauteile erkannten. In ca. $\frac{1}{4}$ der Sessions fanden ohne Zutun der Tutoren Diskussionen zur Problemlösung statt. Während also der Lernnutzen in den Testaten nicht messbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest einige Studierende die Technologie kreativ zu ihrem Vorteil nutzen können.

Im zweiten Untersuchungsjahr, mit pädagogischer Unterstützung während der Design-Reviews mit und ohne VR, schnitten Gruppen, die bereits ein Review durchlaufen hatten, neunmal signifikant besser und dreimal signifikant schlechter ab als Gruppen, die noch keine Sprechstunde wahrgenommen hatten (Basis: 28 verwertbare Erhebungspunkte). Waren die Gruppen unmittelbar vor einer Testatabgabe zu Besuch, fiel diese in neun Fällen signifikant besser und nur in einem Fall signifikant schlechter aus als bei allen anderen Gruppen (Basis: 36 verwertbare Erhebungspunkte). Wurden nur die VR-Gruppen betrachtet, so schnitten diese ohne pädagogische Unterstützung noch gleich häufig signifikant besser wie schlechter ab (jwls. dreimal, 28 verwertbare Erhebungspunkte). Mit den Tutoren als fachliche Begleitung waren die Gruppen nach einer VR-Session in sechs Fällen signifikant besser und nur in zwei Fällen signifikant schlechter als die Gruppen, die kein VR nutzten.

Während also die pädagogische Unterstützung durch die Tutoren während der Design-Reviews allgemein einen großen positiven Einfluss zu haben scheint, fällt auf, dass dadurch auch erstmals messbare, positive Effekte der VR-Nutzung im Vergleich zu den VR-freien Sprechstunden generiert wurden. Diese Annahme wird bestärkt durch die Äußerungen der Tutoren sowie der Studierenden während der Design-Reviews sowie in den Interviews. Dadurch, dass die Tutoren während der Sessions kollaborativ auftraten und die Studierenden durch offene Frage- und Aufgabenstellungen unterschiedliche Möglichkeiten der VR-Nutzung ausprobieren ließen, berichteten diese im Vergleich zum Vorjahr deutlich häufiger von wahrgenommenen Erfolgen (in 5/12 statt 2/12 Interviews; in 13/23 statt 4/27 VR-Sessions). Abgesehen vom immer noch als begrenzt wahrgenommenen Nutzen von VR für formal-zeichnerische und fertigungstechnische Aspekte, beschrieb jeder der Umfrageteilnehmenden VR als hilfreich.

Die zweite Frage kann also nicht direkt beantwortet werden. Vielmehr wird aus den Forschungsergebnissen deutlich, dass VR dann für einen positiven Lerneffekt sorgen kann, wenn die Technologie-nutzung durch die Studierenden fachkompetent begleitet wird. Der reine Technologieeinsatz zeigt keinen messbaren Nutzen und kann zwar zu kleineren Erfolgen, jedoch auch zu Frustration bei Studierenden mit Lernschwierigkeiten und mangelnden Vorkenntnissen führen.

Die Antwort auf die dritte Frage lautet, dass ein pädagogisches Engagement lernförderlich ist, was sich auch in den Testatergebnissen niederschlägt. Der positive Effekt der pädagogischen Unterstützung ist sogar stärker als jener der VR-Technologie-nutzung, weshalb auf fachlich kompetente und pädagogisch geschulte Tutoren nicht verzichtet werden kann.

6 Fazit und Ausblick

Durch die Forschungsarbeit wurde erfolgreich die Lücke geschlossen, die neben den bereits bekannten Verwendungsgebieten von VR in der Hochschullehre bestand (vgl. Kapitel 2). Die hier beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass die Technologie zwar einen Nutzen für die (studentische und industrielle) Produktentwicklung bietet, jedoch nur durch die Unterstützung durch kompetente Tutoren zu positiven Effekten auf den Lernerfolg führen kann.

Die entwickelte Lehr-Lerneinheit wurde bereits verstetigt und findet weiterhin wie geplant statt. Aufgrund der positiven Erfahrungen wird nun untersucht, inwieweit das entwickelte Konzept auch auf weitere Lehr-Lerneinheiten ähnlicher universitärer Lehrmodule übertragen werden kann. Hierzu sind Workshops mit den verantwortlichen Lehrenden geplant. Darüber hinaus werden Konsequenzen aus hier nicht weiter thematisierten Nebenergebnissen der Evaluation gezogen. Beispielsweise hat sich gezeigt, dass VR gut geeignet ist, die studentische Konstruktion zu analysieren und zu diskutieren. Zur Vermittlung von fehlendem Grundlagenwissen sind jedoch physische Demonstratoren essenziell, weshalb derzeit in die Beschaffung geeigneter didaktischer Modelle und Beispielprodukte investiert wird.

Literatur

- Akbulut et al. 2018 AKBULUT, Akhan; CATAL, Cagatay; YILDIZ, Burak: *On the effectiveness of virtual reality in the education of software engineering*. In: *Comput Appl Eng Educ* 26 (4) (2018), S. 918–927. DOI: 10.1002/cae.21935.
- Anayi et al. 2022 ANAYI, Lena; BLOOM, Nicholas; BUNN, Philip; MIZEN, Paul; THWAITES, Gregory; YOTZOV, Ivan: *The impact of the war in Ukraine on economic uncertainty*. Veröffentlicht am: 16.04.2022 [Zugriff am: 06.09.2022]. In: CEPR.com. Verfügbar unter: s.fhg.de/b89
- Clerk et al. 2019 DE CLERK, Matthias; DANGELMAIER, Manfred; SCHMIERER, Gernot; SPATH, Dieter: *User Centered Design of Interaction Techniques for VR-Based Automotive Design Reviews*. In: *Frontiers in Robotics and AI* (2019), Nr. 6, Art. 13, S. 1-11.
- Erpenbeck 2013 ERPENBECK, John: *So Werden Wir Lernen! Kompetenzentwicklung in Einer Welt Führender Computer, Kluger Wolken und Sinnsuchender Netze*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- ESI Group 2022 ESI Group (Hrsg.): *Products - Virtual Reality. Experience Your Product – Before You Build or Service It – Through the World of Immersive Virtual Reality*. Veröffentlicht am: 01.08.2022 [Zugriff am: 05.08.2022]. In: esi-group.com. Verfügbar unter s.fhg.de/R7B
- Fabry 2016 FABRY, Götz: *Wie können wir Lehrqualität messen?* In: Rudolf Egger und Marianne Merkt (Hrsg.): *Teaching Skills Assessments*. Bd. 42. Wiesbaden: Springer, 2016, S. 73-90.
- Farshid et al. 2018 FARSHID, Mana; PASCHEN, Jeannette; ERIKSSON, Theresa; KIETZMANN, Jan: *Go boldly! Explore augmented reality (AR), virtual reality (VR), and mixed reality (MR) for business*. In: *Business Horizons* 61 (5) (2018), S. 657-663.
- Hippel et al. 2019 HIPPEL, Aiga von; KULMUS, Claudia; STIMM, Maria: *Didaktik der Erwachsenen- und Weiterbildung*. Stuttgart: UTB, 2019.
- Kaminska et al. 2017 KAMINSKA, Dorota; SAPINSKI, Tomasz; AITKEN, Nicola; DELLA Rocca, Andreas; BRANSKA, Maja; WIETSMA, Remco: *Virtual Reality as a Tool in Mechatronics Education*. In: IEEE Xplore (Hrsg.): *18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts*. Lodz, Polen: IEEE Xplore, 2017.

- Kron et al. 2014 KRON, Friedrich W.; JÜRGENS, Eiko; STANDOP, Jutta: *Grundwissen Didaktik*. 6. Aufl. Stuttgart: UTB, 2014.
- Langer 2020 LANGER, Elle: *Medieninnovationen AR und VR. Erfolgsfaktoren für die Entwicklung von Experiences*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020.
- Maresky et al. 2019 MARESKEY, H. S.; OIKONOMOU, A.; ALI, I.; DITKOFKY, N.; PAKKAL, M.; BALLYK, B.: Virtual reality and cardiac anatomy: Exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education. In: *Clinical anatomy* 32 (2) (2019), S. 238-243.
- Persike 2019 PERSIKE, Malte: *Virtual and Augmented Reality in der Hochschullehre* [Vortrag]. Veröffentlicht am 01.10.2019 [Zugriff am: 12.08.2020]. In: *Lehren und Lernen an der Hochschule, 2018-2020*. Berlin: FU Berlin, 2019. Verfügbar unter: s.fhg.de/M7c
- Riener 2015 RIENER, Robert (2015): Virtual reality for neurorehabilitation. In: Volker Dietz (Hrsg.): *Oxford textbook of neurorehabilitation*. Oxford: Oxford University Press, S. 418-439.
- Rüdiger 2021 RÜDIGER, Torsten: *Unterstützung der Lehre durch die virtuelle Realität: Untersuchungen und Best Practice Beispiele*. Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Bachelorarbeit, 2021.
- Russell 2017 RUSSELL, Kendall: *Lockheed Martin on Cutting Costs with Virtual Reality*. Veröffentlicht am 20.04.2017 [Zugriff am 26.10.2020]. In: *Via Satellite: Satellite Today: Category: Innovation*. Verfügbar unter: s.fhg.de/27B
- Sampaio et al. 2010 SAMPAIO, A. Z.; FERREIRA, M. M.; ROSÁRIO, D. P.; MARTINS, O. P.: CAD and VR Technologies Used in Civil Engineering Education. In: Yuhua Luo (Hrsg.): *Cooperative design, visualization, and engineering. 7th international conference, CDVE 2010, Bd. 6240*. Berlin: Springer, 2010, S. 207-210.
- Shaviro 2007 SHAVIRO, Steven: *The Pinocchio Theory. Kant, Deleuze and the virtual*. Veröffentlicht am: 09.05.2007 [Zugriff am: 11.08.2022]. In: Shaviro.com. Verfügbar unter s.fhg.de/Kp6
- Tallig et al. 2017 TALLIG, Gregor; ZENDER, Raphael; RUNGE, Mario: *Frameworkbasiertes Augmented Reality-Lernszenario in der Kfz-Ausbildung*. In: CEUR Workshop Proceedings (Hrsg.): *Proceedings of DeLFIand GMW Workshops 2017*. Chemnitz: DeLFI and GMW Workshops, 05.09.2017.
- Tan 2022 TAN, Weizhen: *How a Russian invasion of Ukraine, the 'breadbasket of Europe', could hit supply chains*. Veröffentlicht am 23.02.2022 [Zugriff am: 06.09.2022]. In: CNBC: Europe Economy. [CNBC.com](https://www.cnbc.com). Verfügbar unter s.fhg.de/YAY
- VDI 2221 2019 Norm VDI 2221 Blatt 1 November 2019. Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung.
- Zavalani und Spahiu 2012 ZAVALANI, Orion; SPAHIU, Aida: Use curiosity for virtual reality "as a hook" in the engineering education. In: IEEE Xplore (Hrsg.): *2012 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*. New York: IEEE, 2012, S. 1-4.
- Zhang 2020 ZHANG, Jingyi: Support for studential product development process with the aid of VR/AR application. In: Spath, Dieter (Hrsg.); Winter, Dominique (Hrsg.): *StuFoKon - Studentische Forschungskonferenz 11. Dezember 2020. Konferenzband*, Stuttgart: Universität Stuttgart IAT, 2020.
- Zinn 2019 ZINN, Bernd: Editorial: Lehren und Lernen zwischen Virtualität und Realität. In: *Journal of Technical Education (JOTED)* (2019), Nr. 7-1, S. 16-31.

Automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen zur Wirkkettenmodellierung

Automated Dependency Analysis of Requirements for Effect Chain Modelling

Iris Gräßler¹, Daniel Preuß¹

¹Universität Paderborn / Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, Paderborn
daniel.preuss@hni.upb.de

Abstract (deutsch): Die Wirkkettenmodellierung ist eine Methode zur Erstellung von Informationsmodellen für Auswirkungsanalysen von Änderungen der Systemelemente. Für die Abschätzung der Änderungsfortpflanzung müssen Abhängigkeiten zwischen Anforderungen erkannt werden. Die hohe Anzahl an Anforderungsabhängigkeiten in der Entwicklung komplexer technischer Systeme resultiert in dem Erfordernis einer Automatisierung. In einer Studie wurde erkannt, dass Transformer-Modelle (BERT) für die automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen geeignet sind. Aktuell bestehen jedoch Defizite in der Anwendbarkeit der Modelle für verschiedene Projekte ohne umfangreiche und heterogene Trainingsdatenbasis. In diesem Beitrag wird untersucht, wie aktives Lernen zum Training von BERT-Modellen (active-BERT) genutzt werden kann, um die Leistungsfähigkeit der Modelle zur Klassifizierung von Anforderungsabhängigkeiten von Projekten mit heterogenen Anforderungsdaten zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeit der Modelle durch aktives Lernen deutlich zunimmt. Durch active-BERT werden Ingenieure befähigt, Wirkketten effizient zu modellieren und Anforderungsänderungen effektiv zu handhaben.

Keywords (deutsch):

Anforderungsentwicklung, Künstliche Intelligenz, Komplexe technische Systeme, Wirkkettenmodellierung, Model-Based Systems Engineering

Abstract (english): Effect chain modelling is a method for creating information models for impact analyses of changes in system elements. For the estimation of change propagation, dependencies between requirements must be detected. The high number of requirement dependencies in the engineering of complex technical systems results in the need for automation. In a study, it was shown that transformer models (BERT) are suitable for the automated dependency analysis of requirements. However, there are currently deficits in the applicability of the models for different projects without an extensive and heterogeneous training database. This paper investigates how active learning can be used to train BERT models (active-BERT) in order to increase the performance of the models for classifying requirement dependencies of projects with heterogeneous requirements. The results show that the performance of the models increases significantly through active learning. Through active-BERT, engineers are enabled to model effect chains efficiently and to handle requirement changes effectively.

Keywords (english):

Requirements Engineering, Artificial Intelligence, Complex technical systems, Effect chain modelling, Model-Based Systems Engineering

1 Motivation und Zielsetzung

In der Entwicklung komplexer technischer Systeme besteht nach Chamas und Paetzold (2018) eine hohe Anzahl von Wechselwirkungen zwischen Systemelementen. Alle Systemelemente besitzen ihre eigenen Artefakte wie z. B. Anforderungen. Aufgrund von Anforderungsabhängigkeiten haben Änderungen an Anforderungen nicht nur unmittelbare Auswirkungen auf die Systemelemente, sondern propagieren innerhalb des Gesamtsystems und führen nach Eger et al. (2007) zu steigenden Kosten des Projekts. Die Wirkkettenmodellierung ist eine Methode, ein Informationsmodell für die Identifikation von Ursache-Wirk-Zusammenhängen aufzubauen und deren Auswirkungen zu analysieren (Gräßler et al. 2022a). Hierbei werden Artefakte – Anforderungen, Funktionen, logische und physische Elemente – miteinander verknüpft und eine Rückverfolgbarkeit hergestellt (Gräßler und Oleff 2022; Gräßler et al. 2022b). Aktuell müssen diese Abhängigkeiten zwischen den Artefakten, z. B. Anforderungsabhängigkeiten, für die Wirkkettenmodellierung manuell analysiert werden (Gräßler et al. 2022c). Aufgrund des hohen manuellen Aufwands werden Abhängigkeitsanalysen von Anforderungen in der Praxis häufig nicht durchgeführt (Hein et al. 2018; Oleff 2022). Daher ist im Kontext der Wirkkettenmodellierung eine automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen notwendig. In diesem Beitrag wird das Artefakt „Anforderungen“ fokussiert betrachtet.

In einer Studie von Gräßler et al. (2022d) wurde gezeigt, dass sich das Transformer-Modell BERT, welches auf Künstlicher Intelligenz (KI) basiert, für die automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen eignet. Jedoch besteht ein Defizit hinsichtlich der Anwendung dieses Modells in der industriellen Praxis. Die Leistungsfähigkeit des BERT-Modells nimmt deutlich ab, wenn die zu klassifizierenden Anforderungsabhängigkeiten sich von den Trainingsdaten des Modells stark unterscheiden. Stattdessen ist es erforderlich, dass Anforderungsabhängigkeiten, die heterogen zu den Trainingsdaten sind, effizient mit einer hohen Leistungsfähigkeit klassifiziert werden. Aktives Lernen ist eine Form des maschinellen Lernens, die nach Deshpande et al. (2020) für die aufwandsarme Klassifizierung von Daten aus heterogenen Projekten besonders relevant ist. Bei diesem Lernverfahren wird interaktiv Rückmeldung eines Orakels (bzw. eines menschlichen Experten) durch einen Algorithmus eingeholt, um die gewünschte Kennzeichnung für neue Daten effizient zu erhalten (Settles 2009) In diesem Beitrag wird die Forschungsfrage beantwortet: " wie hoch ist die Leistungsfähigkeit von BERT-Modellen, die mit aktivem Lernen trainiert worden sind, in der Klassifizierung von heterogenen Anforderungsdatensätzen?".

2 Wissenschaftliches Vorgehen

Das wissenschaftliche Vorgehen besteht in Anlehnung an Ulrich (1981) aus fünf Schritten. Im ersten Schritt werden praxisrelevante Probleme identifiziert. Zu diesem Zweck wird eine Literaturrecherche durchgeführt und Erkenntnisse aus **311 Workshops** mit 234 Experten zu 102 Systemen innerhalb eines Projekts zur Wirkkettenmodellierung mit einem deutschen Automobilhersteller genutzt (Gräßler et al. 2022a). Im zweiten Schritt werden problemrelevante Vorgehensweisen spezifiziert. Es werden Ergebnisse aus einer Studie konsolidiert, in der bereits BERT-Modelle zur Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen verwendet worden sind. Auf dieser Basis wird im dritten Schritt der Forschungsbedarf konkretisiert, indem Erfolgsfaktoren für die automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen abgeleitet werden. Unter Verwendung der Ergebnisse aus der Literaturrecherche und unter Berücksichtigung der Erfolgsfaktoren wird im vierten Schritt die Methode zur Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen mittels BERT und aktivem Lernen („active-BERT“) entwickelt. Die Entwicklung der Methode wurde im Rahmen des BMWK geförderten Projekts BIKINI (bikini-projekt.de) durchgeführt. Im letzten Schritt wird die Methode im Rahmen eines Fallbeispiels mit Anforderungsdaten von technischen Produkten (intelligenter Knickarmroboter „BCN3D Moveo“, elektrische Gewürzmühle und Toaster) validiert. Dazu wird die Leistungsfähigkeit von BERT-Modellen, die mit aktivem Lernen trainiert wurden, für die Klassifizierung von heterogenen Anforderungsdaten mehrerer Projekte untersucht. Das Vorgehen wird in Bild 1 visualisiert.

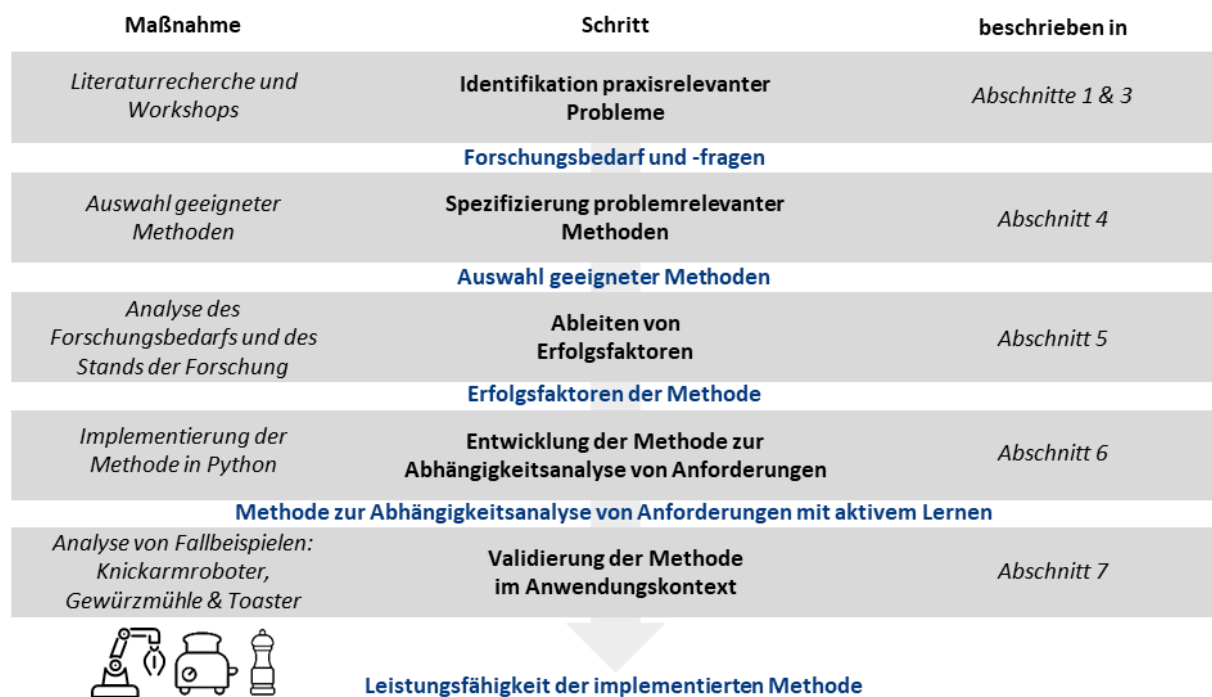


Bild 1: Methodik für anwendungsbezogene Wissenschaften auf der Grundlage von Ulrich (1981)

3 Wirkkettenmodellierung

Eine aktuelle Herausforderung in der Entwicklung von Automobilen besteht darin, dass Fahrzeughersteller aufgrund der UN-ECE R156 (2021) Regularie verpflichtet sind, die Auswirkungen von technischen Änderungen auf Softwarekomponenten nachvollziehen zu können (Gräßler et al. 2022a). Durch die Wirkkettenmodellierung wird ein Informationsmodell erstellt, welches für die Bewertung von Auswirkungen von Änderungen verwendet werden kann. In diesem Informationsmodell werden Modellelemente wie „Regularien“, „Komponenten“ und „Anforderungen“ mittels Relationen verknüpft. Ein Problem in der Wirkkettenmodellierung besteht darin, dass die detaillierte Modellierung bestimmter Artefakte aufwändig ist (Piques und Andrianarison 2012). Dies betrifft unter anderem das Umgebungsartefakt „Regularien“. In Regularien werden bestimmte Anforderungen an Automobile gestellt. Innerhalb eines Projekts zur Wirkkettenmodellierung mit einem deutschen Automobilhersteller (Gräßler et al. 2022a) wurde von Praktikern berichtet, dass Regularien aktuell lediglich als Klasse „Regularie“ mit den Instanzen auf Regularien-Ebene – z. B. „UN/ECE R26“ – angelegt werden. Dieser niedrige Detailgrad wurde aufgrund des Aufwands zur Extrahierung und Klassifizierung der Anforderungen aus den Regularien gewählt. Falls eine technische Änderung auftritt, ist nicht direkt ersichtlich, ob die Anforderungen der Regularien weiterhin erfüllt sind. Ein Mehrwert für die Produktentwicklung besteht darin, die Anforderungen, welche in den Regularien dokumentiert sind, direkt mit den Entwicklungsartefakten zu verknüpfen. Außerdem ist eine Verknüpfung der Anforderungen aus den Regularien mit Entwicklungsartefakten notwendig, um effizient zu prüfen, ob sämtliche Anforderungen in der Entwicklung des Automobils berücksichtigt worden sind. Die Elemente der Wirkkette entlang RFLPV (Gräßler et al. 2022b) müssen die Anforderungen erfüllen und sind mit ihnen verknüpft. Der RFLPV-Ansatz wird durch die wichtigsten Artefakte des Systems Engineering definiert: Anforderungen (R), Funktionen (F), logische Elemente (L), physikalische Elemente (P) und Verifikations-Artefakte (V). Durch eine Verknüpfung der Anforderungen aus Regularien mit den Anforderungen innerhalb der Wirkkette (siehe „Entwicklungsartefakte“ in Bild 2) werden aufgrund der durchgängigen Modellierung die Auswirkungen von technischen Änderungen deutlich (Gräßler und Yang 2016). Zur Verknüpfung der Anforderungen innerhalb der Wirkkette mit den Anforderungen aus Regularien müssen

Abhängigkeiten dieser Anforderungen bekannt sein. Aufgrund der hohen Anzahl an Regularien und deren Anforderungen sowie der hohen Anzahl an Anforderungen innerhalb der Wirkkette, ist eine manuelle Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen aufwändig.

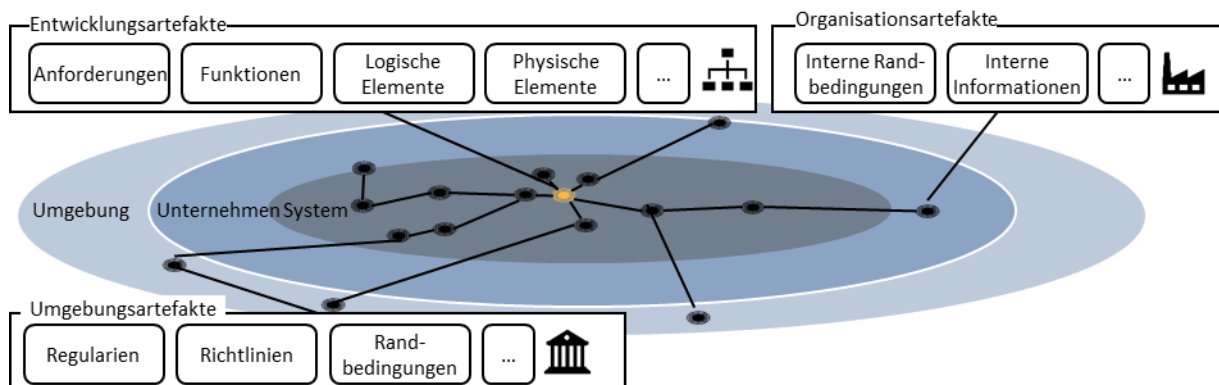


Bild 2: Wirkkettenmodellierung (Gräßler et al. 2022a)

4 Stand der Forschung

Zur Ermittlung des Stands der Forschung zur Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen werden Ergebnisse einer Studie zur Anwendung der automatisierten Abhängigkeitsanalyse konsolidiert. Außerdem wird aktives Lernen als Ansatz zur Reduzierung von Aufwand in der Erstellung eines heterogenen Trainingsdatensatzes aufgezeigt.

4.1 Automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen

In der Literatur existieren verschiedene Arten von Ansätzen zur Analyse von Anforderungsabhängigkeiten (Gräßler et al. 2020). In Ansätzen des maschinellen Lernens (Deshpande et al. 2019; Atas et al. 2018; Samer et al. 2019), werden KI-Modelle durch überwachtes Lernen trainiert. Die Eingabe ist die textuelle Beschreibung der Anforderungen. Die Ausgabe ist die Klassifizierung der Art der Abhängigkeit zwischen Anforderungen und wird automatisch berechnet. Beim überwachten Lernen wird die Ausgabe durch den Experten für das Training bewertet. Ein Nachteil ist, dass zum Trainieren der KI-Modelle eine große Anzahl an heterogenen Daten benötigt wird. Wenn sich die Trainingsdaten des Modells stark von den zu klassifizierenden Daten unterscheiden (z. B. Produkt aus anderer Domäne), dann ist die Leistungsfähigkeit des Modells niedrig (Deshpande et al. 2019).

4.2 Studie zur automatisierten Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen

Zur Untersuchung des Anwendungszusammenhangs wurde von Gräßler et al. (2022d) eine Studie zum proaktiven Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme durchgeführt. Als Teil dieser Studie wurde auch die Anwendung der automatisierten Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen untersucht (Gräßler et al. 2022c). Das von Vaswani et al. (2017) entwickelte BERT erzielt in verschiedenen Anwendungskontexten gute Ergebnisse, weshalb dieser Ansatz des maschinellen Lernens in der Studie betrachtet worden ist. Innerhalb der Studie wurde ein initialer Vergleich mit verschiedenen Ansätzen (z. B. „Support Vector Machine“) durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit von BERT für die Abhängigkeitsanalyse zu ermitteln. Kriterien für den Vergleich sind die Präzision (engl. „Precision“), die Sensitivität (engl. „Sensitivity“) und der F1-Wert. Die Präzision gibt die Anzahl der vorhergesagten richtig positiven Ergebnisse im Vergleich zu den richtig und falsch positiven Klassen an. Die Sensitivität gibt den Anteil der richtig-positiv klassifizierten Ergebnisse an den gesamten positiven Ergebnissen an. Der F1-Wert ist das harmonische Mittel zwischen Präzision und Sensitivität und bewertet die Gesamtqualität des

Modells (Alpaydin 2022). BERT erreicht in der Studie die höchste Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den anderen Ansätzen (**F1-Wert: 55,12 %**). Während der Studie wurde auch die Transferfähigkeit des BERT-Modells für die Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen untersucht. KI-Modelle besitzen eine hohe Transferfähigkeit, wenn Daten aus unterschiedlichen Projekten mit einer hohen Leistungsfähigkeit klassifiziert werden können. In der industriellen Praxis sollen Daten aus heterogenen Projekten mit einer hohen Leistungsfähigkeit klassifiziert werden und gleichzeitig der Aufwand zum Training der Modelle gering sein. Aus diesem Grund ist diese Untersuchung besonders wichtig, um die Anwendbarkeit der Modelle zu bewerten. Es wurde ein Fallbeispiel von vier Studentenprojekten zur Entwicklung von Elektrowerkzeugen (z. B. Akkuschauber) untersucht. Die Anforderungen dieser Studentenprojekte wurden in der Studie mit Hilfe des BERT-Modells analysiert, das mit Daten des BCN3D Moveo feinabgestimmt worden ist. "Keine" Abhängigkeiten werden mit einer hohen Leistungsfähigkeit klassifiziert (F1-Wert: 92,67 %), während "**abhängige**" Anforderungen mit einer niedrigen Leistungsfähigkeit klassifiziert werden (**F1-Wert: 1,7 %**). Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Leistungsfähigkeit des BERT-Modells niedrig ist, wenn das Modell nicht mit den Daten aus demselben Projekt (oder einer heterogenen Trainingsdatenbasis) feinabgestimmt wird.

4.3 Aktives Lernen

Aktives Lernen hat sich als effektiv erwiesen, um den manuellen Aufwand bei der Datenanalyse und der Generierung von Trainingsdaten zu reduzieren (Arora et al. 2019). Es existieren mehrere Abfragestrategien, um auszuwählen, welche Daten durch einen Experten gekennzeichnet werden sollen (Settles 2009). Beispielsweise werden bei der Verwendung von „Least Confidence Uncertainty Sampling“ die Daten mit der höchsten Unsicherheit in der Klassifizierung durch den Experten für die Kennzeichnung ausgewählt (Settles 2009). Das bedeutet, dass nur eine Teilmenge der Daten aus neuen Projekten vom Experten manuell klassifiziert werden muss. Bisher wurde aktives Lernen im Zusammenhang mit der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen unter Verwendung von Ontologien und maschinellem Lernen validiert (Deshpande et al. 2020). Die Autoren haben die Klassifizierung von Anforderungsabhängigkeiten in heterogenen Projekten nicht bewertet. Somit ist unklar, ob sich aktives Lernen für diesen Anwendungsfall eignet. Die fehlende Eignungsprüfung wird daher in diesem Beitrag vorgenommen. Das Training von BERT Modellen durch aktives Lernen bietet durch die systematische Generierung eines Trainingsdatensatzes großes Potenzial: dem Experten werden die Daten zur manuellen Kennzeichnung vorgelegt, welche die größte Unsicherheit in der Klassifizierung besitzen. Ein-Dor et al. (2020) haben gezeigt, dass aktives Lernen die Leistungsfähigkeit von BERT-Modellen besonders in realistischen, bzw. anwendungsnahen Szenarien verbessert.

5 Erfolgsfaktoren

Aus den Workshops zur Wirkkettenmodellierung (Abschnitt 3), der Literaturrecherche und der Studie zur Abhängigkeitsanalyse (Abschnitt 4) wurden sechs Erfolgsfaktoren für die Methode zur Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen ermittelt (siehe Tabelle 1). Die Erfolgsfaktoren werden in Anlehnung an Hamraz et al. (2013) in die Kategorien "Eingabe", "Modellnutzung" und "Ausgabe" eingeteilt. Die Methode muss in der Lage sein, Anforderungen in natürlicher Sprache zu verarbeiten (EF 1). Die Anforderungsbeschreibungen müssen nicht konform zu einem festen Schema sein (z. B. Vorlagen von Rupp (2016)), da in der Entwicklungspraxis vielfach kein festes Schema bei der Dokumentation eingehalten wird (Gräßler et al. 2016; Gräßler et al. 2018). Die Sprache der Anforderungen muss Englisch sein (EF 2). Englischsprachige Anforderungen werden festgelegt, weil die Verfügbarkeit englischsprachiger Daten höher ist als deutschsprachiger Daten. Besonders aufgrund domänenspezifischer Begriffe werden für die gewählte Sprache eine ausreichend große Anzahl an Daten benötigt. Der Aufwand zur Anwendung der Methode muss niedrig sein (EF 3). Die für die Anwendung der Methode erforderlichen Informationen müssen in einer dem Industriestandard entsprechenden Weise zur Verfügung stehen (z. B. darf nur eine in der Praxis verfügbare Anzahl an

Trainingsdaten erforderlich sein), damit sie in der Industrie angewendet werden kann (EF 4). Die Leistungsfähigkeit der Methode muss bei der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen aus heterogenen Projekten hinreichend genau sein (EF 5). Die Anforderungsabhängigkeiten müssen in einem gängigen Austauschformat ausgegeben werden (EF 6), sodass sie aufwandsarm in etablierte Anforderungsmanagement-Werkzeuge (z. B. IBM DOORS) importiert werden können.

Tabelle 1: Erfolgsfaktoren der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen

ID	Kategorie	Erfolgsfaktor
EF 1	Eingabe	Verarbeitung natürlich-sprachlicher Anforderungen
EF 2	Eingabe	Verarbeitung englischer Anforderungen
EF 3	Modellnutzung	Niedriger Anwendungsaufwand
EF 4	Modellnutzung	Verwendung branchenüblicher Informationen
EF 5	Ausgabe	Klassifizierung heterogener Daten mit hoher Leistungsfähigkeit
EF 6	Ausgabe	Gängiges Austauschformat

6 Automatisierte Abhängigkeitsanalyse durch active-BERT

Die Abhängigkeitsanalyse mittels BERT („bert-base-uncased“ Modell von huggingface.co zur Verarbeitung englischsprachiger Textdaten) wird durch aktives Lernen erweitert (active-BERT), um die Leistungsfähigkeit der Klassifizierung neuer Daten der Modelle zu verbessern. Das Vorgehen besteht aus den vier Schritten: Datenvorbereitung, initiales Training, aktives Lernen und Klassifizierung (siehe Bild 3). In der **Datenvorbereitung** werden Anforderungspaare aus den Anforderungsdaten (z. B. Lasten-/Pflichtenheft im Anforderungsmanagement-Werkzeug) gebildet und eine „Tokenisierung“ durchgeführt. Im Folgenden werden exemplarisch zwei Anforderungen (A1 und A2) betrachtet, um das Vorgehen zu erläutern. A2 ist in der UN-ECE R11 Regularie definiert. Zur Verbesserung der Lesbarkeit werden die Anforderungen A1 und A2 in diesem Beitrag auf Deutsch dargestellt. In den Untersuchungen wurden englischsprachige Anforderungen verwendet.

- A1: „Das Türmodul ist so auszulegen, dass seine volle Funktionsfähigkeit für mindestens 15 Jahre oder mindestens 200.000 km gewährleistet ist.“
- A2: „Jedes Haupt-Türverschlusssystem und jedes zusätzliche Türverschlusssystem müssen in der voll eingerasteten Stellung einer Kraft von 11 000 N standhalten.“

Zur Bildung der Anforderungspaare werden die natürlich-sprachlichen Anforderungsbeschreibungen miteinander verkettet. Beispiel für das Anforderungspaar „A1+A2“: „*Das Türmodul ist so auszulegen, dass seine volle Funktionsfähigkeit für mindestens 15 Jahre oder mindestens 200.000 km gewährleistet ist. Jedes Haupt-Türverschlusssystem und jedes zusätzliche Türverschlusssystem müssen in der voll eingerasteten Stellung einer Kraft von 11 000 N standhalten.*“ Im nächsten Schritt werden die Wörter in den Anforderungspaaren „tokenisiert“. Der gesamte Ausdruck (bzw. „String“) des Anforderungspaars wird heruntergebrochen in einzelne Strings pro Wort. Beispiel: *|Türmodul|*, *|Funktionsfähigkeit|* und *|gewährleistet|* sind Tokens aus dem Anforderungspaar. Während des **initialen Trainings** wird das BERT-Modell mit Anforderungsdaten trainiert („Fine-Tuning“). Die Trainingsdaten sind Daten aus vergangenen Projekten, für die Anforderungsabhängigkeiten (Unterscheidung in „abhängige“ und „nicht abhängige“ Anforderungen) bekannt sind. Die tokenisierten Anforderungspaare werden vektorisiert. Die natürlich-sprachlichen Tokens werden durch den Trainings-Algorithmus in eine mathematische Darstellung überführt, um für die Klassifizierung der Abhängigkeiten verarbeitbar zu werden. Im Schritt **aktives Lernen** werden iterativ Anforderungspaare ausgewählt, die manuell vom Orakel, in diesem Fall von Entwicklern gekennzeichnet werden müssen. Die Auswahl der Anforderungspaare erfolgt unter Anwendung der „poolbasierten Stichprobentechnik“ (Settles 2009). Aus der Menge der zu klassifizierenden Anforderungspaare werden die manuell zu kennzeichnenden Daten mittels „Least Confidence

Uncertainty Sampling“ bestimmt (Settles 2009). Das sind die Daten mit der höchsten Unsicherheit der Klassifizierung, welche durch das BERT-Modell berechnet wird. In jeder Iteration werden dem Orakel eine bestimmte Anzahl der Daten mit der höchsten Unsicherheit angezeigt und das Orakel kennzeichnet diese Daten manuell (Deshpande et al. 2020). Die gekennzeichneten Daten werden der Menge der Trainingsdaten hinzugefügt. Während des Schritts Training & Evaluation wird das BERT-Modell mit den Trainingsdaten fein abgestimmt. Diese Trainingsdaten beinhalten die unsichersten Daten sowie die initialen Trainingsdaten. Anschließend wird das BERT-Modell getestet und es werden Kennzahlen berechnet, um die Leistungsfähigkeit des Modells zu bewerten. Hierzu wird der F1-Wert ermittelt. Wenn die Änderung vom F1-Wert für eine bestimmte Anzahl an Iterationen unter einem definierten Wert liegt, dann wird das aktive Lernen beendet (Abbruchbedingung). In der **Klassifizierung** werden sämtliche verbleibende Anforderungspaare durch das BERT-Modell hinsichtlich Abhängigkeit automatisiert klassifiziert. Die Klassen sind „abhängig“ und „nicht abhängig“. Die Richtung der Abhängigkeit wird nicht differenziert. Im Kontext des Anwendungsbeispiels werden A1 und A2 als „abhängig“ klassifiziert, weil das Türverschlusssystem der geforderten Kraft standhalten muss, um eine Lebensdauer von 15 Jahren zu gewährleisten. Für die weitere Verwendung der Ergebnisse wird der Output des BERT-Modells in ein geeignetes Datenformat transformiert (CSV). Dadurch wird eine interpretierbare Darstellung der Anforderungen und ihrer Abhängigkeiten erstellt. active-BERT wird mittels „small-Text“ von Schröder et al. (2021) in Python implementiert.

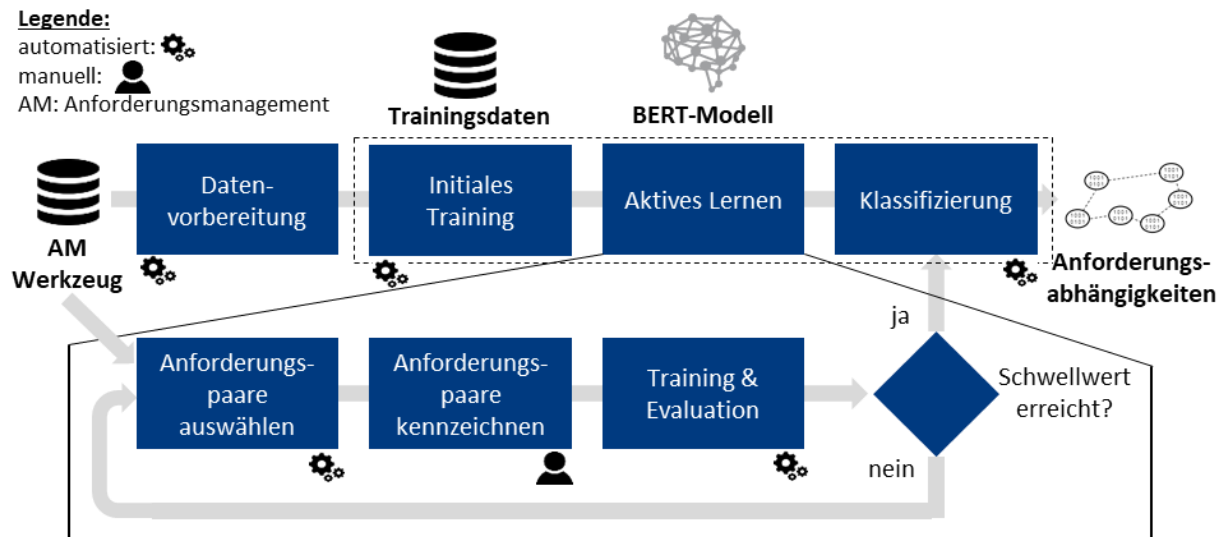


Bild 3: Automatisierte Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen mit active-BERT

7 Validierung

Zur Validierung der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen wird untersucht, wie hoch die Leistungsfähigkeit von active-BERT für die Klassifizierung von Daten aus heterogenen Projekten ist (Untersuchung 1). Außerdem wird der Einfluss einer heterogenen Datenbasis im initialen Training auf die Leistungsfähigkeit von active-BERT gemessen (Untersuchung 2). Hierzu werden Anforderungsdaten der technischen Produkte „intelligenter Knickarmroboter“ (BCN3D Moveo), „Toaster“ und „elektrische Gewürzmühle“ verwendet. Die Anforderungsdaten des intelligenten Knickarmroboters wurden erstellt, indem Dokumente des Entwicklungsprojekts BCN3D Moveo (inklusive der Norm zur funktionalen Sicherheit DIN EN ISO 13849-1 (2021)) analysiert sowie ein Prototyp gefertigt und montiert worden ist (Gräßler et al. 2022d). Insgesamt wurden 99 Anforderungen aufgenommen und deren Abhängigkeiten (4900) ermittelt. Von 66 Studenten der Master-Maschinenbau Lehrveranstaltung „Produktentstehung“ wurde jeweils eine Anforderungsliste zu einer elektrischen Gewürzmühle (insgesamt 34 Anforderungslisten) oder zu einem Toaster (insgesamt 32 Anforderungslisten) mit durchschnittlich 26 Anforderungen generiert. Insgesamt wurden von den

Studenten 1715 Anforderungen für die beiden Produkte aufgenommen: 837 Anforderungen für den Toaster und 878 Anforderungen für die Gewürzmühle. Zu jeder Anforderungsliste haben die Studierenden die Abhängigkeiten zwischen den Anforderungen bewertet (siehe Tabelle 2). Die Entwicklung von active-BERT wurde durch Experten im Kontext des BIKINI Projekts begleitet und die Ergebnisse wurden mit ihnen diskutiert.

Tabelle 2: Anforderungsdaten der Untersuchungen

Produkt	Anzahl Anforderungen	Anzahl Anforderungsabhängigkeiten
Intelligenter Knickarmroboter	99	4900
Elektrische Gewürzmühle	878	11050
Toaster	837	10040

7.1 Untersuchung 1: active-BERT zur Klassifizierung von Daten aus neuen Projekten

In der ersten Untersuchung wird active-BERT initial mit den Anforderungsabhängigkeiten des intelligenten Knickarmroboters trainiert. In der Schleife des aktiven Lernens werden die Daten der elektrischen Gewürzmühle iterativ zum Trainieren und Testen des BERT-Modells verwendet. Es wird untersucht, wie die Leistungsfähigkeit von active-BERT durch das aktive Lernen verändert wird. In jeder Iteration werden 1000 Daten (bzw. Samples) der elektrischen Gewürzmühle zum Trainingsset hinzugefügt, ein neues BERT-Modell trainiert und mit den gesamten Anforderungsabhängigkeiten der elektrischen Gewürzmühle getestet. Die Anforderungsdaten, die zum Trainingsset hinzugefügt werden, werden mittels „Least-Confidence Uncertainty Sampling“ bestimmt. Insgesamt werden zehn Iterationen durchgeführt und die Kennzahlen Präzision, Sensitivität und der F1-Wert berechnet (siehe Bild 4). In der Iteration 0 wurde die Schleife des aktiven Lernens nicht initiiert. Dieses Modell wurde vollständig mit den Anforderungsdaten des intelligenten Knickarmroboters trainiert.

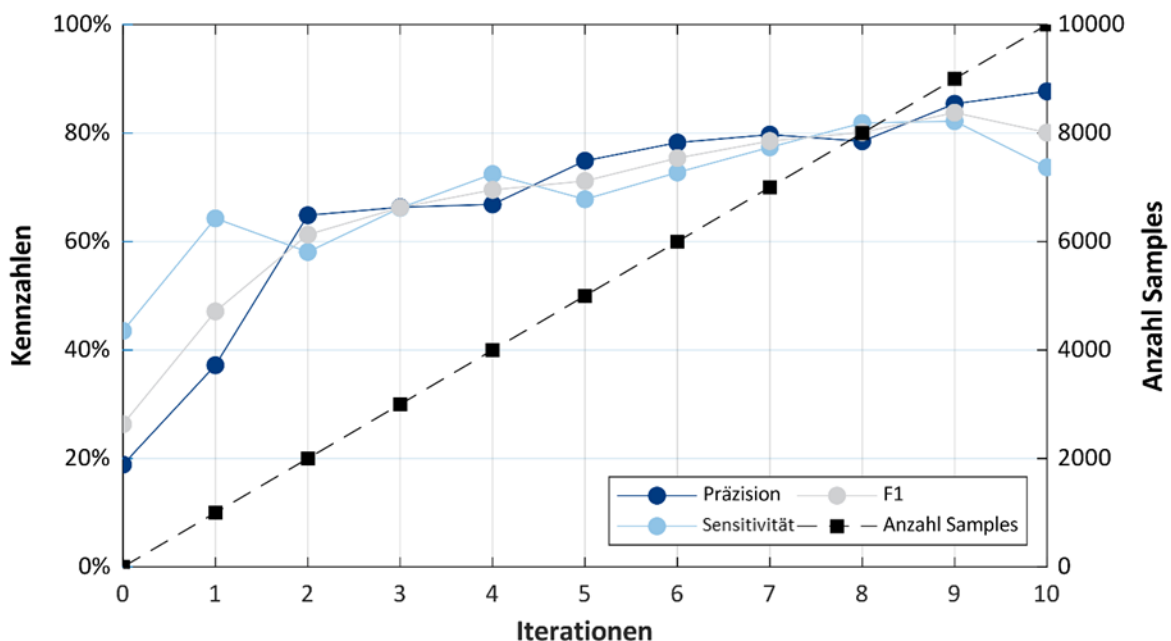


Bild 4: Ergebnisse der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen mittels active-BERT für die Klassifizierung von Daten aus neuen Projekten

Durch das aktive Lernen ist die Leistungsfähigkeit des BERT-Modells deutlich gestiegen (F1-Wert Iteration 0: 26,32 % vs. **F1-Wert Iteration 10: 80,09 %**). Bereits nach einer Iteration ist eine Steigerung des F1-Werts von +20,08 % erfolgt. Nach Iteration 7 ändert sich der F1-Wert nur noch geringfügig und beträgt 78,54 %. Für Iteration 7 mussten vom Orakel insgesamt 7000 Anforderungsabhängigkeiten gekennzeichnet werden. Im Vergleich dazu mussten für Iteration 10 bereits 10000 Anforderungsabhängigkeiten gekennzeichnet werden und der F1-Wert steigt um weniger als 2 % an.

7.2 Untersuchung 2: active-BERT mit einer heterogenen Trainingsdatenbasis zur Klassifizierung von Daten aus neuen Projekten

In Untersuchung 2 wird der Einfluss einer heterogenen Datenbasis im initialen Training von active-BERT untersucht. Das Modell wird initial mit jeweils 2450 Anforderungsabhängigkeiten des intelligenten Knickarmroboters und des Toasters trainiert. Die Summe der Anzahl an Daten der Produkte (4900) entspricht der Anzahl an Daten, die in Untersuchung 1 für das initiale Training verwendet worden sind. Im aktiven Lernen werden ebenfalls Daten der elektrischen Gewürzmühle zum Training und zum Testen ausgewählt. Es werden die Kennzahlen analog berechnet. Weitere Randbedingungen aus Untersuchung 1 wurden beibehalten. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt.

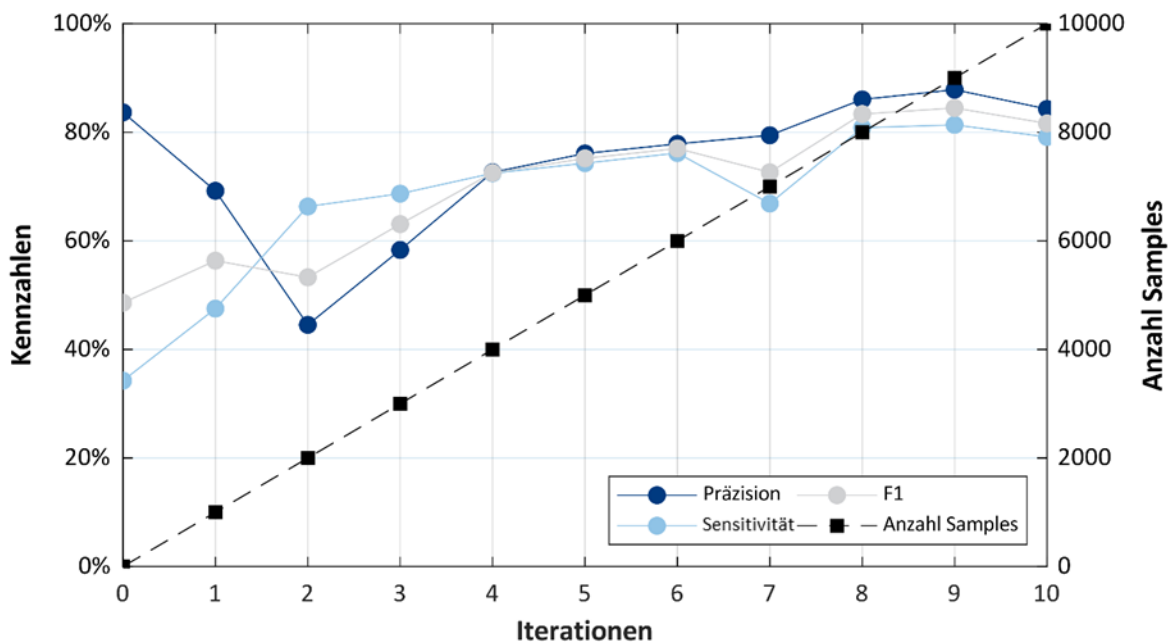


Bild 5: Ergebnisse der Abhängigkeitsanalyse von Anforderungen mittels active-BERT mit einer heterogenen Trainingsdatenbasis für die Klassifizierung von Daten aus neuen Projekten

Die Leistungsfähigkeit des BERT-Modells steigt durch das aktive Lernen an (F1-Wert Iteration 0: 48,60 % vs. **F1-Wert Iteration 10: 81,63 %**). Im Vergleich zu Untersuchung 1 wird deutlich, dass durch die heterogene Datenbasis der Einfluss des aktiven Lernens geringer ist. Die Leistungsfähigkeit des BERT-Modells ohne aktives Lernen ist deutlich höher als in Untersuchung 1 (F1-Wert Untersuchung 2 Iteration 0: 48,60 % vs. F1-Wert Untersuchung 1 Iteration 0: 26,32 %). Nach zehn Iterationen erreicht active-BERT bei beiden Untersuchungen eine ähnlich hohe Leistungsfähigkeit (F1-Wert Untersuchung 1 Iteration 10: 80,08 % vs. F1-Wert Untersuchung 2 Iteration 10: 81,63 %).

7.3 Fazit

Durch das aktive Lernen nimmt die Leistungsfähigkeit von BERT-Modellen in der Klassifizierung von Daten aus neuen Projekten deutlich zu. Besonders für den Fall einer homogenen Trainingsdatenbasis (Anforderungsdaten von nur einem Produkt – Untersuchung 1) wurde durch das aktive Lernen nach

zehn Iterationen eine **Steigerung des F1-Werts von +53,76 %** erzielt. Für eine heterogene Datenbasis mit Daten von verschiedenen Produkten (Untersuchung 2) nimmt die Leistungsfähigkeit nach zehn Iterationen nur um +33,04 % zu. Durch die heterogene Datenbasis und der ähnlichen Domäne der Produkte (elektrische Gewürzmühle und Toaster sind aus der Domäne „Haushaltsgeräte“) sind mehr Trainingsdaten den Testdaten ähnlicher, woraus eine höhere Leistungsfähigkeit des BERT Modells ohne aktives Lernen (Iteration 0) resultiert. Nach einer bestimmten Anzahl an Iterationen (hier vier) nähern sich die F1 Werte für den Fall einer heterogenen und homogenen Datenbasis aneinander an. Dem Trainingsset werden im aktiven Lernen eine hohe Anzahl an Daten des neuen Produkts hinzugefügt, sodass das BERT Modell diese mit einer höheren Leistungsfähigkeit klassifizieren kann und der Einfluss durch die unterschiedlichen initialen Trainingsdaten abnimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass BERT-Modelle in der Klassifizierung von Daten aus heterogenen Projekten eine hohe Leistungsfähigkeit erreichen, wenn das Modell entweder mit aktivem Lernen trainiert worden ist, wobei eine bestimmte Anzahl der Daten von einem Entwickler gekennzeichnet werden muss oder die Datenbasis für das Training des Modells möglichst heterogen und ähnlich (zum Beispiel gleiche Domäne) der neuen Daten ausgewählt worden ist.

Erfüllung der Erfolgsfaktoren: Active-BERT verarbeitet natürlich-sprachliche Anforderungen, die keinem festen Schema bzw. Template entsprechen müssen (EF 1 erfüllt). Englischsprachige Anforderungen werden verarbeitet (EF 2 erfüllt). Der Aufwand zur Anwendung der Methode ist abhängig von der Anzahl an Daten, die durch den Experten gekennzeichnet werden müssen. Die Ergebnisse zeigen, dass nach ca. 4000 Samples eine hohe Leistungsfähigkeit (F1-Werte betragen bei beiden Untersuchungen ca. 70 %) erreicht worden ist. Für die Kennzeichnung von 4000 Anforderungsabhängigkeiten werden ca. 11,2 h benötigt (Gräßler et al. 2022d). Dieser Aufwand ist dennoch deutlich geringer als eine vollständige manuelle Kennzeichnung der Anforderungsabhängigkeiten. Beispielsweise wurden bei der Entwicklung einer Flugzeugturbine 700 Anforderungen ermittelt (Fernandes et al. 2015). Daraus resultieren 244650 potenzielle unidirektionale Anforderungsabhängigkeiten. Durch active-Bert müssen nur 4000 statt 244650 Anforderungsabhängigkeiten geprüft werden, was den Aufwand deutlich reduziert (EF 3 teilweise erfüllt). Für die Anwendung der Methode wird eine initiale Trainingsdatenbasis von Anforderungsabhängigkeiten (aus vergangenen Projekten) benötigt. In der Validierung wurden 4900 Anforderungsabhängigkeiten als Trainingsbasis verwendet. Der Aufwand zur Generierung dieser Datenbasis (ca. 13,7 h) ist akzeptabel, wenn berücksichtigt wird, dass die Methoden-Anwendung für verschiedene Projekte möglich ist (EF 4 erfüllt). Nach vier Iterationen wird in Untersuchung 1 ein F1 von 70 % erreicht. Anforderungsabhängigkeiten werden zu einem hohen Anteil korrekt erkannt (EF 5 teilweise erfüllt). Anforderungsabhängigkeiten werden im CSV-Format ausgegeben. Ein Import in Anforderungsmanagement-Werkzeuge wie IBM DOORS ist möglich (EF 6 erfüllt).

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Forschungsfrage beantwortet, wie hoch die Leistungsfähigkeit von BERT-Modellen, die durch aktives Lernen trainiert worden sind, für die Klassifizierung von Anforderungsabhängigkeiten aus neuen Projekten ist. Der Neuheitsgrad des Beitrags liegt in der Untersuchung der Leistungsfähigkeit von BERT mit aktivem Lernen für diesen Anwendungsfall. Hierzu wurde active-BERT entwickelt. Die Ergebnisse der Validierung zeigen, dass durch das aktive Lernen die Leistungsfähigkeit des BERT Modells für die Klassifizierung von Anforderungsabhängigkeiten aus neuen Projekten deutlich steigt. Nach vier Iterationen konnte beispielsweise eine absolute Steigerung des F1-Werts von +43,68 % erreicht werden (siehe Untersuchung 1). Durch active-BERT wird die automatisierte Abhängigkeitsanalyse in der industriellen Praxis ermöglicht. Ingenieure werden durch die Kenntnis von Abhängigkeiten befähigt, effizient Wirkketten zu modellieren, Anforderungsänderungen systematisch zu analysieren und Propagationseffekte von Änderungen zu bewerten. Zentrales Anwendungsfeld ist die Entwicklung komplexer technischer Systeme, wie beispielsweise in der Automobilindustrie, in der gefordert wird, dass Auswirkungen technischer

Änderungen auf Softwarekomponenten nachvollziehbar sein müssen. Die Limitationen der Anwendung des Ansatzes in der Praxis muss im Rahmen eines Industrieprojekts untersucht werden. Beispielsweise wurden in den Untersuchungen dieser Arbeit mehrere tausend Anforderungsabhängigkeiten durch das Orakel gekennzeichnet. In der industriellen Praxis muss die Kennzeichnung durch einen menschlichen Experten erfolgen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung innerhalb des Projekts BIKINI – Bionik und KI zur nachhaltigen Integration in der Produktentwicklung für einen ressourceneffizienten Leichtbau (03LB3018C).

Literaturverzeichnis

- Alpaydin 2022 ALPAYDIN, Ethem: *Maschinelles Lernen*. 3. Aufl., De Gruyter Oldenbourg, 2022.
- Arora et al. 2019 ARORA, C.; SABETZADEH, M.; NEJATI, S.; BRIAND, L.: An Active Learning Approach for Improving the Accuracy of Automated Domain Model Extraction. In: *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology* 28 (2019), Nr. 1.
- Atas et al. 2018 ATAS, Muesluem; SAMER, Ralph; FELFERNIG, Alexander: Automated Identification of Type-Specific Dependencies between Requirements. In: *International Conference on Web Intelligence (WI)*, 2018, S. 688–695.
- Chamas und Paetzold 2018 CHAMAS, Mohamad W.; PAETZOLD, Kristin: Modeling of Requirement-Based Effect Chains of Mechatronic Systems in Conceptual Stage. In: *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications* (2018).
- Deshpande et al. 2019 DESHPANDE, Gouri; ARORA, Chahal; RUHE, Guenther: Data-Driven Elicitation and Optimization of Dependencies between Requirements. In: *27th International Requirements Engineering Conference (RE)*. Jeju, Südkorea: IEEE, 2019.
- Deshpande et al. 2020 DESHPANDE, G.; MOTGER, Q.; PALOMARES, C.; KAMRA, I.; BIESIALSKA, K.; FRANCH, X.; RUHE, G.; HO, J.: Requirements Dependency Extraction by Integrating Active Learning with Ontology-Based Retrieval. In: *28th International Requirements Engineering Conference (RE)*, Zürich, Schweiz: IEEE, 2020, S. 78–89.
- DIN EN ISO 13849-1 2021 Norm DIN EN ISO 13849-1. Sicherheit von Maschinen.
- Eger et al. 2007 EGER, Tido; ECKERT, Claudia M.; CLARKSON, P. John: Engineering Change Analysis during Ongoing Product Development. In: *Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design*, Paris, Frankreich, 2007.
- Ein-Dor et al. 2020 EIN-DOR, L.; HALFON, A.; GERA, A.; SHNARCH, E.; DANKIN, L.; CHOSHEN, L.; DANILEVSKY, M.; AHARONOV, R.; KATZ, Y.; SLONIM, N.: Active Learning for BERT. In: *Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2020, S. 7949–7962.
- Fernandes et al. 2015 FERNANDES, João; HENRIQUES, Elsa; SILVA, Arlindo; MOSS, Michael A.: Requirements change in complex technical systems: An empirical study of root causes. In: *Research in Engineering Design* 26 (2015), Nr. 1, S. 37–55.
- Gräßler et al. 2016 GRÄßLER, I.; HENTZE, J.; YANG, X.: Eleven Potentials for Mechatronic V-Model. In: *Production Engineering and Management*, 2016, S. 257–268.
- Gräßler et al. 2018 GRÄßLER, Iris; DATNER, Michael; BOTHEN, Martin: Main Feature List as core success criteria of organizing Requirements Elicitation. In: *R&D Management Conference*, 2018, S. 1–16.

- Gräßler et al. 2020 GRÄBLER, I.; PREUß, D.; OLEFF, C.: Automatisierte Identifikation und Charakterisierung von Anforderungsabhängigkeiten – Literaturstudie zum Vergleich von Lösungsansätzen. In: *31st Symposium Design for X*, 2020.
- Gräßler et al. 2022a GRÄBLER, Iris; WIECHEL, Dominik; KOCH, Anna-Sophie.; PREUß, Daniel; OLEFF, Christian: Model-Based Effect Chain Analysis for Complex Systems. In: *Proceedings of the Design Society*, Cambridge University Press, 2022.
- Gräßler et al. 2022b GRÄBLER, I.; WIECHEL, D.; OLEFF, C.: Extended RFLP for complex technical systems. In: *Proceedings of 8th IEEE International Symposium on Systems Engineering*. Piscataway, NJ, USA: 2022
- Gräßler et al. 2022c GRÄBLER, Iris; OLEFF, Christian; HIEB, Michael; PREUß, Daniel: Automated Requirement Dependency Analysis for Complex Technical Systems. In: *Proceedings of the Design Society*, Cambridge University Press, 2022.
- Gräßler et al. 2022d GRÄBLER, Iris; OLEFF, Christian; PREUß, Daniel: Proactive Management of Requirement Changes in the Development of Complex Technical Systems. In: *Applied Sciences* 12 (2022), Nr. 4, S. 1874.
- Gräßler und Oleff 2022 GRÄBLER, Iris; OLEFF, Christian: *Systems Engineering: Verstehen und industriell umsetzen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2022.
- Gräßler und Yang 2016 GRÄBLER, Iris; YANG, Xiaojun: Interdisciplinary Development of Production Systems Using Systems Engineering. In: *Procedia CIRP* 50 (2016), S. 653–658.
- Hamraz et al. 2013 HAMRAZ, Bahram; CALDWELL, Nicholas H.M.; WYNN, David C.; CLARKSON, P. John: Requirements-based development of an improved engineering change management method. In: *Journal of Engineering Design* 24 (2013), Nr. 11.
- Hein et al. 2018 HEIN, Phyto Htet; VORIS, Nathaniel; MORKOS, Beshoy: Predicting requirement change propagation through investigation of physical and functional domains. In: *Research on Engineering Design* (2018), Nr. 29, S. 309–328.
- Oleff 2022 OLEFF, C.: *Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme*. Universität Paderborn, Dissertation, 2022.
- Piques und Andrianarison 2012 PIQUES, J.-D.; ANDRIANARISON, E.: SysML for embedded automotive Systems: lessons learned. In: *Embedded Real Time Software and Systems*, 2012.
- Rupp 2016 RUPP, Chris: *MASTer - Schablonen für alle Fälle*. 3. Aufl. Nürnberg, 2016.
- Samer et al. 2019 SAMER, Ralph; STETTINGER, Martin; ATAS, Muslum; FELFERNIG, Alexander; RUHE, Guenther; DESHPANDE, Gouri: New Approaches to the Identification of Dependencies between Requirements. In: *IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*: IEEE, 2019, S. 1265–1270.
- Schröder et al. 2021 SCHRÖDER, Christopher; MÜLLER, Lydia; NIEKLER, Andreas; POTTHAST, Martin: *Small-Text: Active Learning for Text Classification in Python*, 2021.
- Settles 2009 SETTLES, Burr: *Active Learning Literature Survey*, In: *CS Technical Reports (TR1648)*: University of Wisconsin-Madison, 2009.
- Ulrich 1981 ULRICH, Hans: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: GEIST, Manfred; KÖHLER, Richard (Hrsg.): *Die Führung des Betriebes*. Stuttgart: Poeschel, 1981, S. 1–27.
- UN-ECE R156 2021 Regularie UN-ECE R156 2021. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards software updates management system.
- Vaswani et al. 2017 VASWANI, A.; SHAZEER, N.; PARMAR, N.; USZKOREIT, J.; JONES, L.; GOMEZ, A. N.; KAISER, L.; POLOSUKHIN, I.: *Attention Is All You Need*, 2017.

Konsortialstudie – Entwicklung eines Anforderungskatalogs für Model-Based Systems Engineering Datenmodelle

Consortium Study - Development of a Requirements Catalogue for Model-Based Systems Engineering Data Models

Jennifer Dreier¹, Franziska Wieja¹, Kathrin Spütz², Ralf Hocke³, Stefan Setzer³, Georg Strobl⁴, Dirk Fleischer⁴

¹RWTH Aachen Campus, Center for Systems Engineering, Aachen

Jennifer.Dreier@cse.rwth-campus.com

Franziska.Wieja@cse.rwth-campus.com

²RWTH Aachen University, Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung, Aachen

Kathrin.Spuetz@imse.rwth-aachen.de

³Siemens Healthcare GmbH, Erlangen

⁴BMW AG, München

Abstract: Für die Entwicklung komplexer technischer Systeme führen Unternehmen zunehmend Methoden des Model-Based Systems Engineering (MBSE) ein, um alle Systeminformationen in Modellen als Single Source of Truth nahtlos miteinander zu verbinden. Im Laufe der Zeit haben sich jedoch verschiedene MBSE-Methoden entwickelt, die einen interdisziplinären Austausch zwischen Organisationen und Domänen erschweren. Entwicklungsartefakte werden unterschiedlich abgebildet und eine Kompatibilität wird nicht erreicht. Für eine erfolgreiche unternehmens- und domänenübergreifende Zusammenarbeit müssen die MBSE-Methoden in einen gemeinsamen Standard überführt werden.

Die Herausforderung der Standardisierung von MBSE-Methoden wurde in einer Konsortialstudie des Center for Systems Engineering (CSE) in Zusammenarbeit mit der BMW Group und Siemens Healthineers untersucht. Das Ergebnis der Studie ist ein Anforderungskatalog an ein standardisiertes MBSE-Datenmodell, das die Merkmale und Dimensionen bestimmt, in denen ein Datenmodell standardisiert werden muss. Für einige der Anforderungen werden Lösungsansätze aus der industriellen Praxis der Industriepartner vorgestellt.

Keywords:

MBSE, Standardisierung, Datenmodell, Anforderungen

Abstract: For the development of complex technical systems, companies are increasingly introducing Model-Based Systems Engineering (MBSE) methods, an approach to seamlessly connect all system information within models as a Single Source of Truth. Different MBSE methods have derived over time which make interdisciplinary exchange between collaborating organizations and domains difficult. Development artefacts are mapped differently and compatibility is not achieved. For a successful cross-company and cross-domain collaboration, the MBSE methods used must thus be transferred to a common standard.

The challenge of standardizing MBSE methods was investigated in a consortium study by the Center for Systems Engineering (CSE) in cooperation with the BMW Group and Siemens Healthineers. The result of the study is a requirements catalogue for MBSE data models which determines the characteristics and dimensions in which a data model must be standardized. For some of the defined requirements, exemplary solution approaches by the industry partners are presented, providing implementation solutions from their practical experience in industry.

Keywords:

MBSE, Standardization, Data Model, Requirements

1 Introduction

Complex, technical systems with a high percentage of software and electric / electronics, such as vehicles, aircraft or medical devices, are nowadays developed in a highly distributed manner across different organizations and domains (Eichmann et al. 2020). During development, the systems are largely described by documents. Those documents form the basis for stakeholders but also the basis for development activities such as the specification of the system or its testing. Due to the lack of seamless data, the large number of interdependent documents lead to a complex structure that can hardly be kept consistent over the life cycle of the system (Eigner and Stelzer 2014). The natural language of documents also carries the risk of misinterpretation and ambiguity. With increasing system complexity, the challenge of handling this complexity with previous development methods becomes increasingly difficult.

To solve this challenge in developing complex, technical systems, companies are increasingly introducing Model-Based Systems Engineering (MBSE) methods (Akundi et al. 2022). MBSE methods are based on a central system model in which all development artefacts - which are objects that represent for example requirements, design, test cases, design rationale, and their interrelationships - are managed and interconnected throughout (Gao et al. 2019). The development artefacts are, unlike documents, machine-interpretable. The models thus replace the original documents and serve as a basis for development and company-wide communication. By using MBSE methods, complex dependencies in a system can be understood easier than before so that the agility and effectiveness of the system development process can be increased.

When introducing MBSE within a company, organizational as well as technical and methodological challenges must be overcome. One of these challenges is the appropriate selection of a company-wide and standardized MBSE method. Several methods have developed in the last years and are used in different areas of research and industry. Also within a company, different methodological approaches might have developed in different areas over time. A lack of standardization of those methods can lead to misunderstandings in cross-disciplinary communication since development artefacts have not been uniformly formalized or explicitly described. In addition, created development artefacts cannot be reused or exchanged across disciplines because interfaces are not uniformly defined and described (Weilkiens et al. 2016). Hence, for company- and industry-wide collaboration in system development, MBSE methods need to be standardized.

The challenge of standardizing MBSE methods was investigated in a consortium study by the Center for Systems Engineering (CSE) together with the BMW Group and Siemens Healthineers AG. Within this study, a requirements catalogue for MBSE data models was developed which determines the characteristics and dimensions in which a data model must be standardized. It further presents exemplary solution approaches for specific requirements based on the practical experiences of the involved participants in this study.

2 Related Work and Research Need

As MBSE is becoming increasingly important in today's product development, numerous modeling methods have been developed and the number is constantly increasing (Weilkiens et al. 2016). The INCOSE aims at providing an overview of methods available (INCOSE 2018). However, as companies also develop their own methods, it is therefore almost impossible to provide a complete overview. The selection of a suitable MBSE approach for system development is made much more difficult by the large number of possible MBSE methods. To support the decision-making progress, the Framework for the Evaluation of MBSE Methodologies for Practitioners (FEMMP) by Weilkiens et al. therefore proposes a catalogue of standard criteria for evaluating MBSE methods (Weilkiens et al. 2016). So far, the focus is on comparing MBSE tools of MBSE methodologies but not yet on standardizing MBSE models (Weilkiens et al. 2016). The first approaches of standardization in MBSE

are provided by a research group from VDA and prostep ivip. This research group is currently developing the data exchange format "Digital Data Package" (DDP) to support cross-domain collaboration. Through the DDP, different companies and domains should be able to collaborate in the model-based development of systems as well as exchange product data across domains and companies (Schmied 2021). With this exchange format, system models developed with different authoring tools become exchangeable. However, in collaborating organizations and domains, different MBSE methods are used to create the system models. Despite the possibility of exchanging system models using DDP, development artefacts are represented differently by different MBSE methods. As a result, interfaces may not be compatible (Weilkiens et al. 2016). For cross-company and cross-domain collaboration, the MBSE methods used, and in particular the basic data model, must therefore be transferred to a common standard.

3 Requirements Catalogue for a standardized MBSE data model

When developing complex systems, cross-discipline and cross-industry collaboration is essential. Nowadays, systems are developed in a highly distributed manner meaning that different subsystems are being developed by different departments or disciplines. MBSE provides tools and artefacts for a collaborative development while handling system complexity. However, the numerous MBSE methods available lead to collaborating organizations using different MBSE methods to create system models. For the developed system models to still be exchangeable and compatible, a standardization of how systems are developed in MBSE is necessary.

One approach to visualize systems development in MBSE is shown in Figure 1, based on Holt’s “MBSE in a slide”. According to Holt, the abstract description of a system is a model, whereby hierarchies and system decomposition are initially disregarded in order to reduce complexity. The model is made up of different views, which are purpose- or stakeholder-specific information grouped into submodels. All views in a model must be consistent with each other in order for the containing data to function as a consistent model. Diagrams are used to visualize the views. Thus, different aspects of the views can be visualized by different diagrams. Diagrams are part of the notation which is the language that is used to communicate with stakeholders. The structure and content of a view is defined by its corresponding viewpoint which is the template for the view and ensures that all views based on the same viewpoint are consistent. In order to ensure consistency beneath all viewpoints, the ontology defines a common set of concepts and associated terminology. The ontology and viewpoints build the framework in the sense of a template for a model in MBSE, which is going to be called “data model” in this study.

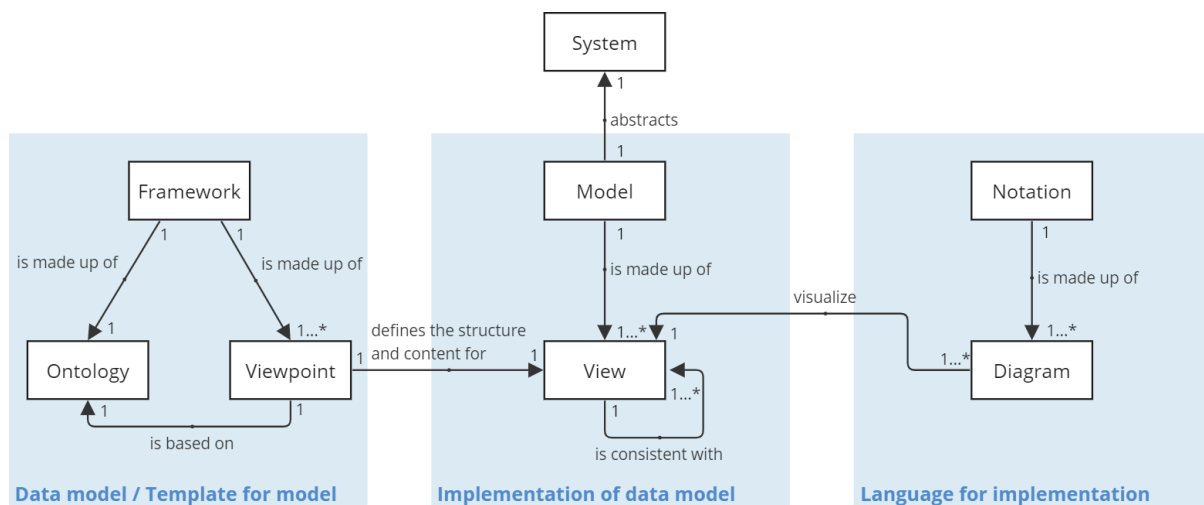


Fig 1: System development in MBSE (Adapted from Holt 2021)

Hence for MBSE models to be exchangeable and unambiguously understandable, the underlying data model consisting of ontology and viewpoints needs to be standardized.

With this fundamental understanding agreed on in the consortium study by the CSE, the experiences and approaches of the study participants in developing MBSE models were collected and analyzed in terms of the respective data models used. Therefore, each participating party presented their current MBSE approaches which were critically questioned by all other parties to identify the underlying data model. In subsequent workshops, similarities and differences between the identified data models were analyzed. Identified similarities were interpreted as a proof that these characteristics of a data model are commonly essential for MBSE data models. Differences in the data models were discussed in the consortium and questioned with regard to applicability and meaningfulness for all participants. If this could be affirmed, these characteristics of a data model were also included as essential. In addition, further ideas for characteristics of an MBSE data model have been discussed and developed during these discussions.

As the results of these discussions, a requirements catalogue for a standardized MBSE data model was developed, specifying in which dimension a data model needs to be standardized. This catalogue is presented in the following. It is mainly designed for cyber-physical systems, as outlined in the first of the two subchapters.

3.1 Premises

Defining a universal standard for MBSE data models is a complex and extensive challenge. Therefore, several premises have been defined within the consortium study to limit the problem space.

- **MBSE for cyber-physical systems:** The considerations and approaches developed in this study are mainly for cyber-physical systems (CPS) according to VDI 2206, but the developed ideas can be transferred to other kinds of systems from different domains in further studies. CPS are based on a mechatronic core and characterized by their networking with the Internet of Things and other Services (VDI 2206). CPS represent the next evolutionary stage from simple mechatronic systems, which are systems composed of elements of mechanics, electrics/electronics and software for solving complex technical challenges (VDI 2206).
- **Integration of old data models:** There are multiple approaches on how to develop system models according to MBSE due to historic evolutions, leading to a high diversity of existing data models. The propositions for a standardized data model according to a MBSE approach developed in this study are detached from existing data models. Building upon those diverse and company-specific data models would not be efficient. For integrating existing data models into the newly defined standardized structure, corresponding converters are to be developed, if necessary.

3.2 Requirements

In the following, several requirements for a standardized MBSE data model are specified. The list of requirements by no means claims to be exhaustive and should be extended in future discussions and workshops.

3.2.1 Accordance with existing frameworks

For a standardized data model to be useful for digital system development, it must be compatible with existing frameworks in the considered field of system development. Therefore, the two frameworks V-model and RFLP, which are widely spread and commonly used for a methodical system development of CPS, are introduced here:

- **V-model:** For the methodical development of CPS, VDI 2206 proposes the V-model. It describes factual logical dependencies of development tasks for a successful system development and is organization-independently applicable (VDI/VDE 2206:2021-11).

The left thigh of the V represents the decomposition of the system into its elements, containing the tasks of requirements elicitation, system architecture development and implementation of the system elements. The right thigh implies the step-by-step integration of the system's elements into the overall system, whereas a continuous verification and validation between the two thighs takes place. In this study, the right thigh and the verification and validation processes are not yet considered but should be taken into account in future studies.

A central concept of the V-model is the iterative procedure with continuously increasing the quality of the solution through exploration, refinement and repetition. Hereby, the maturity of the model increases over time. By decomposing systems into subsystems, the V-model can be applied again at lower levels. This decomposition can be done at any maturity-level of a system, so that the maturity of the system and subsystems increases individually (VDI/VDE 2206:2021-11). From the concepts of the V-model, some requirements are derived and explained later in this paper.

- **RFLP:** The RFLP approach is a widely established integrated information model for supporting model-based development. RFLP is an acronym and stands for the four phases of a systematic system development process: requirements engineering, functional design, logical design and physical design (Kleiner and Kramer 2013).

The integrated information model is covering all disciplines and hereby enables the transparency and traceability of development steps as well as the validation of required system behavior. A standardized MBSE data model should therefore be structured in accordance with the four phases in the RFLP approach. All four phases as well as the interdependencies between elements of the different phases should be adequately represented in the data model.

3.2.2 Multi-domains

A standardized MBSE data model should contain all necessary development artefacts from the different domains of a system. In the context of the development of the present data model for CPS, these are development artefacts and models from the domains electric / electronics, mechanics and software. Further, these development artefacts should be clearly assignable to a respective domain.

3.2.3 Tool-independence

A standardized MBSE data model for specifying a CPS should be tool-independent and valid independently of the modelling language. UML/SysML can be used as the modeling language for describing the MBSE data model, but this should not limit or predefine the modeling language of the MBSE models developed based on this data model.

3.2.4 Scalability

For a standardized data model to be applicable for all kinds and sizes of systems, it must be able to scale. Taking the example of a car, the basic structure of the data model must be developed in a way that is able to represent a door hinge of the driver's door as well as the whole chassis. Regardless of the system scope, the scalability of the data model must be granted.

3.2.5 Decomposition

Characteristically for CPS is a systematic hierarchically decomposability, following the idea of system thinking (VDI 2206). Each system can be seen as part of a larger system. According to the left thigh of the V-model, the standardized data model should be able to allow and also map this decomposability. This is especially essential for collaborative work, as it enables a division of labor, even across different disciplines and domains.

3.2.6 Exchangeability

With a standardized data model, exchangeability of models between different division within a company as well as between a company and their partner companies or suppliers should be enabled. This exchange can happen on different system levels so that exchangeability must be succeeded on all system levels. Exchangeability is the precondition for collaboration and integration of subsystems into systems. The exchange of models and the collaboration and communication via models is further essential for fulfilling the following requirement of a Single Point of Truth.

3.2.7 Single Point of Truth

A standardized MBSE data model should fulfil the requirement of a Single Point of Truth (SPoT). A SPoT corresponds to a single point of access and change for a data element. Any related information is derived from this data element so that changes are only made in one place and updated anywhere else (Holzmann 2015).

3.2.8 Versioning

The standardized data model might evolve and hereby change over time. In order to allow for this change and at the same time monitor the ongoing changes, the information regarding the underlying data model of a data object must be transparent for each data object. Also, the data object itself might evolve over time which also need to be transparent for each stage of a data object. By assigning a unique ID to each data object, the traceability of data objects throughout the whole lifecycle should be archived.

3.2.9 Cross-tool ontology

Different stakeholders require different views, which need to be provided based on a SPoT. Part of these views are typically provided by different tools. Thus, an aligned cross-tool ontology is needed to guarantee data consistency.

The following examples from cable engineering presents exemplarily the different views being required and generated during the process of collaborative system engineering. The upper picture in Figure 2 shows the logical view of a single wire connection, which connects two ports of a control board with an externally accessible Sub-D connector. This single wire connection view is complemented by the multi-wire view in the lower picture in Figure 2, which shows the detailed pin to wire connection. Both views are modeled within MagicDraw and are type related.

single wire view:



multi wire view:

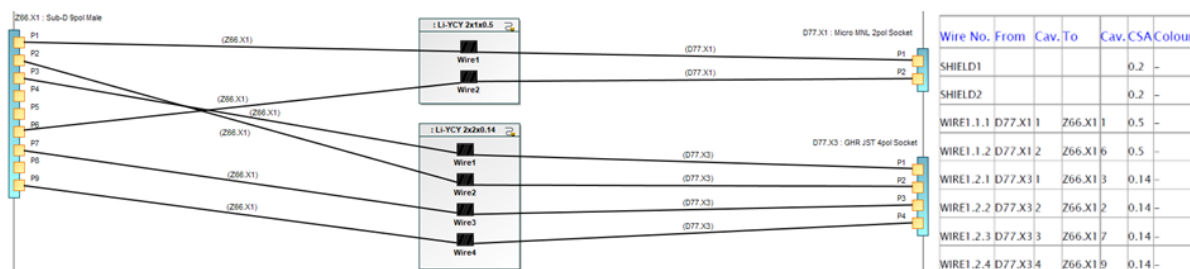


Fig 2: Different views during MBSE process in cable engineering

Figure 3 shows a 2D and 3D view of the cable assembly. Especially the 3D view is important for deriving the exact cable length within the mechanical model of the integration environment.

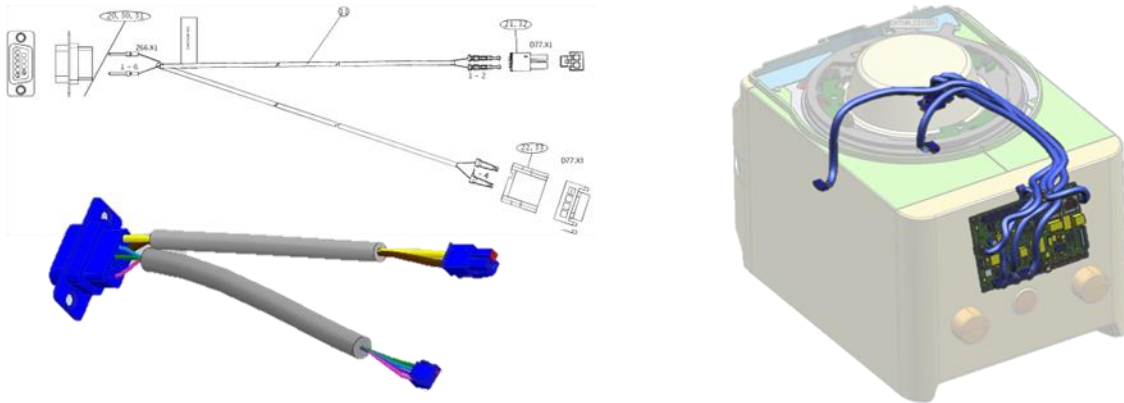


Fig 3: 2D and 3D view of a cable assembly

The BOM table given in Figure 4 shows an instance view of the cable assembly, including orderable items.

BOM Table					
BOM ID	Part Description	Supplier PN	Supplier	Quantity/Length	Unit of Measure
-	OT_LB_HARNESS	-	-	1	Each
10	MC_LI-YCY 2X2X0.14	-	-	0	Per Length
11	MC_LI-YCY 2X1X0.5	-	-	160	Per Length
20	HG_P_9_D-SUB 2R	-	-	1	Each
21	HG_R_2_MICMNL 1R F.HG P3 FV0	1445022-2	ITE CONNECTIVITY	1	Each
22	HG_R_4_GHR 1R F.HG P1.25 FV0 NA	GHR-04V-S	JST	1	Each
30	TL_P_0.33-1.0 D-SUB AU0.1	-	-	2	Each
31	TL_P_0.13-0.33 D-SUB AU0.1	09 67 000 5576	HARTING	4	Each
32	TL_S_0.2-0.52_MICMNL SN	794610-1 (LOOSE)	ITE CONNECTIVITY	2	Each
33	TL_S_0.05-0.13 GH SN	SSHL-002T-P0.2	JST	4	Each

Fig 4: BOM table for cable assembly

4 Exemplary Solution Approaches

For some of the specified requirements for a standardized MBSE data model, exemplary solution approaches have been discussed and agreed upon within the consortium study. For each of the presented solution approaches, it is indicated which requirements are hereby addressed.

4.1 Model Ontology of Siemens Healthineers

Siemens Healthineers modelling approach is based on a self-similar model ontology shown in Figure 5. Any system to be modeled (system of interest, enabling system or interoperating system) is represented by an element. In this setup, a system of interest can be a system, a subsystem, a component, a module or any other tangible element within any given product structure (software code is also a tangible element in this context). Any element can consist of further elements, whereas these elements are either “assemblies” (any combination of discipline specific elements and further assemblies) or “discipline specific elements” (electronics, mechanics, software, chemical) (→ Multi-Domains).

This simple self-similar model allows modelling on any system layer (→ Scalability) and seamless model collaboration between them (→ Exchangeability).

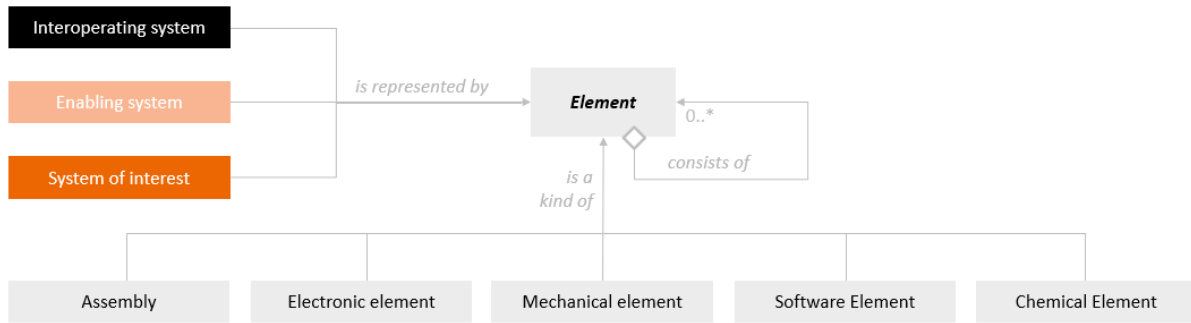


Fig 5: Model Ontology of Siemens Healthineers

Exemplarily the model ontology for a cable assembly is sketched in Figure 6. The cable assembly is a combination of connectors, wires and additional components (e.g., label, ferrites etc.) and might be part of a larger harness. The harness might be part of a cable set being required for a whole system. Within an ontology being capable to reflect a SPoT for the different facets of a cable assembly over the whole lifecycle, one must distinguish between the type of the cable assembly and a realized instance of the cable assembly (→ SPoT) (→ Unambiguity). Whereas the type represents the required properties of this cable assembly (e.g. required properties like maximum attenuation, maximum installation space, isolation properties, etc.), a dedicated instance represents a realized and therefore an orderable cable assembly with guaranteed properties (e.g. maximum guaranteed attenuation, maximum guaranteed installation space).

The type properties do seldom change over the lifetime, whereas the instance properties might change more often due to supplier change, obsolescence, second sourcing, local sourcing etc. In any case proper matching of the guaranteed properties to the required ones is a prerequisite for an exchange along the lifetime.

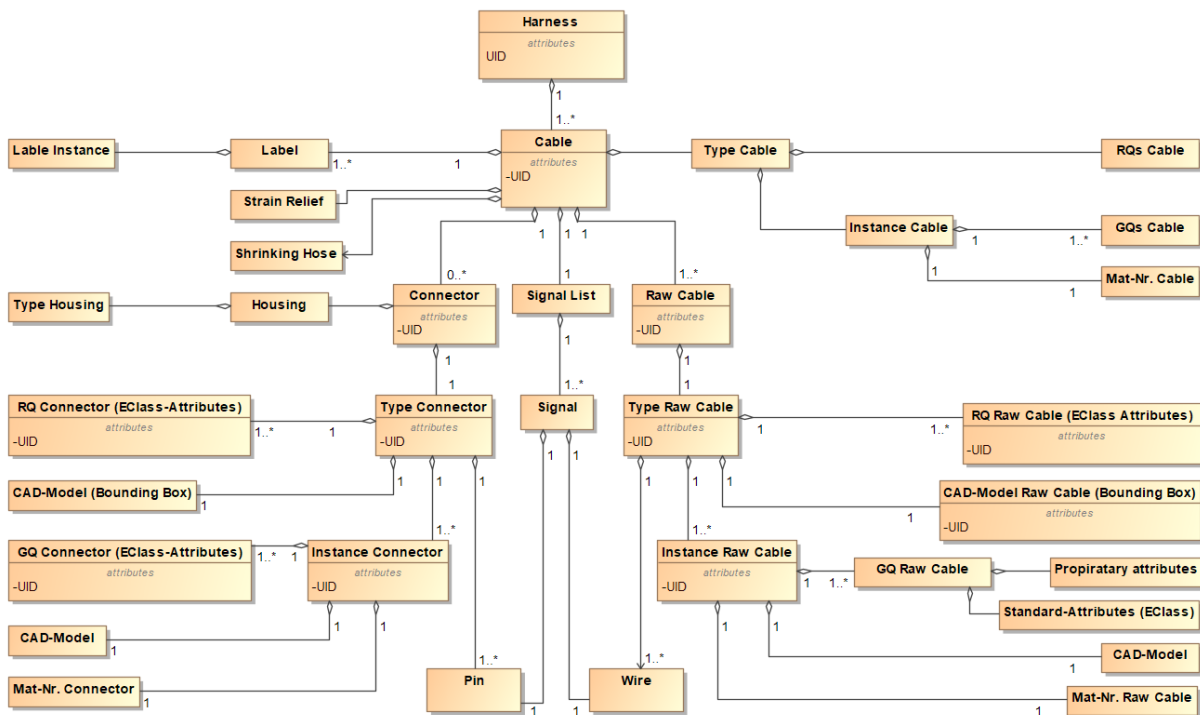


Fig 6: Model ontology for a cable assembly

4.2 RFLP Application Example of BMW Group

The RFLP approach at BMW Group includes four viewpoints according to the four phases of the RFLP approach which are exemplarily shown in Figure 7. Using the example of an adaptive cruise control (ACC) system the four viewpoints are structured as followed:

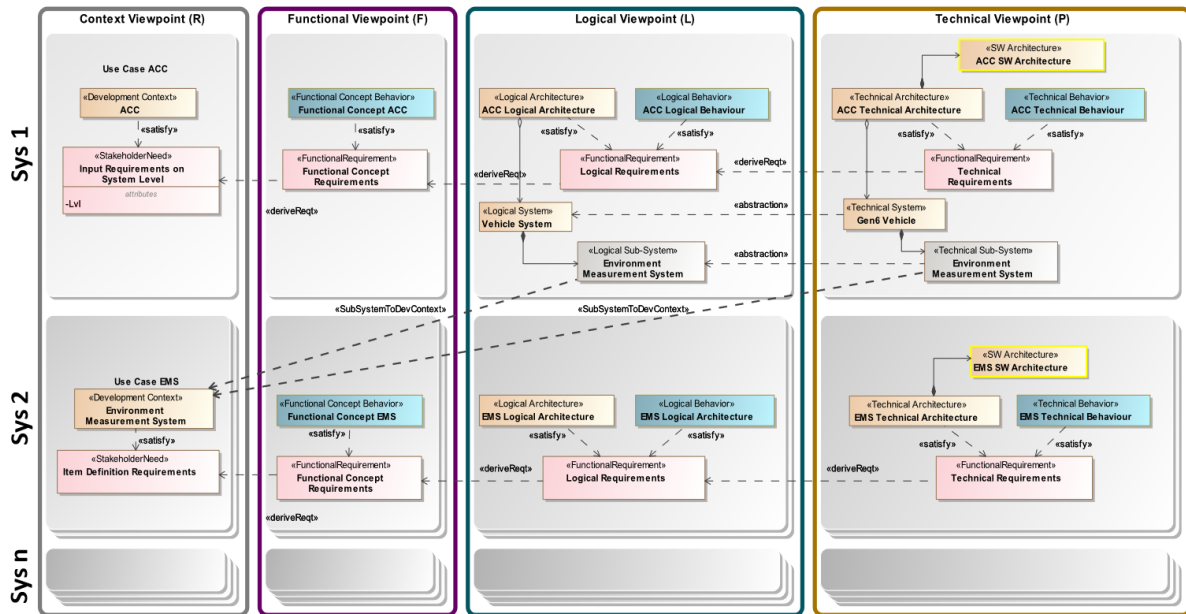


Fig 7: BMW Group modelling approach using RFLP Viewpoints and System Decomposition

- Context Viewpoint (R):** The Context Viewpoint defines the system to be developed. The Context View is elaborated with Context (see Figure 8) and Use Case diagrams, attempting to describe the system boundaries, its relations with the system environment as well as the desired behavior of the system from a customer's point of view. The system requirements are elicited based on the stakeholder needs and associated to the context and use case model elements, thereby structuring these requirements.

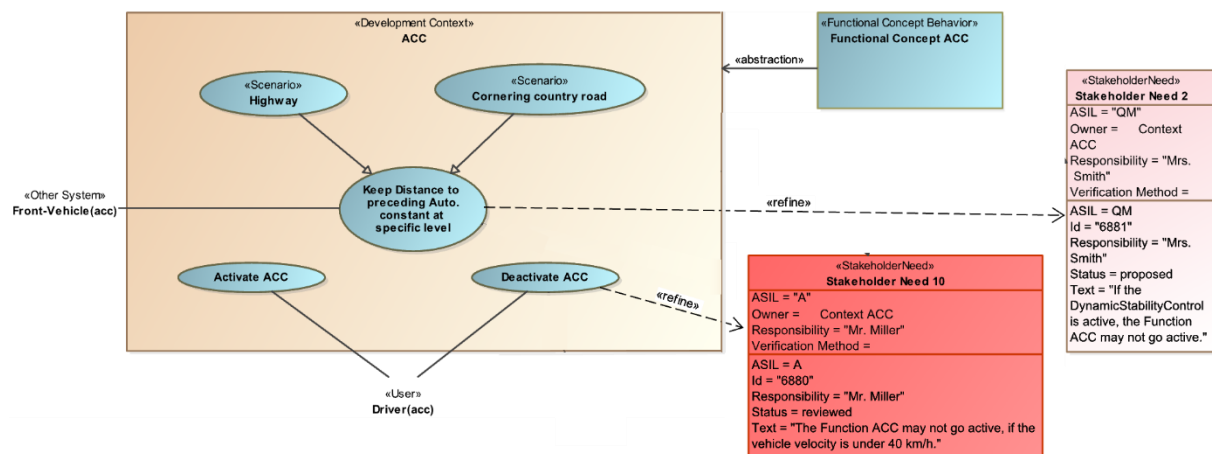


Fig 8: Use Case diagram of the ACC system

- Functional Viewpoint (F):** In the Functional Viewpoint, the Functional Concept to achieve the desired behavior of the system is modeled (see Figure 9). The Functional Concept consists of Functional Requirements, a function structure representing the functional behavior and additional explanations in natural Language. As a starting point, the Functional Requirements

resulting from the requirements defined in the Context Viewpoint are derived. From these requirements, system functions are defined which are gradually decomposed into elementary functions, which cannot be decomposed further. Interactions between these functions are of the types of material, signal and energy.

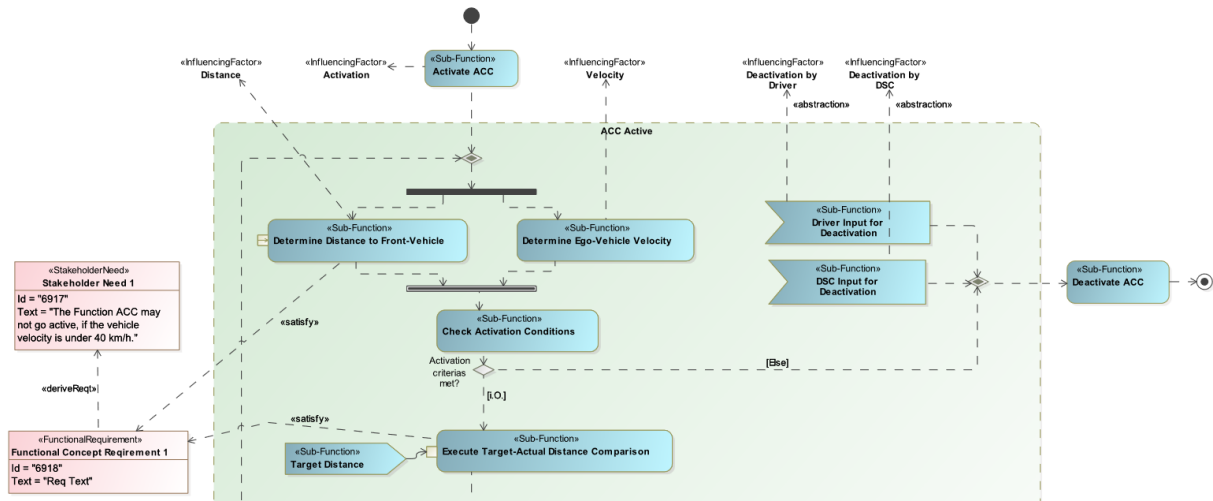


Fig 9: Functional Concept of the ACC system

- Logical Viewpoint (L):** From the Functional Requirements in the Functional Viewpoint, Logical Requirements for the Logical Viewpoint are derived. These must be satisfied by the Logical Architecture of the system and its Logical Behavior. The logical system architecture (see Figure 10) models the logical structure of the system and the interactions between the system elements. The logical behavior substantiates the (elementary) functions of the function structure of the Functional Viewpoint. This is achieved by using physical or logical effects for the realization of desired functions, characterized by effect and effect carrier (Koller and Kastrop 1998). These physical or logical effects are then mapped to the elements of the logical system architecture. Logical or physical effects together with their carrying architecture elements constitute principal solutions. The interfaces between the principal solutions are being defined based on the flows of information, energy or matter between the logical or physical effects. The principal solutions are refined until they can be assigned to a respective solution domain (→ Multi-Domains).

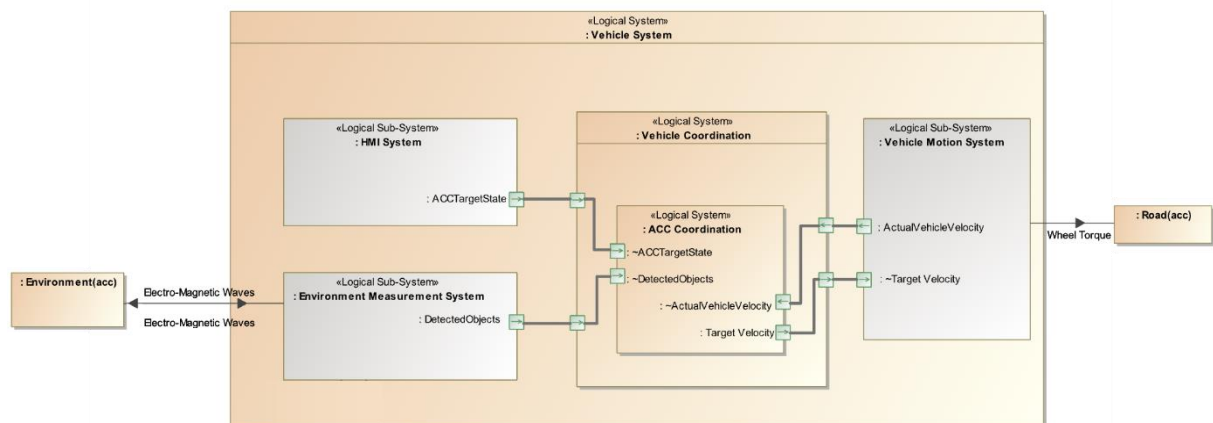


Fig 10: Logical Architecture of the ACC system

- Technical Viewpoint (P):** In the Technical Viewpoint, requirements for the elements of the technical architecture (see Figure 11) are developed based on the logical requirements and architecture. These requirements must be satisfied by the Technical Architecture. The Technical

Architecture is represented in the Technical View which consolidates all domains including the software architecture, electric / electronic and hardware architecture as well as the mechanical architecture. For the particular domains, individual viewpoints such as the Physical Viewpoint or Software Viewpoint provided by domain-specific tools are included (→ Cross-tool ontology).

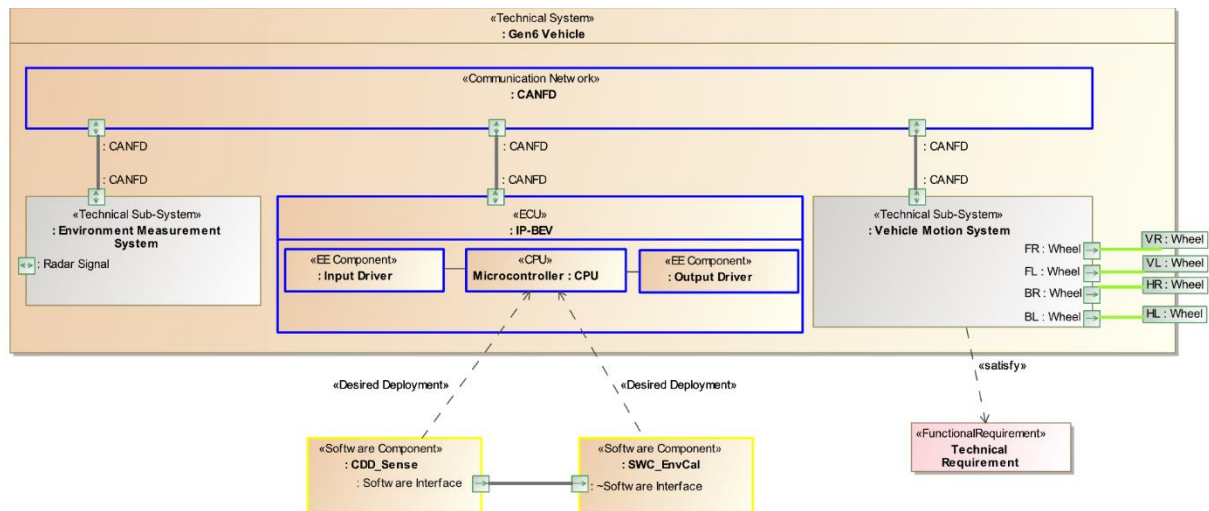


Fig 11: Technical Architecture comprising E/E- and SW-Architecture of the ACC system

The description of the four viewpoints shows the traceability of requirements enabled by the RFLP approach. The traceability can be seen between requirements and architecture elements in each of the four viewpoints as well as between the requirements of upstream or downstream viewpoints. Trace relations exist also between elements of the technical and logical architecture (abstraction) associating principal solutions with technical solutions.

The same four viewpoints can be found on lower system levels as exemplarily shown in Figure 7 for the Environment Measurement System as a sub-system. Between different system levels, a System Subsystem Connection is defined (→ Decomposition).

5 Summary and Outlook

A requirements catalogue for a standardized MBSE data model has been presented. It specifies the characteristics and dimensions in which a MBSE data model must be standardized. The defined requirements address the following topics: The data model must be compatible with existing frameworks, which are in this case the V-model and the RFLP approach. This also implies the ability for decomposition of the data model as an essential concept of the V-model. The data model must enable a clear assignment of the development artefacts to the domains electrics/electronics, mechanics and software. Tool-independency and scalability of the data model is required to be universally applicable for all kinds of systems. It also ensures reuse and cross-company and cross-domain exchange of development artefacts. Based on a SPoT, the architecture of the data model further provides different stakeholders with different views on the central system model, as different stakeholders need differentiated perspectives their development tasks. To allow for changes of the data model in the future, versioning is also an essential factor to be considered.

The defined requirements do not claim to be exhaustive but rather reflect the key discussion points that were jointly elaborated by all those involved in the consortium study by the CSE. Despite different industries, backgrounds and experiences of the study participants, same objectives, ideas and viewpoints could clearly be detected.

The exemplary solution approaches presented in this paper provide solution approaches for some of the requirements included in the catalogue. The design of a standardized data model to its full extent

is an extensive challenge and can only be accomplished incrementally. Further research and studies are necessary to develop additional solution approaches for the requirements not yet addressed. Standardizing a MBSE data model and not the modeling method emerged to be the most promising approach to achieve a unification and exchangeability of MBSE models and to enable a common basis for discussion on standardization. The requirements catalogue developed in this study mainly focuses on elements from requirements analysis, concept development and design, but not elements of validation and verification. In future studies, the developed catalogue should therefore be expanded to include the missing elements.

Literature

- Akundi et al. 2022 AKUNDI, Aditya; ANKOBIAN, Wilma; MONDRAGON, Oscar; LUNA, Sergio: Perceptions and the extent of Model-Based Systems Engineering (MBSE) use – An industry survey. In: 2022 IEEE International Systems Conference (SysCon): IEEE, 2022, S. 1–7
- Eichmann et al. 2020 EICHMANN, Oliver C.; MELZER, Sylvia; GIERTZSCH, Fabian; GOD, Ralf: Stakeholder needs and requirements definition during service development in a system of systems. In: 2020 IEEE International Systems Conference (SysCon): IEEE, 2020 — ISBN 9781728153650, S. 1–8
- Eigner and Stelzer 2014 EIGNER, Martin; STELZER, Ralph: Product lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life cycle Management. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI), 2014.
- Gao et al. 2019 GAO, Xinghai; ZHANG, Yaqi; WANG, Zhuoqi: The architecture of digital system model for systems-of-systems engineering. In: 2019 Chinese Automation Congress (CAC): IEEE, 2019 — ISBN 9781728140940, S. 2744–2747
- Holt 2021 HOLT, John: Systems Engineering Demystified: A practitioner’s handbook for developing complex systems using a model-based approach. Birmingham: Packt Publishing, 2021.
- Holzmann 2015 HOLZMANN, Gerard J.: Points of Truth. In: IEEE software vol. 32 (2015), Nr. 4, pp. 18–21.
- INCOSE 2018 INCOSE: Methodology and Metrics. <http://www.omgwiki.org/MBSE/> - Accessed 16 December 2022.
- Kleiner and Kramer 2013 KLEINER, Sven; KRAMER, Christoph: Model based design with systems engineering based on RFLP using V6. In: Lecture Notes in Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 93–102.
- Koller and Kastrup 1998 KOLLER, Rudolf; KASTRUP, Norbert: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- Schmied 2021 SCHMIED, Torsten: Digital Data Package. <https://www.prostep.org/en/projects/digital-data-package-ddp/> - Accessed 16 December 2022.
- VDI/VDE 2206:2021-11 Technical Rule VDI/VDE 2206:2021-11. Development of mechatronic and cyber-physical systems.
- Weilkiens et al. 2016 WEILKINS, Tim.; SCHEITHAUER, Axel.; DI MAIO, Marco.; KLUSMANN, Niklas.: Evaluating and Comparing MBSE Methodologies for Practitioners. In: 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), 2016, pp. 1–8.

Handlungsfelder deutscher KMUs zur Unterstützung der Entwicklung smarter Product-Service-Systeme

Fields of action for German SMEs to support the development of smart product-service-systems

Yevgeni Paliyenko¹, Dennis Lukjanenko¹, Gregory-Jamie Tüzün¹, Daniel Roth¹, Matthias Kreimeyer¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
Yevgeni.Paliyenko@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Unternehmen sind heutzutage mit dynamischen Marktveränderungen, wie zunehmendem Konkurrenzdruck oder sich wandelnden Kundenbedürfnisse, konfrontiert. Sie reagieren darauf mit einer Erweiterung des Angebots, beispielsweise um produktbegleitende Dienstleistungen zur Realisierung eines höheren Leistungsversprechens. Gleichzeitig ermöglichen günstigere und leistungsfähigere Informations- und Kommunikationstechnologien eine profitable Umsetzung von intelligenten Produkten. Diese parallelen Technologie- und Marktentwicklungen führen zur Entstehung von smarten Produkt-Service-Systemen (smart PSS). Die Entwicklung solcher komplexen Systeme stellt Unternehmen, insbesondere KMUs, vor neue Herausforderungen. Aufgrund dessen werden in diesem Beitrag, die Herausforderungen der Entwicklung von smart PSS aufgedeckt und die aktuelle Entwicklungspraxis untersucht, um daraus Handlungsbedarfe abzuleiten. Ausgehend von einer systematischen Literaturrecherche und Experten-Befragungen werden die Herausforderungen erfasst und Industrie-Workshops durchgeführt. Die Erkenntnisse der Erhebungen dienen der Identifizierung praxisnaher Handlungsfelder hinsichtlich der smart PSS-Entwicklung.

Keywords (deutsch): Handlungsfelder, Produkt-Service-Systeme (PSS), Entwicklungsprozess, Herausforderungen, Smart Systems Entwicklung

Abstract (english): Nowadays, enterprises are exposed to dynamic market changes, such as increasing competitive pressure or changing customer needs. They react to this by expanding their offer by product-related services in order to increase the value proposition. Concurrently, information and communication technologies get cheaper and more potent, thus increasing the feasibility of intelligent products. These parallel technological and market developments lead to the emergence of smart product service systems (smart PSS). A smart PSS combines tangible, smart products with intangible, data-based services. The development of such complex systems presents companies, especially SMEs, with new challenges. Methodical support can significantly influence and improve the development process and thus the potential success of a smart PSS. It is therefore necessary to examine the current development practice and derive the fields of action. In this paper, based on a systematic literature review and industry surveys, the challenges of the development are revealed and on their basis industry workshops are carried out, in order to derive fields of action regarding the smart PSS development.

Keywords (english): fields of action, product-service systems (PSS), development process, challenges, smart systems engineering

1 Einführung und Motivation

Unternehmen sind heutzutage mit zunehmend stärkerem Konkurrenzdruck und sich wandelnden Kundenbedürfnissen konfrontiert. Auf solche Marktveränderungen reagieren produzierende Unternehmen mit einer „Servitisierung“ ihres Angebots, um sich von den Konkurrenten abzuheben (Verhoef et al. 2021). Hierdurch wandelt sich auch das ihnen zugrundeliegende Geschäftsmodell weg vom reinen Produktverkauf hin zum Lösungsangebot. Als Lösungsanbieter streben die Unternehmen nach der Bereitstellung eines höheren Werteangebots und der Befriedigung von Kundenbedürfnissen. Solche Systemlösungen, die Produkt und Dienstleistungen miteinander vereinen, werden als Produkt-Service Systeme (PSS) bezeichnet. PSS ermöglichen es, sowohl kunden- als auch anbieterseits einen Mehrwert zu generieren (Spath et al. 2012; Meier und Uhlmann 2012). Auf solche Weise können Kunden zum Beispiel von einer höheren Maschineneinsatzfähigkeit profitieren. Und die Unternehmen sind in der Lage, einen höheren Umsatz durch die damit verbundene Dienstleistung zu erwirtschaften.

Zeitgleich geht mit dem fortschreitenden Trend der Digitalisierung ein grundlegender Wandel der produzierenden Industrie einher, angefeuert vor allem durch leistungsfähigere und kostengünstigere Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) (Valencia et al. 2014; Liu et al. 2018b). Durch deren Integration in Form von Elektronik, Sensorik und Software werden Produkte immer intelligenter. Außerdem sind sie in der Lage Daten zu generieren und mit ihrer Umwelt zu kommunizieren. So erlaubt beispielsweise die Vernetzung der Produkte über das Internet eine Kommunikation zwischen dem Produkt und dem Anlagenbetreiber, wodurch der Austausch von Nutzungs- und Maschinendaten aus dem laufenden Betrieb möglich werden. Diese Daten können für ein neues Service-Angebot von intelligenten Dienstleistungen, beispielsweise eine Fernüberwachung oder Fernsteuerung zwecks Wartung, verwendet werden (Valencia et al. 2015; Filho et al. 2017).

Die beiden parallelen Technologie- und Markt-Entwicklungen führen zur Entstehung und Verbreitung von smarten Produkt-Service Systemen (smart PSS). Ein smart PSS vereint nicht-greifbare, datenbasierte Dienstleistungen mit greifbaren, intelligenten Produkten (Kuhlenkötter et al. 2017; Böhmann et al. 2018). Dabei dienen die im System generierten Daten- und Informationsströme als zentrales Element des Service-Angebots und steigern die realisierbare Wertschöpfung gegenüber gewöhnlichen (smarten) Produkten (Belkadi et al. 2020). Eine solche zusätzliche Wertschöpfung kann beispielsweise durch neuartige Dienstleistungen wie prädiktive Wartung oder Versagensvorhersagen realisiert werden.

Die Entwicklung solcher vernetzten, komplexen Systeme unterscheidet sich jedoch von der klassischen Produktentwicklung oder Serviceentwicklung und stellt die Unternehmen vor neue Herausforderungen (Paliyenko et al. 2022). Jüngste Untersuchungen bestätigen sowohl den Bedarf nach geeigneter Unterstützung für die Entwicklung smarter PSS als auch das Bestreben deutscher KMUs, smart PSS eigenständig zu entwickeln (Paliyenko et al. 2022; Schiller et al. 2022).

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Wertestruktur von smart PSS unterscheidet sich maßgeblich von der reinen Dienstleistung oder von Produkten (Moser et al. 2019). Hierdurch ist eine tiefgreifende Anpassung der Entwicklungsstrukturen und -prozesse notwendig (Zhang und Banerji 2017), um eine synchrone sowie abgestimmte Produkt- und Serviceentwicklung zu realisieren (Forte et al. 2022). Dabei müssen die charakteristische Interaktion und Abhängigkeit zwischen Produkt und Service möglichst in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden (Zheng et al. 2019c; Forte et al. 2022). Insbesondere die Integration des Intelligenz-Aspekts erhöht die gegenseitigen Abhängigkeiten der beteiligten Fachdisziplinen und die damit verbundene Komplexität des Entwicklungsprozesses. Dieser gleichzeitige Wandel, der zur vermehrten Digitalisierung und Servitisierung führt, stellt insbesondere KMUs vor zahlreiche Herausforderungen, da sie oftmals nicht über zureichendes Wissen und notwendige Kapazitäten für die Erarbeitung neuer Entwicklungsstrukturen für smart PSS verfügen (Paliyenko et al. 2022). Zeitgleich zeigt die Arbeit von Moser et al. (2019) eine unzureichende Betrachtung von smart PSS in wissenschaftlichen Publikationen. Um die Unternehmen bei der smart PSS-Entwicklung zu unterstützen, müssen die industrielle Entwicklungspraxis untersucht (Filho et al. 2017; Zheng et al. 2019c) und zugehörige Handlungsfelder

identifiziert werden (Verhoef et al. 2021). Deshalb erfolgt im Zuge dieser Arbeit eine mehrdimensionale Untersuchung der Entwicklungspraxis von smart PSS, um die zentrale Forschungsfrage zu klären: Welche praxisrelevante Handlungsfelder existieren für die Unterstützung der smart PSS-Entwicklung?

Der vorliegende Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Im dritten Kapitel wird die Vorgehensweise zur Untersuchung, Analyse und Auswertung der potentiellen Handlungsfelder vorgestellt. Daraufhin folgt in Kapitel 4 eine Auswertung der gesammelten Daten und in Kapitel 5 die Ableitung von Handlungsfeldern sowie eine kritische Reflexion der Erkenntnisse. Abschließend enthält Kapitel 6 ein Fazit und einen Ausblick auf offene Forschungslücken.

3 Untersuchungsmethodik

Für die Identifizierung der Handlungsfelder wurde eine umfassende Datengrundlage aus akademischer und industrieller Perspektive geschaffen. Bild 1 visualisiert das dabei verfolgte Vorgehen. Ausgehend von einer systematischen Literaturrecherche wurden zunächst die aktuellen Herausforderungen der smart PSS-Entwicklung erfasst. Anschließend wurden die literaturbasierten Herausforderungen den durch Industrie-Experten deutscher KMUs geäußerten Herausforderungen (Paliyenko et al. 2022) gegenübergestellt, um eventuelle Überschneidungen und Diskrepanzen aufzudecken. Die Erkenntnisse dieser Erhebungen dienten als Grundlage für eine tiefgehende Untersuchung der Entwicklungspraxis durch Industrie-Workshops.

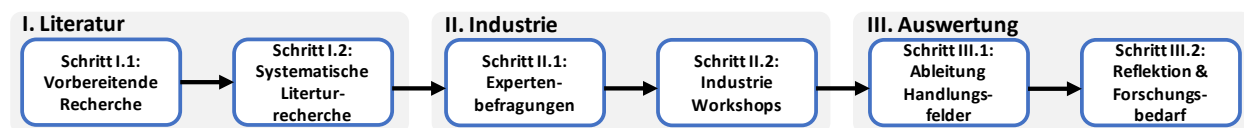


Bild 1: Vorgehensweise der Untersuchung

3.1 Datenerhebung – Literatur

Die systematische Literaturrecherche wurde nach dem Vorgehen von Biedermann et al. (2012) durchgeführt. Hierbei wurden die Suchparameter für die systematische Recherche auf Grundlage einer vorbereitenden Recherche entsprechend der Tabelle 1 eingegrenzt.

Tabelle 1: Suchparameter der systematischen Literaturrecherche

Leitfrage	Welche Herausforderungen existieren in der Entwicklung von smart PSS?			
Datenbanken	IEEE Explore, Proquest, Scencedirect, Web of Science			
Publikationen	Monografien, Sammelwerke, Buch-, Konferenzbeiträge, Fachzeitschriftenaufsätze			
Jahrgang	2014* bis 2022 (*ausgehend von der Prägung des Begriffs „smart PSS“ durch Valencia et al. 2014)			
Synonyme englischer und deutscher Suchbegriffe	challenge problem ⁹ issue ¹² constraint ¹¹ Herausforderung Schwierigkeit ⁹ Problem ¹⁰ Hindernis ¹ Hürde	development design ³ engineering ² Entwicklung Schaffung ⁶ Planung ⁸	smart ⁹ integrated ⁴ digital ² intelligent ¹² connected ⁵ clever ² agil ⁹ vernetzt ⁷	product-service system ¹² PSS ⁹ Hybrides Leistungsbüdel ⁸ Produkt-Service-System
Prüfschema	1. Titel → 2. Abstrakt und Schlüsselbegriffe → 3. Voller Beitrag			
Quellenverweise	1 - Friedrich et al. 2019 2 - Kuhlenkötter et al. 2017 3 - Lee et al. 2019 4 - Matschewsky et al. 2016	5 - Song et al. 2021 6 - Spath et al. 2012 7 - Strobel et al. 2019 8 - Meier et al. 2012	9 - Valencia et al. 2014 10 - Wiesner et al. 2019 11 - Zhang et al. 2020 12 - Zheng et al. 2019b	

Die Suche verfolgte das Ziel die aktuellen Herausforderungen der smart PSS-Entwicklung aufzudecken. Sie erfolgte innerhalb vier wissenschaftlicher Datenbanken mit vorbereiteten Such-Strings, die sich aus den englisch- und deutschsprachigen Synonymen der Suchbegriffe zusammensetzten. Zeitgleich wurden Variationen dieser Suchbegriffe durch den Einsatz von booleschen Operatoren abgedeckt. Insgesamt konnten somit über 450 Such-Kombinationen realisiert werden. Die initiale Recherche lieferte 1453 Ergebnisse (Bild 2 links), welche anhand eines festen Prüfschemas begutachtet wurden. Nach der Prüfung des Titels wurden 1380 Ergebnisse aufgrund fehlender Relevanz zur Forschungsfrage ausgeschlossen. Darauf folgend wurden die übrigen 73 Beiträge (Bild 2 Mitte) anhand der Schlüsselwörter und Abstrakts auf ihre thematische Relevanz überprüft. Dies führte zum Ausschluss von 19 Duplikaten und 14 nicht relevanten Ergebnissen. Die verbleibenden 40 Veröffentlichungen wurden im Kontext der Recherche als relevant eingestuft (Bild 2 rechts) und anhand qualitativer Analysemethoden im Detail ausgewertet.

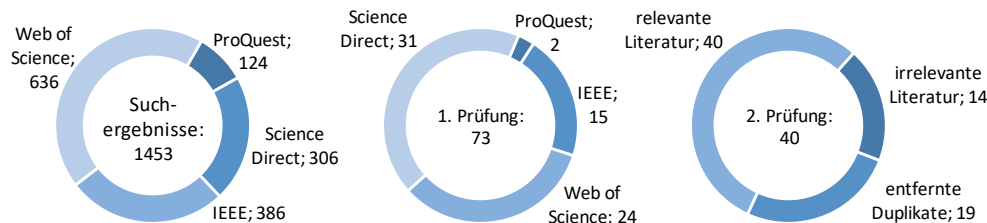


Bild 2: Quantitative Übersicht der systematischen Literaturrecherche

3.2 Datenerhebung–Industrie

Im Fokus der Industrie-Erhebungen standen fünf deutsche KMUs aus unterschiedlichen Branchen und Positionen in ihrer Wertschöpfungskette sowie unterschiedlichen Unternehmensalters. Jedes Unternehmen hat ein erfolgreiches Geschäftsmodell, welches rund um physische Güter mit nicht-digitalen, nachgelagerten Dienstleistungen aufgebaut ist. Zum Untersuchungszeitpunkt waren die Unternehmen bestrebt, ihr bestehendes Portfolio durch die Möglichkeiten der Digitalisierung „smart“ zu machen sowie ihre Produkte und Dienstleistungen zu Produkt-Service Systemen zu integrieren. Dadurch liefern die KMUs tiefe Einblicke in die Transformationsprozesse hin zur smart PSS-Entwicklung und bieten dabei eine ideale Grundlage für die Untersuchung. Die Datenerhebung erfolgte in mehreren Stufen durch Fragebögen, Experten-Interviews und Workshops, welche im Folgenden ausführlich vorgestellt werden.

Fragebögen und Interviews

In diesem Teil der Erhebung wurden insgesamt 18 Experten befragt, wobei insbesondere die fachliche Relevanz der Teilnehmenden hervorzuheben ist. Die Experten besaßen beispielsweise folgende Tätigkeitsbezeichnungen: Produkt-, Software- oder Serviceentwickler sowie After-Sales-Manager, IoT-Solution-Engineer, Projektleiter, Produktmanager, CTO-Digitalisierung oder Geschäftsführer. Alle Teilnehmenden beantworteten zunächst einen mehrseitigen Fragebogen und nahmen anschließend an offenen, leitfadengestützten Interviews teil, welche eine durchschnittliche Dauer von ungefähr 80 Minuten (kürzestes Interview: 43 Minuten und längstes Interview: 107 Minuten) hatten. Die Interviews wurden so lange durchgeführt, bis alle Themenfelder ausreichend abgedeckt wurden (Themenfelder: 1) kürzlich gestartetes Entwicklungsprojekt für smart PSS und die Rolle des Experten darin, 2) derzeitige Entwicklungsprozesse sowie 3) identifizierte Stärken und Schwächen im Kontext der smart PSS-Entwicklung). Zur Sicherung der Erkenntnisse wurden alle Interviews aufgezeichnet und anschließend transkribiert. (Palyenko et al. 2022)

Workshops

Im Anschluss an die halbstrukturierten Interviews wurden unternehmensindividuelle Workshops durchgeführt, um die Entwicklungspraktiken des Unternehmens zu untersuchen, die bestehenden Entwicklungsprozesse zu verstehen und Handlungsbedarfe aus der aktuellen Entwicklungspraxis abzuleiten. Hierfür lieferten die Teilnehmenden mitarbeiterspezifische Wahrnehmungen der Entwicklungsprozesse.

Die Betreuung und Durchführung der Workshops erfolgten durch zwei akademische Moderatoren. Ergänzend dazu nahmen zwei wissenschaftliche Mitarbeiter zweier weiterer Forschungseinrichtungen als

stille Beobachter teil. Sie haben die Workshops begleitet und anschließend trugen ihre Erkenntnisse zur Auswertung der Workshops bei.

Die Workshops bestanden aus mehreren Arbeitseinheiten mit den beiden primären Aufgaben: 1) das kollaborative Modellieren der aktuellen Produkt- und Serviceentwicklungsprozesse im untersuchten Unternehmen sowie 2) das Identifizieren von kritischen Schnittstellen zwischen der Produkt- und der Serviceentwicklung. Darüber hinaus wurden 3) die zuständigen Rollen je Schnittstelle sowie eingesetzte Methoden und Werkzeuge der Rollen erfasst und 4) Impulse für einen Änderungsbedarf abgefragt. Insgesamt standen den Experten vier Stunden Zeit zur Verfügung, um die Aufgaben zu bearbeiten.

An den Workshops nahmen 22 Experten (KMU A: 6; B: 5; C: 4; D: 4; E: 3) teil. Bei der Suche nach den Teilnehmenden stand insbesondere deren Fachkompetenzen hinsichtlich der smart PSS-Entwicklung im Vordergrund. Um ein einheitliches Verständnis für die Domäne sicherzustellen, erhielten alle Teilnehmenden vorab ein breites Glossar mit den smart PSS-bezogenen Begriffen und Definitionen. Zusätzlich startete der Workshop mit einer einleitenden Vorstellung existierender Entwicklungsmodelle. Hierbei wurden klassische Modelle sowohl der Produkt- als auch der Serviceentwicklung präsentiert. Darunter waren das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung (Gausemeier 2009), das Integrierte Produktentstehungs-Modell (Albers und Braun 2011), die VDI 2206 für die Entwicklung mechatronischer Systeme (VDI2206 2004), das T-Rex Reference Framework (Bullinger et al. 2015) und das Modell für die Entwicklung digitaler Dienstleistungssysteme (DIN SPEC 33453 2019).

Die Modellierung der Entwicklungsprozesse während der Arbeitseinheiten erfolgte anhand einer definierten Logik, die den vorgestellten klassischen Entwicklungsansätzen zugrunde liegt (siehe Bild 3). Dieses systematische Vorgehen erfasste zunächst die Phasen, dann die Teilprozesse und Prozessschritte mit den zugehörigen Rollen sowie abschließend die verwendeten Methoden und Werkzeuge.

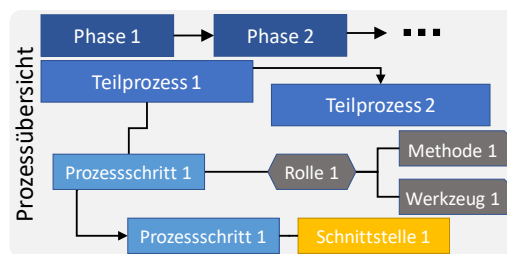


Bild 3: Modellierungslogik der Prozessübersicht

Die Bearbeitung der Arbeitseinheiten erfolgte mit Hilfe einer digitalen Plattform (ConceptBoard), auf der die Teilnehmenden gleichzeitig und eigenständig die Inhalte erstellen und ändern konnten. Zugleich wurde der Workshop von einem unternehmensindividuellen Leitfaden begleitet, welcher anhand relevanter Interviewinhalte als Impulsgeber vorbereitet wurde. Während des Workshops wurde ein reger Austausch gefördert und eine zielgerichtete Erarbeitung sowie Modellierung der Entwicklungsprozesse sichergestellt. Zusätzlich zu der digitalen Dokumentation wurden schriftliche Notizen erstellt, um möglichst viele Inhalte der Workshops zu erfassen. Die schriftliche Dokumentation enthielt sowohl explizite Aussagen der Teilnehmenden als auch bedeutsame Nuancen des Workshop-Ablaufs, um Rückschlüsse auf implizite Bedarfe ziehen zu können.

4 Datenauswertung

Für die Auswertung der akademischen- und industriellen-Daten wurden sowohl quantitative Methoden (Biedermann et al. 2012) als auch qualitative Methoden (Meuser und Nagel 2009) herangezogen. Hierdurch konnten zunächst 26 verschiedene Herausforderungen der smart PSS-Entwicklung identifiziert werden. Anschließend wurden die Ergebnisse der Workshops aggregiert und die essenziellen Erkenntnisse zusammengefasst, um eine Grundlage für die Identifizierung der Handlungsfelder zur Unterstützung der smart PSS-Entwicklung zu schaffen.

Tabelle 2 fasst die Herausforderungen sowie deren Vorkommen in der Literatur zusammen. Die am häufigsten genannten Herausforderungen hängen mit dem interdisziplinären Charakter von smart PSS und der damit einhergehenden Zunahme der Komplexität in der Koordination interner und externer

Akteure zusammen. Dabei sind viele Herausforderungen (#1; #2; #3; #4; #6; #7; #9; #18; #22) mit der Integration der Entwicklungsprozesse der drei relevanten Disziplinen: Produkt-, Service- und System-Engineering verbunden. Ebenso beziehen sich zahlreiche Herausforderungen (#8; #9; #12; #13; #14; #19; #20; #23; #26) auf die expliziten Inhalte des Entwicklungsprozesses. Zusätzlich spiegelt sich die Daten- und Informationsverarbeitung innerhalb des Systems in mehreren Herausforderungen (#5; #9; #10; #11; #16; #24) wieder. Außerdem beziehen sich einige Herausforderungen auf die Geschäftsmodellentwicklung (#15; #17; #21; #25) sowie den Ökosystem-Charakter (#4; #5; #6; #13) von smart PSS.

Tabelle 2: Herausforderungen in der Entwicklung von smart PSS

#	Herausforderungen	Häufigkeit	
1.	Interdisziplinäre Koordination verschiedener Interessenträger ^{1;2;3;4;5;6;8;10;11;14;15;16;17;18;20;21;22;23;24;25;27;30}	22	
2.	Entwicklung und Etablierung eines neuen Entwicklungsprozesses ^{1;4;6;7;8;9;10;11;13;14;17;19;22;23;26;34;35;36;38}	19	
3.	Entwicklung neuer Daten- und Informationsmanagementprozesse ^{1;3;5;6;8;9;10;12;13;16;23;24;26;27;32;33;35;37;39}	19	
4.	Interdisziplinäre Entwicklung entlang des Produktlebenszyklus ^{1;3;4;6;7;8;11;13;16;17;21;22;23;27;31;34;35;36}	18	
5.	Verarbeitung großer Datenmengen in Echtzeit ^{3;5;6;9;10;11;13;21;27;28;35;37;38}	13	
6.	Dynamisches Anpassen an Veränderung ^{5;6;8;11;16;23;24;25;28;34;39;40}	12	
7.	Integration von Produkt- und Serviceentwicklung ^{6;11;12;13;15;16;17;26;27;31;37}	11	
8.	Ökologische Nachhaltigkeit ^{8;10;11;13;20;24;27;29;37;39;40}	11	
9.	Entwicklung datenbasierter Services ^{3;5;6;7;10;26;26;30;37;38}	10	
10.	Anpassung bestehender Daten- und Informationsmanagementprozesse ^{6;9;12;16;23;26;27;32;33;39}	10	
11.	Entwicklung geeigneter Software- und IT-Infrastruktur ^{8;13;15;16;17;24;31;34;39;40}	10	
12.	Anforderungsanalyse für die Serviceentwicklung ^{8;15;19;23;26;32;33;35;37}	9	
13.	Integration des Kunden in den Entwicklungsprozess ^{5;11;12;18;19;20;24;26;39}	9	
14.	Anforderungsanalyse für die Produktentwicklung ^{2;8;15;23;26;32;33;35}	8	
15.	Etablierung neuer Geschäftsmodelle ^{8;11;14;16;24;26;27;30}	8	
16.	Software- und Datensicherheit ^{4;5;9;13;14;24;30}	7	
17.	Festlegung des Leistungsversprechens ^{3;13;17;19;23;31;33}	7	
18.	Anpassung des bestehenden Entwicklungsprozesses ^{19;22;26;34;35;40}	6	
19.	Fehlendes Know-how ^{10;13;16;23;24}	5	
20.	Ideengenerierung für neue smart PSS ^{2;14;17;20;31}	5	
21.	Aufrechterhalten des Leistungsversprechens ^{17;18;23;31;40}	5	
22.	Innerbetrieblicher Transformationsprozess ^{3;12;13;36}	4	
23.	Integration smarter Komponenten in bestehende Produkte ^{22;26;32}	3	
24.	Datenverarbeitung und Kontextsensitivität ^{11;30;34}	3	
25.	Vermarktung und Preisfindung ^{11;12;30}	3	
26.	Festlegung und Gewichtung von Entwicklungskriterien ²⁹	1	
Quellenverweise	1 - Belkadi et al. 2020	15 - Lee et al. 2018	29 - Song et al. 2021
	2 - Chen et al. 2020	16 - Lenkenhoff et al. 2018	30 - Takenaka et al. 2016
	3 - Chowdhury et al. 2018	17 - Liu et al. 2018a	31 - Valencia et al. 2014
	4 - Coba et al. 2020	18 - Liu et al. 2018b	32 - Wang et al. 2019a
	5 - Cong et al. 2020a	19 - Liu et al. 2020	33 - Wang et al. 2019b
	6 - Cong et al. 2020b	20 - Lugnet et al. 2020	34 - Watanabe et al. 2020
	7 - Dickopf et al. 2019	21 - Maleki et al. 2018a	35 - Wiesner et al. 2019
	8 - Forte et al. 2022	22 - Maleki et al. 2018b	36 - Zheng et al. 2017
	9 - Guo et al. 2021	23 - Moura Leite et al. 2020	37 - Zheng et al. 2018
	10 - Halstenberg et al. 2021	24 - Münch et al. 2022	38 - Zheng et al. 2019a
	11 - Huikkola et al. 2020	25 - Ostrosi et al. 2019	39 - Zheng et al. 2019b
	12 - Kölmel et al. 2015	26 - Paliyenko et al. 2022	40 - Zheng et al. 2019c
	13 - Kühlenkötter et al. 2017	27 - Pan et al. 2019	
	14 - Lee und Kau 2014	28 - Scholze et al. 2017	

Die identifizierten Herausforderungen spiegeln sich dementsprechend in der Entwicklungspraxis der KMUs wieder. Damit übereinstimmend zeigen die Expert-Interviews und Industrie-Workshops, dass die erfolgreiche Entwicklung von smart PSS maßgeblich mit der Orchestrierung der relevanten Disziplinen und Akteure zusammenhängt. Um das Erfolgspotential von smart PSS zu maximieren, ist es daher notwendig, eine Grundlage für die interdisziplinäre Zusammenarbeit und Kommunikation zu schaffen sowie die Wissenslücken zwischen den Bereichen zu füllen (Halstenberg et al. 2021; Belkadi et al. 2020).

Die Industrie-Erhebungen zeigen, dass keines der Unternehmen stringent einem expliziten Entwicklungsansatz folgt. Vielmehr hat die ursprüngliche Ausrichtung des Unternehmens als ein Produzent oder Dienstleister einen maßgebenden Einfluss auf die Gestaltung der Entwicklungsprozesse. Die KMUs besitzen individuelle und einzigartige Prozesse, welche sich mit der Zeit ausgebildet haben. Diese Prozesse sind in internen Richtlinien festgehalten und dienen als Grundlage für die Produkt- oder Serviceentwicklung. Dementsprechend zeigt die Auswertung der fünf Workshops, dass sich die aktuellen Entwicklungsprozesse der einzelnen Unternehmen maßgeblich voneinander unterscheiden, da sie mit dem Fortschritt der Transformation sowie mit dem Geschäftsmodell des jeweiligen Unternehmens zusammenhängen. KMUs, die vor kurzem mit der Entwicklung smarter PSS begannen, mangelt es oft an Personal, Ressourcen und dem notwendigen Wissen in relevanten Bereichen, um eine systematische Entwicklung von smart PSS umzusetzen. Entsprechend ging aus den Erhebungen hervor, dass vier der fünf KMUs noch keinen dedizierten smart PSS-Entwicklungsprozess eingeführt haben. Die Expertengaben an, dass sie es vorziehen würden, einen separaten Prozess für die Dienstleistungsentwicklung zu etablieren und diesen anschließend in den bestehenden Prozess für die Produktentwicklung zu integrieren. Hierfür bauen sie zuerst neues Wissen in den relevanten Disziplinen auf und versuchen dieses anschließend in die bestehenden Strukturen zu integrieren, ohne den ursprünglichen Prozess maßgebend zu verändern.

Die Unternehmen besitzen dadurch nach wie vor getrennte Entwicklungsstrukturen für die Produkt- und Serviceentwicklung, welche die Kommunikation und Interaktion zwischen den beteiligten Bereichen erschweren. Dies führt in der Praxis zu einer mangelnden Synchronisation der Prozesse und zu einer nachgelagerten Serviceentwicklung. Nichtsdestotrotz erkennen die Experten die Bedeutung der gleichzeitigen Entwicklung von Produkt und Service. So benennen sie auch zahlreiche kritische Schnittstellen entlang des gesamten Entwicklungsprozesses, an denen essentielle Abstimmungen vorgenommen und die beiden Entwicklungsstränge synchronisiert werden sollten. Allerdings ist den Unternehmen nicht bewusst, wie die Integration erfolgen muss, welche Schritte des Produktentwicklungsprozesses sich mit der Dienstleistungsentwicklung überschneiden und wie mögliche Schnittpunkte verbunden werden können. Bild 4 verdeutlicht die beschriebenen Diskrepanzen anhand einer schematischen Darstellung der Entwicklungsprozesse eines untersuchten KMUs.

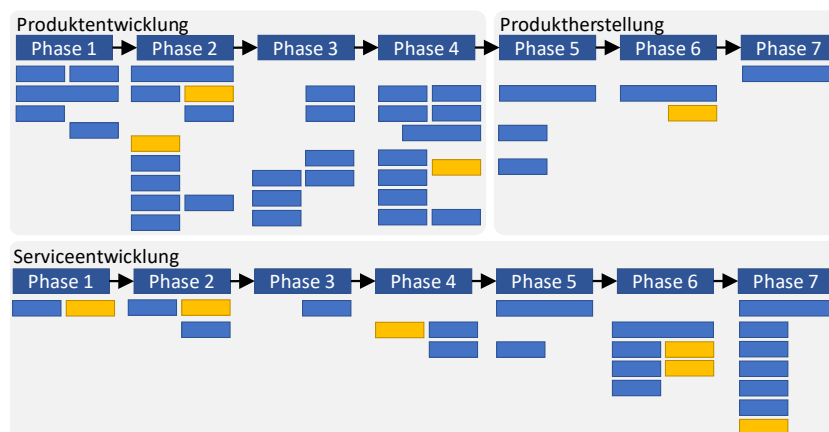


Bild 4: Schematische Darstellung des Produkt- (oben) und Serviceentwicklungsprozesses (unten) eines KMUs

Nichtsdestotrotz streben die Produzenten entsprechend dem Trend der Servitisierung nach einer Erweiterung des Produktangebots, um produktbegleitende Dienstleistungen. Innerhalb der Entwicklungsprozesse äußert sich das Bestreben anhand einer Erweiterung der organisationalen Strukturen um eine dedizierte Abteilung für Services oder After-Sales, welche an die Produktentwicklung gekoppelt wird und nachgelagert realisierbare Dienstleistungen entwickelt.

Ebenso zeigen die Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen der Unternehmensgröße und der Flexibilität der Entwicklungsprozesse. Kleine Unternehmen sind eher in der Lage, integrierte Entwicklungsprozesse mit einer intensiven Kommunikation und ebensolcher Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen umzusetzen. Dies wird aufgrund der geringen Unternehmensgröße und Mitarbeiterzahl möglich, da die einzelnen Mitarbeiter zwangsweise eine Vielzahl an Rollen während der Entwicklung übernehmen und zwischen den Bereichen und Disziplinen vermitteln können. Ebenso werden hierdurch flexible Entwicklungsstrukturen begünstigt, wodurch eine Anpassung an die Besonderheiten des aktuellen Entwicklungsvorhabens möglich wird.

5 Handlungsfelder

Die Erhebungen zeigen, dass die Herausforderungen aus Tabelle 2 sich in der Entwicklungspraxis deutscher KMUs wiederfinden. So stehen die untersuchten KMUs an unterschiedlichen Punkten im Transformationsprozess hin zur smart PSS-Entwicklung und bewältigen unterschiedliche Herausforderungen. Dabei verändert sich die Relevanz bestimmter Herausforderungen und entsprechender Unterstützungsbedarfe für jedes einzelne Unternehmen mit zunehmender Transformation der Geschäftsprozesse und -strukturen. Dadurch prägen sich die Unterstützungsbedarfe in unterschiedlichen Bereichen und auf unterschiedlichen Ebenen aus, wodurch mehrere Handlungsfelder abgeleitet werden können.

Methodenebene: Die Transformation des Unternehmens hin zur smart PSS-Entwicklung stellt eine mehrdimensionale Herausforderung dar. Dementsprechend zeigen die Industrie-Erhebungen, dass die Etablierung gänzlich neuer Entwicklungsprozesse in der Realität nicht umsetzbar ist. Aufgrund dessen müssen möglichst flexible oder sogar modulare Unterstützungen erforscht werden, sodass Unternehmen einzelne Bausteine nach Bedarf verwenden und in bestehende Strukturen integrieren können. Hierfür müssen die Methoden sowohl eine Anpassung an situative Faktoren ermöglichen als auch konkret und klar definiert sein (Verhoef et al. 2021; Cong et al. 2020a). Dadurch können einzelne Herausforderungen (bspw. #12; #13; #14; #20; #23; #26) in der smart PSS-Entwicklung adressiert werden.

Prozessebene: Die Erhebungen zeigen, dass die KMUs entweder auf Produktentwicklung oder Entwicklung von Dienstleistungen spezialisiert sind. Hierdurch besitzen sie korrespondierende Entwicklungsprozesse, welche sie um einen Produkt- oder Serviceanteil ergänzen. Dieses Vorgehen erweist sich als ineffektiv und ineffizient (Lugnet et al. 2020; Meier und Uhlmann 2012). Für eine erfolgreiche smart PSS-Entwicklung sollte vielmehr die Integration der beiden Entwicklungsstränge angestrebt werden (Herausforderungen #1; #2; #4; #7; #10; #18). Hierzu müssen in den Prozessen die Integrationspunkte identifiziert und auf geeignete Weise verbunden werden. Die Recherche zeigt, dass an diesen Schnittstellen sich insbesondere der Einsatz von Schlüsselrollen mit breitem, interdisziplinärem Wissen eignet. Hierdurch können heterogene Disziplinen zusammengebracht werden. Darüber hinaus muss eine zeitliche Koordination erfolgen, da Produkte, Dienstleistungen und Software unterschiedlich schnell die Entwicklungsphasen durchlaufen (Forte et al. 2022; Moser et al. 2019).

Organisationsebene: Innerhalb des Unternehmens ist es erforderlich geeignete Strukturen aufzubauen, um die smart PSS-Entwicklung zu begünstigen und zu unterstützen (Huikkola et al. 2021). Dies kann beispielweise durch den Aufbau neuer Organisationseinheiten mit eigenen finanziellen sowie personellen Ressourcen erfolgen. Initial können Pilotprojekte mit kleinen, interdisziplinären Teams umgesetzt werden. Sie ermöglichen eine kontrollierte Erprobung neuer unternehmensinterner und -externer Abläufe. Zusätzlich erlauben sie den Aufbau von grundlegendem Wissen und können zwecks Schaffung von interner Akzeptanz als Erfolgsgeschichten genutzt werden. Ebenso begünstigen solche Teams flache Hierarchien und direkte Kommunikationswege, welche die interdisziplinäre Zusammenarbeit fördern. Durch diese Maßnahmen werden bspw. die Herausforderungen #1; #2; #6; #7; #18; #19 und #22 adressiert.

Systemebene: Insbesondere KMUs besitzen auf der Systemebene aufgrund ihrer geringen Größe und knappen Ressourcen ein großes Potenzial. Durch gezielte Partnerschaften mit sich ergänzenden Akteuren können Know-How geteilt, Ressourcen gebündelt und durch ein gemeinsames Auftreten eine gesteigerte Marktpräsenz realisiert werden (Münch et al. 2022; Halstenberg et al. 2021). Die adressierte Problematik

wird vor allem am Beispiel von Teillieferanten verdeutlicht, da sie große Schwierigkeiten haben die Produktnutzer zu erreichen. Ihr Produkt ist in der Wertschöpfungskette weit vorgelagert, wodurch sich der direkte Kunde und der Produktnutzer oft unterscheiden. Deshalb sind der tatsächliche Endkunde oder die exakte Anwendung ihrer Produkte den Lieferanten oftmals unbekannt.

Um die Entwicklung des Systems zu unterstützen, benötigen die KMUs Unterstützung bei dem Aufbau der notwendigen System-Struktur, der Bestimmung relevanter Akteure und deren Beitrag zur Wertschöpfung (Zheng et al. 2017). Eine klare Modellierung der Verantwortlichkeiten erlaubt den einzelnen Unternehmen präzise Geschäftsmodelle zu definieren und datenbasierte Wertschöpfung zu realisieren (Herausforderungen #1; #15; #17; #19; #21; #25) (Liu et al. 2018b). Dabei unterstützen langfristige Kooperationen und Koalitionen die Entstehung einer fundierten Vertrauensbasis, wodurch der Daten- und Informationsaustausch gefördert wird. Ebenso kann die Etablierung von transparenten Daten- und Informationsstrukturen die Sicherheitsbedenken der Akteure reduzieren (Herausforderungen #3; #5; #10; #11; #16; #19; #24). Insgesamt können durch Partnerschaften das Kompetenzspektrum der KMUs erweitert und die realisierbare Wertschöpfung erhöht werden.

6 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag untersucht die Handlungsfelder zur Entwicklung von smart PSS. Hierzu wurden sowohl literaturbasierte Daten als auch praxisbezogene Daten aus der Industrie erhoben und ausgewertet. Eine systematische Literaturrecherche lieferte in Verbindung mit 18 Experten-Interviews eine umfassende Übersicht der aktuellen Herausforderungen hinsichtlich der smart PSS-Entwicklung. Zusätzlich erfolgte basierend auf den Herausforderungen und den Interviews eine tiefgehende Untersuchung der Entwicklungspraxis deutscher KMUs anhand von fünf interaktiven Workshops. Insgesamt 22 Experten lieferten während der Workshops essentielle Einblicke in die aktuellen Entwicklungsprozesse ihrer Unternehmen und äußerten zahlreiche Änderungs- sowie Unterstützungsbedarfe. Zusammen ermöglichen diese Erhebungen eine umfassende Analyse der Entwicklungspraxis sowie das Ableiten von Handlungsfeldern zur Unterstützung der smart PSS-Entwicklung. Dabei können mehrere Betrachtungsebenen identifiziert werden, wie die Methoden-, Prozess-, Organisations- und Systemebene. Innerhalb dieser Ebenen werden sowohl Handlungsfelder aufgedeckt als auch potenzielle Lösungsansätze vorgestellt.

Insgesamt liefern die abgeleiteten Handlungsfelder zusammen mit den identifizierten Herausforderungen eine industrieorientierte Grundlage für die Erforschung potentieller Unterstützungsmethoden. Es ist insbesondere für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten wichtig, dass die entwickelten Methoden und Vorgehensmodelle sich an der Praxis orientieren und auf dieser aufbauend entstehend. Dadurch können sowohl deren Eignung als auch Relevanz unabhängig vom adressierten Handlungsfeld sichergestellt werden. Die Erhebungen zeigen, dass die Industrie insbesondere durch die weiterführende Erforschung integrierter Entwicklungsprozesse profitieren würde. Hierbei müsse der Fokus auf der Zusammenführung der Geschäftsmodell-Entwicklung, der Entwicklung smarter Produkte und der Entwicklung datenbasierter Services liegen. Ebenso wäre eine Methodik zur Modellierung der System-Strukturen des smart PSS hilfreich, um die Unternehmen bei dem Aufbau der System-Struktur und der Koordination der Akteure zu unterstützen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung durch das Forschungsprojekt „bi.smart“ (Förderkennzeichen 02J19B041) gefördert.

Literaturverzeichnis

- | | |
|-----------------------|---|
| Albers und Braun 2011 | Albers, A. und Braun, A. (2011): „Der Prozess der Produktentstehung“. In Henning, F. und Moeller, E.: Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Hanser, München, S. 5-30. |
| Belkadi et al. 2020 | Belkadi, F.; Boli, N.; Usatorre, L.; Maleki, E.; Alexopoulos, K.; Bernard, A. und Mourtzis, D.: A knowledge-based collaborative platform for PSS design and |

- production. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 29 (2020), S. 220–231.
- Biedermann et al. 2012 Biedermann, W.; Katharina, K. und Killel, M.: Forschungsmethodik in den Ingenieurwissenschaften. Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, München, 2012.
- Blessing und Chakrabarti 2009 Blessing, L. und Chakrabarti, A. (2009): DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London.
- Bullinger et al. 2015 Bullinger, H.-J., Meiren, T. und Nägele, R., (2015): Smart Services in Manufacturing Companies, in 23rd International Conference on Production research (ICPR 2015): Manila, Philippines.
- Böhmman et al. 2018 Böhmman, T., Leimeister, J. M., und Möslin, K. (2018): The New Frontiers of Service Systems Engineering. Business & Information Systems Engineering, Vol. 60 No. 5, S. 373–375.
- Chen et al. 2020 Chen, S.; Chen, J.; Huang, C. und Ren, T.: The Design Research of Smart Product-Service System Oriented to User; In: 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): IEEE. 2020, S. 300-304.
- Chowdhury et al. 2018 Chowdhury, S.; Haftor, D. und Pashkevich, N.: Smart Product-Service Systems (Smart PSS) in Industrial Firms: A Literature Review. In: Procedia CIRP 73 (2018), S. 26–31.
- Coba et al. 2020 Coba, C. M.; Boucher, X.; Gonzalez-Feliu, J.; Vuillaume, F. und Gay, A.: Towards a risk-oriented Smart PSS Engineering framework. In: Procedia CIRP 93 (2020), S. 753–758.
- Cong et al. 2020a Cong, J.-C.; Chen, C.-H.; Zheng, P.; Li, X. und Wang, Z.: A holistic relook at engineering design methodologies for smart product-service systems development. In: Journal of Cleaner Production 272 (2020).
- Cong et al. 2020b Cong, J.-C.; Zheng, P.; Chen, C.-H.: Design Entropy Theory: A Novel Transdisciplinary Design Methodology for Smart PSS Development. In: Proceedings of the 27th ISTE International Conference on Transdisciplinary Engineering, 2020, S. 405-214.
- Dickopf et al. 2019 Dickopf, T.; Hristo, A.; Patrick, M.; Göbel, J. C.; Sven, F.: A Holistic System Lifecycle Engineering Approach – Closing the Loop between System Architecture and Digital Twins. In: Procedia CIRP 84 (2019), S. 538–544.
- DIN SPEC 33453 2019 Deutsches Institut für Normung e. V., (2019), DIN SPEC 33453: Development of digital service systems.
- Filho et al. 2017 Filho, M.F., Liao, Y., Loures, E.R. and Junior, O.C. (2017), "Self-Aware Smart Products: Systematic Literature Review, Conceptual Design and Prototype Implementation", Procedia Manufacturing, Vol. 11 Special Issue: 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, S. 1471-1480.
- Forte et al. 2022 Forte, S.; Ehemann, T.; Wiegand, K.; Göbel, J. C.: Enabling Collaborative Lifecycle Engineering of Smart Products and Services by an Adaptive Innovation Infrastructure. In: Springer, Cham, 2022, S. 347–357.
- Gausemeier 2009 Gausemeier, J.; Plass, C. und Wenzelmann, C. (2009): Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München, Hanser, 2009
- Guo und Jiang 2021 Guo, W.; Jiang, P.: Framework for designing a smart connected product service system. In: 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI): IEEE, 2021. S. 448-451.
- Halstenberg et al. 2021 Halstenberg, F.; Dönmez, J.; Mennenga, M.; Herrmann, C.; Stark, R.: Knowledge transfer and engineering methods for smart-circular product service systems. In: Procedia CIRP 100 (2021), S. 379–384.
- Huikkola et al. 2021 Huikkola, T.; Kohtamäki, M.; Rabetino, R.; Makkonen, H.; Holtkamp, P.: Overcoming the challenges of smart solution development: Co-alignment of processes, routines, and practices to manage product, service, and software integration. In: Technovation (2021), S. 102-382.
- Kölmel et al. 2015 Kölmel, B.; Bulander, R.; Dittmann, U.; Schatter, A.; Kuhn, A.: Sustainability and competitiveness through digital product-service-systems. In: eChallenges 2015 Conference: IEEE, 2015
- Kuhlenkötter et al. 2017 Kuhlenkötter, B.; Wilkens, U.; Bender, B.; Abramovici, M.; Süße, T.; Göbel, J.; Herzog, M.; Hypki, A.; Lenkenhoff, K.: New Perspectives for Generating Smart PSS Solutions – Life Cycle, Methodologies and Transformation. In: Procedia CIRP 64 (2017), S. 217–222.

- Lee et al. 2018 Lee, C.-H.; Chen, C.-H.; Lee, Y.-C.; Wang, Z.: An Integrated Computer-aided Design Environment for Customizing Product/Service Systems. In: *Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0* (2018), S. 469–478.
- Lee et al. 2019 Lee, C.-H.; Chen, C.-H.; Trappey, A. J. C.: A structural service innovation approach for designing smart product service systems: Case study of smart beauty service. In: *Advanced Engineering Informatics* 40 (2019), S. 154–167.
- Lee und Kao 2014 Lee, J.; Kao, H.-A.: Dominant Innovation Design for Smart Products-Service Systems (PSS): Strategies and Case Studies. In: *2014 Annual SRII Global Conference: IEEE*, 2014, S. 305–310.
- Lenkenhoff et al. 2018 Lenkenhoff, K.; Wilkens, U.; Zheng, M.; Süße, T.; Kuhlenkötter, B.; Ming, X.: Key challenges of digital business ecosystem development and how to cope with them. In: *Procedia CIRP* 73 (2018), S. 167–172.
- Liu et al. 2018a Liu, C. H.; Xiao, D. K.; Zhang, Q. S.; Chen, J. R.: Exploring Applying Smart Interconnection Technology to Product Service Systems. In: *2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering: 14-16 September 2018, Huhhot, China. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018, S. 636–639.
- Liu et al. 2020 Liu, Z.; Ming, X.; Qiu, S.; Qu, Y.; Zhang, X.: A framework with hybrid approach to analyse system requirements of smart PSS toward customer needs and co-creative value propositions. In: *Computers & Industrial Engineering* 139 (2020), S. 105–776.
- Liu et al. 2018b Liu, Z.; Ming, X.; Song, W.; Qiu, S.; Qu, Y.: A perspective on value co-creation-oriented framework for smart product-service system. In: *Procedia CIRP* 73 (2018b), S. 155–160.
- Lugnet et al. 2020 Lugnet, J.; Ericson, Å.; Larsson, T.: Design of Product-Service Systems: Toward An Updated Discourse. In: *Systems* 8 (2020), Nr. 4, S. 1–14.
- Maleki et al. 2018a Maleki, E.; Belkadi, F.; Bernard, A.: Industrial Product-Service System modelling base on Systems Engineering: Application of sensor integration to support smart services. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018), Nr. 11, S. 1586–1591.
- Maleki et al. 2018b Maleki, E.; Belkadi, F.; Boli, N.; Van Der Zwaag, B. J.; Alexopoulos, K.; Koukas, S.; Marin-Perianu, M.; Bernard, A.; Mourtzis, D.: Ontology-Based Framework Enabling Smart Product-Service Systems: Application of Sensing Systems for Machine Health Monitoring. In: *IEEE-Internet of Things Journal* 5 (2018), Nr. 6, S. 4496–4505.
- Matschewsky et al. 2016 Matschewsky, J.; Sakao, T.; Khanagha, S.; Elfving, S. W.: What's in it for the Provider? The Case of a Telecom Vendor's Value Capturing from the Transition to Product-Service Systems. In: *Procedia CIRP* 47 (2016), S. 6–11.
- Meier und Uhlmann 2012 Meier, H.; Uhlmann, E.: *Hybride Leistungsbündel – ein neues Produktverständnis. In: Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen: Springer, Berlin, Heidelberg*, 2012, S. 1–21.
- Moser et al. 2019 Moser, B.; Kampker, A.; Jussen, P.; Frank, J.: Organization of Sales for Smart Product Service Systems. In: *Springer, Cham*, 2019, S. 518–526.
- Mora Leite et al. 2020 Moura Leite, A. F.C.S.; Canciglieri, M. B.; Goh, Y. M.; Monfared, R. P.; Rocha L.; Canciglieri, O.: Current Issues in the Flexibilization of Smart Product-Service Systems and their Impacts in Industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing* 51 (2020), S. 1153–1157.
- Münch et al. 2022 Münch, C.; Marx, E.; Benz, L.; Hartmann, E.; Matzner, M.: Capabilities of digital servitization: Evidence from the socio-technical systems theory. In: *Technological Forecasting and Social Change* 176 (2022), S. 121–361.
- Ostrosi et al. 2021 Ostrosi, E.; Fougères, A.-J.; Zhang, Z.-F.; Stjepandic, J.: Intelligent modular design with holonic fuzzy agents. In: *Advances in Manufacturing* 9 (2021), Nr. 1, S. 81–103.
- Paliyenko et al. 2022 Paliyenko, Y.; Tüzün, G.-J.; Roth, D.; Kreimeyer, M.: Inquiry and Analysis of Challenges in the Development of Smart Product-Service Systems. In: *Proceedings of the Design Society* 2 (2022), S. 1935–1944.
- Pan et al. 2019 Pan, S.; Zhong, R. Y.; Qu, T.: Smart product-service systems in interoperable logistics: Design and implementation prospects. In: *Advanced Engineering Informatics* 42 (2019), S. 100–996.
- Schiller et al. 2022 Schiller, C.; Freitag, M.; Leiden, A.; Herrmann, C.; Gorovoj, A.; Hering, P.; Hering, S.: Reference Model for Product-Service Systems with an Use Case from the Plating Industry. In: *Springer, Cham*, 2022, S. 335–342.

- Scholze et al. 2017 Scholze, S.; Correia, A. T.; Nagorny, K.: Services for development of Situational Aware Intelligent PSS. In: 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC): IEEE, 2017.
- Song et al. 2021 Song, W.; Niu, Z.; Zheng, P.: Design concept evaluation of smart product-service systems considering sustainability: An integrated method. In: Computers & Industrial Engineering 159 (2021), S. 107-485.
- Spath et al. 2012 Spath, D.; Meiren, T. und Münster, M.: F&E-Management für Lösungsanbieter. In: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (2012), V. 65, S. 73–87.
- Strobel et al. 2021 Strobel, G.; Paukstadt, U.; Becker, J.; Eicker, S.: Von smarten Produkten zu smarten Dienstleistungen und deren Auswirkung auf die Wertschöpfung. In: IoT–Best Practices: Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021, S. 225–244.
- Takenaka et al. 2016 Takenaka, T.; Yamamoto, Y.; Fukuda, K.; Kimura, A.; Ueda, K.: Enhancing products and services using smart appliance networks. In: CIRP Annals 65 (2016), Nr. 1, S. 397–400.
- Valencia et al. 2014 Valencia, A.; Mugge, R.; Schoormans, J. P. L.; Schifferstein, H.: Challenges in the design of smart product-service systems (PSSs): Experiences from practitioners. In: 19th DMI: Academic Design Management Conference, 2014.
- Valencia et al. 2015 Valencia, A.; Mugge, R.; Schoormans, J. P. L.; Schifferstein, H.: The design of smart product-service systems (PSSs): An exploration of Design characteristics. In: International Journal of Design Vol. 9, No. 1, 2015.
- VDI 2206 2004 Verein Deutscher Ingenieure (2004), VDI/VDE 2206: Design methodology for mechatronics systems.
- Verhoef et al. 2021 Verhoef, P.C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Qi Dong, J. et al. (2021), "Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda", Journal of Business Research, Vol. 122, S. 889-901.
- Wang et al. 2019a Wang, Z.: Research on Design Method of Intelligent Service System in Product Processing under PSS Concept. In: Procedia CIRP 83 (2019), S. 705–709.
- Wang et al. 2019b Wang, Z.; Zheng, P.; Chen, C.-H.; Khoo, L. P.: A Survey of Requirements Management in Smart Product-Service Systems. In: Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems: IOS Press, 2019, S. 613–622.
- Watanabe et al. 2020 Watanabe, K.; Okuma, T.; Takenaka, T.: Evolutionary design framework for Smart PSS: Service engineering approach. In: Advanced Engineering Informatics 45 (2020), S. 101-119.
- Wiesner et al. 2019 Wiesner, S.; Hauge, J. B.; Sonntag, P.; Thoben, K.-D.: Applicability of Agile Methods for Dynamic Requirements in Smart PSS Development. In: Springer, Cham, 2019, S. 666–673.
- Zhang und Banerji 2017 Zhang, W.; Banerji, S.: Challenges of servitization: A systematic literature review. In: Industrial Marketing Management 65 (2017), S. 217–227.
- Zheng et al. 2017 Zheng, M.; Ming, X.; Wang, L.; Yin, D.; Zhang, X.: Status Review and Future Perspectives on the Framework of Smart Product Service Ecosystem. In: Procedia Cirp 64 (2017), S. 181–186.
- Zheng et al. 2018 Zheng, P.; Lin, T. J.; Chen, C., H.; Xu, X.: A systematic design approach for service innovation of smart product-service-systems. In: Journal of cleaner production (2018), S. 657-667.
- Zheng et al. 2019a Zheng, P.; Liu, Y.; Tao, F.; Wang, Z.; Chen, C.-H.: Smart Product-Service Systems Solution Design via Hybrid Crowd Sensing Approach. In: IEEE-Access 7 (2019), S. 128463–128473.
- Zheng et al. 2019b Zheng, P.; Wang, Z.; Chen, C.-H.: Industrial smart product-service systems solution design via hybrid concerns. In: Procedia CIRP 83 (2019), S. 187–192.
- Zheng et al. 2019c Zheng, P.; Wang, Z.; Chen, C.-H.; Pheng, K. L.: A survey of smart product-service systems: Key aspects, challenges and future perspectives. In: Advanced Engineering Informatics 42 (2019), S. 100-973.
- Zhang et al. 2020 Zhang, Z.; Xu, D.; Ostrosi, E.; Cheng, H.: Optimization of the Product–Service System Configuration Based on a Multilayer Network. In: Sustainability 12 (2020), Nr. 2/746, S. 1-28.

Herausforderungen an die Umsetzung der digitalen Transformation in Brownfield-Produktionssystemen

Challenges for the implementation of digital transformation in brownfield production systems

Valesko Dausch¹, Dr.-Ing. Daniel Roth¹, Dr.-Ing. Sebastian Bohr², Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer¹,

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Stuttgart

<https://www.uni-stuttgart.de/>

²MAN Truck & Bus SE, 80995 München

<https://www.mantruckandbus.com>

Abstract (deutsch): Die digitale Transformation ist gerade für die Produktion in großen und kleinen Unternehmen eine Chance, welche jedoch auch die Wettbewerbsfähigkeit bedrohen kann. Die digitale Transformation zielt auf die Vernetzung von Geräten, Systemen, Daten und Menschen ab. Hierdurch soll die Qualität der Produkte gesteigert, die Kosten der Herstellung gesenkt und die Effizienz in der Produktion optimiert werden. Obwohl die digitale Transformation durch die Industrie 4.0 nun seit über einem Jahrzehnt voranschreitet und die weltweite Covid-19 Pandemie die Digitalisierung in Summe beschleunigt hat, stagniert der Fortschritt teilweise in Unternehmen. Dieser Beitrag arbeitet die Herausforderungen heraus, welche im Kontext der digitalen Transformation in der Produktion bestehen und zeigt zukünftige Forschungsschwerpunkte auf, um die Digitalisierung zielgerichtet weiterzutreiben. Die Erarbeitung der Herausforderungen erfolgt sowohl über eine systematische Literaturrecherche als auch über semistrukturierte Interviews.

Keywords (deutsch):

Digitale Transformation, Industrie 4.0, Industrie 5.0, Produktion, Herausforderungen

Abstract (english): Digital transformation is an opportunity for production in large and small companies in particular, but it can also threaten competitiveness. Digital transformation aims to network devices, systems, data and people. This is intended to increase the quality of products, reduce manufacturing costs and optimize efficiency in production. Although digital transformation through Industry 4.0 has been progressing for over a decade now, and the global Covid-19 pandemic has accelerated digitization in aggregate, in some cases progress in companies has stagnated. This paper elaborates the challenges that exist in the context of digital transformation in production and identifies future research priorities to drive digitization forward in a targeted manner. The challenges are identified by means of both a systematic literature review and semi-structured interviews.

Keywords (english):

Digital Transformation, Industry 4.0, Industry 5.0, Production, Challenges

1 Einführung und Motivation

Unternehmen müssen heute digitale Technologien implementieren, welche sich durch den technischen Fortschritt zunehmend verbreiten und so langfristig Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit nehmen zu können (Jones et al. 2021). Dieser Vorgang wird als digitale Transformation bezeichnet. Das übergeordnete Ziel ist es die Kosten zu senken, die Qualität zu erhöhen und die Produktionszeit zu reduzieren (Alqoud et al. 2022). Hierfür ist ein hoher Vernetzungsgrad von Systemen sowie der Einsatz weiterer disruptiver Technologien, wie künstliche Intelligenz (KI), Cloud Computing oder Augmented Reality (AR) erforderlich (Dogea et al. 2021). Gerade durch die Covid-Pandemie haben viele Bereiche des alltäglichen Lebens und Unternehmen die Digitalisierung vorangetrieben (Facchini et al. 2022; Jones et al. 2021; Kang et al. 2021). Obwohl Unternehmen aus den zuvor genannten Gründen eine Motivation zur Digitalisierung aufweisen, stagniert die digitale Transformation (Alqoud et al. 2022; Yang et al. 2019). Dies ist daran zu erkennen, dass ein Großteil der begonnenen Digitalisierungsprojekte nicht erfolgreich verlaufen (Facchini et al. 2022). Die digitale Transformation im industriellen Kontext wird auch als „Industrie 4.0“ bezeichnet (Castelo et al. 2022). Obwohl dieser Begriff bereits 2011 durch Kagermann et al (2011) definiert wurde, ist nach wie vor ein stetiger Zuwachs von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu diesem Thema festzustellen (Coelho et al. 2023). Daraus lässt sich eine hohe Relevanz des Themas schlussfolgern. Zudem kann die Hypothese gebildet werden, dass Herausforderungen bestehen, welche bisher nicht zufriedenstellend gelöst werden konnten. Das Ziel dieses Beitrags ist die Erarbeitung von Herausforderungen der digitalen Transformation, welche sich insbesondere in der Produktion ergeben. Ferner soll über die Durchführung von Expert:innengesprächen die praktische Relevanz der gefundenen Herausforderungen initial am Beispiel der Nutzfahrzeugproduktion aufgezeigt werden. Anschließend soll durch die gewonnenen Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Trends in diesem Forschungsbereich erfolgen.

2 Abgrenzung der Begriffe zur digitalen Transformation

Einige Begriffe, welche im industriellen Kontext der digitalen Transformation genutzt werden, sind nicht eindeutig definiert (Jones et al. 2021) und werden so teilweise missverständlich gebraucht. Daher erfolgt in diesem Abschnitt eine Erläuterung der Begriffe, da die korrekte Auswahl der Keywords maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der Literaturrecherche in Abschnitt 4 nimmt. Wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, wird neben dem Begriff der digitalen Transformation auch „Industrie 4.0“ verwendet. Das Konzept der Industrie 4.0 kennzeichnet den Beginn der vierten industriellen Revolution (Möller 2016) und tauchte erstmals in Deutschland (Szajna et al. 2020) im Jahr 2011 auf. Die Industrie 4.0 umfasst besonders die Integration von Cyber-physischen-Systemen (CPS) und der Etablierung des Internets der Dinge (engl. Internet of Things, IoT) (Kagermann et al. 2013). CPS erfassen über Sensoren Daten, speichern diese und führen nach erfolgreicher Auswertung eine Aktion mittels Aktoren aus. CPS sind untereinander vernetzt und bilden die Brücke zwischen realer und digitaler Welt (Zeiler 2022). Im IoT werden Alltagsobjekte über kommunikationsfähige Mikrocontroller an das Internet angebunden (Shariatzadeh et al. 2016). Die Etablierung von CPS und IoT geschieht durch die horizontale Integration (Verbindung von Systemen zwischen Unternehmen), der vertikalen Integration (Verbindung von Systemen über mehrere Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide) und das durchgängige digitale Engineering (Kommunikation in digitaler Form entlang des gesamten Produktlebenszyklus) (Cimini et al. 2017; Kagermann et al. 2013). Neben CPS und IoT ist der Digital Twin ebenfalls ein wichtiges Konzept der Industrie 4.0 (Dogea et al. 2021). Der Begriff „Digital Twin“ wird ebenfalls als Synonym für „Digital Model“ und „Digital Shadow“ verwendet. Die Unterscheidung wird durch den Automatisierungsgrad der Datenflüsse zwischen realer und virtueller Welt gebildet (Tchana et al. 2019). Werden die zuvor genannten Konzepte und Technologien angewendet, wird von Digital Manufacturing (Aufbau von virtuellen Modellen eines physischen Systems) oder Smart Manufacturing (Integration von physischen und digitalen Systemen) (Li et al. 2018) gesprochen.

Mittlerweile wird zudem der Begriff „Industrie 5.0“ ergänzend zu „Industrie 4.0“ genutzt (Coelho et al. 2023). Gemäß der europäischen Kommission sind die übergeordneten Ziele der Industrie 5.0 Nachhaltigkeit, Resilienz und die Zentrierung auf den Menschen (European Commission et al. 2021). Im weiteren Verlauf des Beitrags wird die digitale Transformation als Überbegriff für die hier vorgestellten Konzepte verwendet. Dieser Beitrag fokussiert sich auf die digitale Transformation in Brownfield-Produktionsumgebungen. Unter Brownfield wird nach Hopkins et al. (2008) eine bestehende Architektur von Altsystemen, verstanden. Der Begriff wird verwendet, wenn neue Systeme in diese Altsysteme integriert werden müssen (Hopkins et al. 2008). Die Erkenntnisse dieses Beitrags sind dennoch teilweise auf Neuplanungen (Greenfield) übertragbar.

3 Vorgehensweise und Aufbau des Beitrags

Die Herausforderungen der digitalen Transformation werden anhand von zwei Methoden erarbeitet. Zunächst erfolgt eine systematische Literaturrecherche, welche zum Ziel hat, den aktuellen Stand der Forschung abzubilden und zusammenzufassen. Im Anschluss werden die theoretisch erhobenen Anforderungen durch semistrukturiert geführte Interviews mit Digitalisierungsexpert:innen von einem führenden europäischen Nutzfahrzeug-OEM verglichen.

3.1 Systematische Literaturrecherche

Für das Auffinden der Literatur wurde im Januar 2023 eine systematische Recherche auf Scopus durchgeführt. Die Schritte des Vorgehens zur Sichtung der Literatur sind in Bild 1 dargestellt. Zunächst wurden relevante Keywords identifiziert, welche anschließend zu einem Search String kombiniert wurden (siehe Bild 1). Nach der Filterung wurden Beiträge aus dem Zeitraum von 2011 bis 2023, in deutscher oder englischer Sprache aus den Kategorien: „Engineering“, „Computer Science“ und „Business, Management and Accounting“ berücksichtigt. In der „Analyse 1“ wurden zunächst Titel und Abstract gesichtet, in der „Analyse 2“ werden alle verbliebenen Beiträge vollständig gesichtet. Die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche werden in Abschnitt 4 vorgestellt.

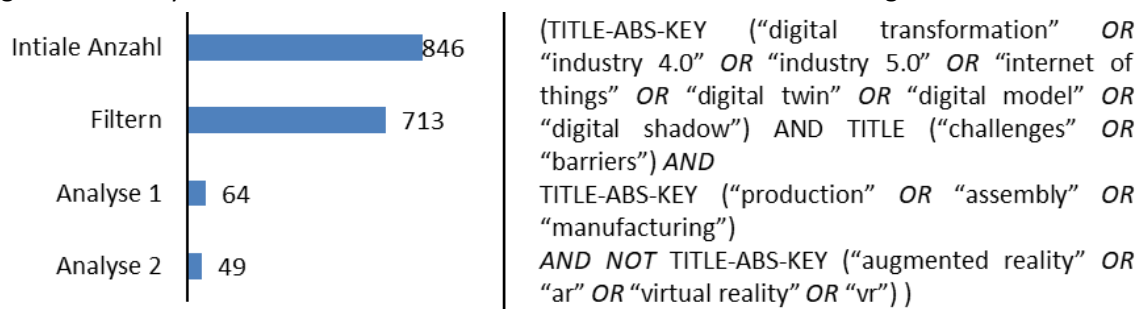


Bild 1: Analyierte Beiträge der systematischen Literaturrecherche

Bild 2 zeigt die Menge der Beiträge pro Jahr nach der Filterung (siehe Bild 1). Hieraus geht die Zunahme der Relevanz des Themas in den letzten Jahren durch die Anzahl der jährlichen Beiträge zum Thema hervor. Diese Entwicklung ist unter anderem durch die Covid-19 Pandemie begünstigt worden.

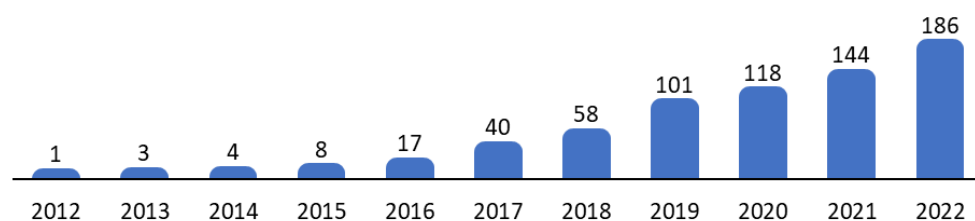


Bild 2: Anzahl an Publikationen im Kontext der digitalen Transformation nach Erscheinungsjahr

3.2 Expert:inneninterviews

Die Teilnehmenden der Expert:inneninterviews sind Beschäftigte eines europäischen Nutzfahrzeugherstellers. Alle Teilnehmer:innen beschäftigen sich im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit mit der digitalen Transformation der Produktion. Die Interviews wurden mit einer Dauer von 45 bis 60 Minuten durchgeführt. Hierbei wurde zunächst eine kurze Einführung zum Hintergrund des Interviews gegeben, um die Fragen in den richtigen Kontext der digitalen Transformation einzuordnen. Die Interviews wurden in semistrukturierter Form durchgeführt. Die Hauptfragen des Interviews sind nachfolgend aufgeführt:

- Welche Herausforderungen treten bei der Integration von digitalen Technologien in der Produktion auf?
- Gibt es ein Zielbild zur Digitalisierung des Brownfields, welches Ihnen als Orientierung dient?
- Kennen Sie (genormte) Referenzarchitekturen? Wenn ja: Wenden Sie diese an?
- Wie kann die digitale Transformation Ihrer Meinung nach realistisch bewältigt werden?

Eine Übersicht zu den persönlichen Merkmalen der Befragten ist in Bild 3 zu finden. In Summe wurden 11 Interviews geführt. Die Auswertung der Interviews erfolgt in Abschnitt 5.

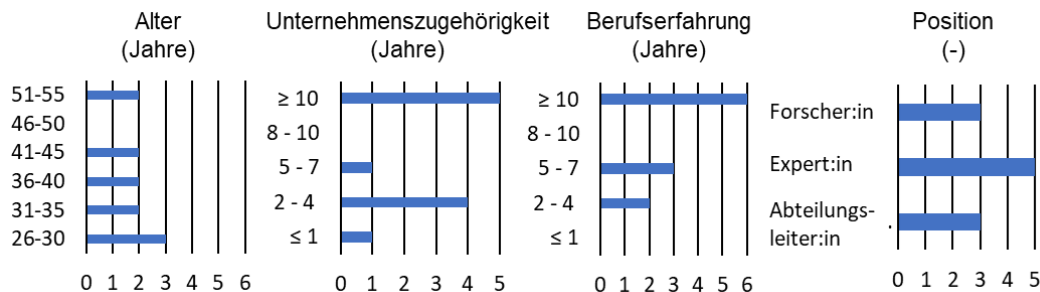


Bild 3: charakteristische Merkmale der Teilnehmenden in den Interviews

4 Herausforderungen der digitalen Transformation aus der Literaturrecherche

Dieser Abschnitt enthält die Herausforderungen, welche aus der systematischen Literaturrecherche erhoben werden konnten.

4.1 Technologische Herausforderungen

Die Digitalisierung bringt neue Technologien in die Unternehmen und führt somit zu technologischen Veränderungen. Gerade bei größeren Firmen sind Änderungen schwierig umzusetzen. Für die Vernetzung von Informationen aus heterogenen Systemen (Kübler et al. 2022) ist daher meist die Verbindung von Systemen eine notwendige Basis (Alabadi et al. 2022; Chehri et al. 2021; Dogea et al. 2021; Goundar et al. 2021; Hernandez et al. 2020, Nair et al. 2021). Die Anbindung heterogener Systemlandschaften kann über eine IoT-Plattform erfolgen (Kübler et al. 2022; Malhotra et al. 2022). In der Umsetzung sind hierzu viele neue Schnittstellen aus vorhandenen und neuen Systemen heraus zu schaffen. Hierfür sind geeignete Konzepte auszuwählen, welche die Summe der Datenflüsse zuverlässig bewältigen können (Kübler et al. 2022). Mit der zunehmenden Integration von Sensoren in große drahtlose Sensornetze (Wireless Sensor Networks, WSN) erreichen Netzwerke die Grenzen (Malhotra et al. 2022) der Übertragungsfähigkeit. Zudem beeinflusst die Auswahl der Netzwerktechnologien die Latenz der Übertragung. Für viele Anwendungen ist die Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung eine wichtige Anforderung und somit auch eine Herausforderung für die Implementierung von Industrie 4.0 (Jung et al. 2019; Malhotra et al. 2022). Hierzu ist die Einführung von 5G oder Wi-Fi 6 vielversprechend, da drahtlos hohe Datenmengen bei geringer Latenz übertragen werden können (Adel et al. 2022; Alabadi et al. 2022; Kang et al. 2021). Im Rahmen neuer technologischer Möglichkeiten ist der Mensch entsprechend dem Gedanken der Industrie 5.0

(Mourtzis et al. 2022) in den Mittelpunkt zu stellen. Dabei muss die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine berücksichtigt werden. Menschen müssen mit den bereitgestellten Daten interagieren und diese interpretieren (Adel et al. 2022; Gupta et al. 2022; Jones et al. 2021; Kübler et al. 2022). Zusammenfassend wurden folgende technologische Herausforderungen ermittelt:

- C1: Verbindung heterogener Systeme mit geeigneten Schnittstellen
- C2: Netzwerktechnologie, um die Daten stabil und zuverlässig zu übertragen
- C3: Geringe Latenz bei Echtzeitanwendungen
- C4: Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine bei gesteigertem Informationsfluss

4.2 Herausforderungen hinsichtlich der Kompetenz der Mitarbeiter:innen

Eine wesentliche Änderung, die sich aus Studien zur digitalen Transformation abzeichnet ist, dass durch die Einführung von neuen Technologien und einer durchgängigen Verarbeitung von Daten, eine Veränderung der Fähigkeiten von Mitarbeiter:innen im gesamten Unternehmen (Alekseev et al. 2020; Alqoud et al. 2022; Gupta et al. 2022; Jones et al. 2021; Nimawat et al. 2022; Ranka et al. 2022) ergibt. Zum einen führt das dazu, dass neue Talente für ein Unternehmen gewonnen werden müssen und andererseits auch dazu, dass die fortlaufende Umqualifizierung vorhandener Mitarbeiter:innen durchgeführt und gesteuert werden muss (Kumar et al. 2020). Dieser Wandel wird auch als S“ozio-technische Evolution“ bezeichnet (Senna et al. 2022) und beeinflusst den organisatorischen Aufbau einer Organisation, da zahlreiche neue Stellen und Bereiche in Ergänzung zu einem Qualifizierungskonzept geschaffen werden müssen (Sayem et al. 2022). Zudem führt die Digitalisierung dazu, dass durch die veränderten Kompetenzanforderungen Angst vor dem Verlust von Arbeitsplätzen entsteht (Goundar et al. 2021). Dies ist für ein Unternehmen nicht hinnehmbar, da darunter sowohl die Denkweise gegenüber der Digitalisierung leidet (siehe Abschnitt 4.5), als auch weitere Nachteile durch bspw. Wissensverlust entstehen können. Abdallah et al. (2021) zeigen auf, dass eine Studie der TU München zu dem Ergebnis kommt, dass 64 % der hierfür befragten Unternehmen mangelnde Kompetenzen bei ihren Mitarbeiter:innen für die digitale Transformation angeben. Adel (2022) hebt hervor, dass diese Herausforderung gerade in Bezug auf die Industrie 5.0 (menschzentrierte Digitalisierung) zentral ist. Es liegt an den Personalabteilungen von Unternehmen hier geeignete Konzepte zu entwickeln, da Tätigkeiten mit standardisierten und wiederholenden Aufgaben besonders stark durch die Digitalisierung und Automatisierung gefährdet sind, was mit einem großen Stellenabbau und sozialer Ungerechtigkeit einhergehen kann (Reis et al. 2021) sowie die digitale Transformation verlangsamt wird (Abdallah et al. 2021). Zusammenfassend wurden folgende Herausforderungen in Bezug auf die Kompetenz von Mitarbeiter:innen ermittelt:

- C5: Gewinnen von Mitarbeiter:innen mit passenden Kompetenzen für die digitale Transformation
- C6: Umqualifizierung und kontinuierliches Lernen

4.3 Herausforderungen hinsichtlich der Sicherheit

Im Zuge der digitalen Transformation werden Daten für Unternehmen immer wertvoller. Die Erhöhung des Automatisierungsgrads sowie der Wunsch nach Optimierung mit Hilfe von KI führt dazu, dass immer mehr Daten erhoben und gespeichert werden. Durch den Trend zum Cloud Computing ist es mittlerweile nicht unüblich, dass Unternehmensdaten teilweise in anderen Ländern gespeichert werden und nicht mehr einzig von einem Unternehmen selbst verwaltet werden (Reis et al. 2021). Hinzu kommt, dass durch das IoT internetfähige Sensoren oder Aktoren verwendet werden, die anfälliger für Cyberattacken sind (Gupta et al. 2022). Diese Entwicklung führt dazu, dass das Thema Cybersicherheit / Cybersecurity zunehmend an Relevanz gewinnt. Das zeigt eine Vielzahl an Studien, wie z. B. (Alabadi et al. 2022; Goundar et al. 2021; Kumar et al. 2020; Malhotra et al. 2022; Michael et al. 2022; Nimawat et al. 2022; Ok et al. 2021; Vishal et al. 2021), die gezielt Herausforderungen der digitalen Transformation untersucht haben. Durch zu geringe Sicherheitsstandards besteht bei

missbräuchlicher Verwendung die Gefahr, dass in einer vernetzten menschenzentrierten Produktion (Industrie 5.0) Gefahren für Menschen (bis hin zum Tod) am Arbeitsplatz entstehen können (Nair et al. 2021; Reis et al. 2021) oder wirtschaftliche Risiken für Unternehmen durch Spionage darstellen können (Adel 2022). Eine Herausforderung für Systeme in einer digitalen Produktion ist die hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (Cellary et al. 2019) bei gleichzeitiger Einhaltung von hohen Sicherheitsstandards (Senna et al. 2022). Hinzu kommt, dass neben Produkt- und Produktionsdaten auch Kundendaten erfasst, analysiert und gespeichert werden, welche einen pflichtbewussten Umgang erfordern. Aus unternehmerischer Sicht ist hier zudem hervorzuheben, dass die Investitionen in Sicherheit nicht nur einmalig auftreten können. Die Methoden von Angreifern entwickeln sich ständig weiter und die Anzahl der Angriffe nimmt zu (Abdallah et al. 2021; Senna et al. 2022) und so gelingt es Angreifern immer wieder an sensible Daten zu kommen (Tyborski et al. 2021). Diese Vorfälle sind besonders in der Politik seit einigen Jahren vermehrt zu beobachten. Ein bekanntes Beispiel hierfür sind die Angriffe durch Hacker auf den deutschen Bundestag (Beuth et al. 2017). Die Bewältigung der Herausforderungen im Bereich der Sicherheit ist von entscheidender Bedeutung, da ein Unternehmen ohne ausreichendes Sicherheitskonzept keine digitalisierte Produktion betreiben wird (Wang et al. 2016). Zusammenfassend wurden folgende Herausforderungen in Bezug auf die Sicherheit ermittelt:

- C7: Sicherheit im Umgang mit Technologie für Mitarbeiter:innen
- C8: Schutz der Daten vor unbefugtem Zugriff
- C9: Umfassendes und wandlungsfähiges Sicherheitskonzept

4.4 Herausforderungen hinsichtlich Investitionen

Die digitale Transformation führt zu Veränderungen in den Unternehmen. Hierzu zählt auch, dass Investitionen in die Digitalisierung notwendig sind (Kumar et al. 2020). Die hohen initialen Kosten machen den Einstieg in die Industrie 4.0 unattraktiv (insbesondere für kleinere Unternehmen) (Alekseev et al. 2020; Alqoud et al. 2022; Chehri et al. 2021; Goundar et al. 2021; Rank et al. 2022; Reis et al. 2021; Sayem et al. 2022). Diese Kosten können dazu führen, dass die Projekte nicht begonnen oder frühzeitig abgebrochen werden (Malhotra et al. 2022; Mumtaz et al. 2018). Erschwerend kommt hinzu, dass die Amortisation (engl.: Return of Invest, ROI) bei Digitalisierungsprojekten zu Beginn nicht korrekt berechnet werden kann oder nicht mit den teils kurzfristigen Investitionszielen eines Unternehmens vereinbar ist (Kagermann et al. 2013). Es muss daher eine gewisse Risikobereitschaft in einem Unternehmen vorhanden sein, um die hohen initialen Investments durchzuführen (Abdallah et al. 2021). Zusammenfassend wurden folgende Herausforderungen in Bezug auf Investitionen ermittelt:

- C10: Aufbringen und Einplanen von hohen initialen Ausgaben
- C11: Unsicherheiten bei der Berechnung der Amortisation

4.5 Herausforderungen hinsichtlich der Denkweise

Die Umsetzung der digitalen Transformation hängt insbesondere von Mitarbeiter:innen (Kane 2019) ab. Die Einstellung von Mitarbeiter:innen in Unternehmen kann die digitale Transformation positiv wie negativ beeinflussen. Dies bezieht sich sowohl auf die Technologie, die Kompetenzen und die Strategie in Bezug zur Digitalisierung (Jones et al. 2021). Die Herausforderungen hinsichtlich der grundsätzlichen Offenheit gegenüber neuen Technologien erstrecken sich über alle Hierarchiestufen (Dalmarco et al. 2018; Kumar et al. 2020; Senna et al. 2022). Nach Defty et al. (2022) folgt hieraus einerseits, dass die Technologien, welche eine Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine oder System herstellen, so gestaltet sein sollen, dass bei gleichzeitig hohem Vertrauen eine Akzeptanz durch die Mitarbeiter:innen erreicht wird (Defty et al. 2022; Malhotra et al. 2022). Andererseits ist es außerordentlich wichtig, dass das Management eines Unternehmens eindeutig auf die digitale Transformation zuarbeitet und diese aktiv unterstützt (Malhotra et al. 2022; Rank et al. 2022; Sheffield et al. 2012; Sony et al. 2020). Die Unterstützung äußert sich in der Gestaltung einer Strategie (siehe Abschnitt 4.6) und der Bereitschaft zu den initial hohen Investments (siehe Abschnitt 4.4). Eine Voraussetzung hierfür ist ausreichendes Verständnis des Management für die Digitalisierung (Alqoud

et al. 2022; Mourtzis et al. 2022; Nair et al. 2021) und die damit einhergehenden Vorteile. Die Herausforderungen aus diesem Abschnitt sind besonders bei der Gestaltung der Gesellschaft in der Industrie 5.0 relevant (Mourtzis et al. 2022). Zusammenfassend wurden folgende Herausforderungen in Bezug auf die Denkweise hinsichtlich der digitalen Transformation ermittelt:

- C12: Offene Grundeinstellung und Akzeptanz der Mitarbeiter:innen gegenüber neuen Technologien
- C13: Unterstützung des Managements

4.6 Herausforderungen hinsichtlich der Organisation

Die zuvor beschriebenen Herausforderungen führen dazu, dass sich die Organisation eines Unternehmens für die digitale Transformation deutlich verändern muss (Alekseev et al. 2020). Hierzu zählt, dass sich die Geschäftsprozesse entsprechend anpassen müssen (Szalavetz et al. 2022). In der Vergangenheit haben sich Untersuchungen teilweise stark auf die technologischen Herausforderungen fokussiert (Malhotra et al. 2022). Weitere Untersuchungen kommen zum Schluss, dass die Digitalisierung ebenfalls durch die Bewältigung der organisatorischen Herausforderungen geprägt ist (Alekseev et al. 2020). Gerade das Erarbeiten einer Digitalisierungsstrategie leistet hierzu einen großen Beitrag (Senna et al. 2022), da bei der digitalen Transformation viele disruptive Technologien gleichzeitig eingeführt werden (Abdallah et al. 2021). Zudem ist hier anzumerken, dass die Veränderung nicht nur einmalig mit hohem Aufwand verbunden ist. Die Transformation geschieht inkrementell und muss kontinuierlich gesteuert und angepasst werden. Leider fehlt Unternehmen bisher eine richtige Strategie (Abdallah et al. 2021). Daraus folgt, dass, gemäß Abdallah et al. (2021) in einem KPMG CIO Report aus dem Jahre 2017 und aus Kübler et al. (2022), eine Vielzahl der Projekte im Kontext der Digitalisierung fehlschlagen. Zusammenfassend wurden folgende Herausforderungen in Bezug auf die Veränderung der Organisation ermittelt:

- C14: Anpassung der Geschäftsprozesse
- C15: Erarbeiten einer Digitalisierungsstrategie mit fortlaufender Anpassung und Erweiterung

4.7 Herausforderungen hinsichtlich der Architektur

In der Architektur manifestiert sich die Umsetzung der digitalen Transformation. Hierdurch werden die Lösungsräume der Herausforderungen aus den vorherigen Abschnitten festgelegt. Eine korrekte Definition der Architektur ist nur schwer möglich, da der Begriff in verschiedenen Bereichen genutzt wird. In diesem Beitrag stellt die Architektur ein Modell dar, welches Strukturen oder Zusammenhänge von Elementen beschreibt (Cañas et al. 2022). Eine Architektur ist wichtig für das Gelingen der digitalen Transformation, da mehrere disruptive Technologien gleichzeitig (siehe Abschnitt 4.6) eingeführt werden müssen und nur dann einen Mehrwert für das Unternehmen generieren, wenn diese im Zusammenspiel interagieren (Cellary et al. 2019). Hierfür ist bei der Kooperation mit anderen Unternehmen oder Lieferanten der Austausch von Daten notwendig (horizontale Integration). Heute fehlt hierfür ein gemeinsamer Standard, der zwischen unterschiedlichen Firmen genutzt werden kann. Gerade im Bereich der Datenkommunikation gibt es bereits einige weit verbreitete Protokolle, wie z. B. MQTT, OPC UA und CoaP (Sapel et al. 2022). Diese sind bisher noch nicht ausreichend in Referenzmodelle und Gesamtarchitekturen überführt, um herstellerunabhängig einen Standard durch staatliche Leitlinien vorzugeben (Sayem et al. 2022). Die Standardisierung ist jedoch nicht auf die Datenkommunikation beschränkt, sondern erstreckt sich über fast alle Ebenen der digitalen Transformation (Sapel et al. 2022; Senna et al. 2022). Das Erheben von Daten selbst reicht nicht aus, um Mehrwerte zu generieren. Daten müssen aus heterogenen Datenquellen in Beziehung gesetzt werden, um Wissen zu generieren, welches einen relevanten Mehrwert für das Unternehmen bietet. Hierfür ist eine einheitliche Semantik erforderlich (Kübler et al. 2022). Vorhandene Produktionssysteme weisen häufig 1:1-Schnittstellen auf, welche unzureichend dokumentiert und nur schwer anpassbar sind. Dies geht zu Lasten der Transparenz und bremst die Integration neuer Technologien. Hierfür sind sogenannte Middlewares erforderlich, welche als Integrator von Daten aus

unterschiedlichen Quellsystemen agieren können (vertikale Integration). Eine derartig gestaltete Architektur ermöglicht weiterhin eine „nachhaltige“ Digitalisierung, welche die Wiederverwendung von einzelnen Bausteinen erlaubt (Kübler et al. 2022). Zur Adressierung der zuvor beschriebenen Herausforderungen existieren bereits zahlreiche Frameworks und Referenzarchitekturen, welche einen beispielhaften Charakter besitzen sollen, der von vielen Unternehmen in der eigenen Architekturgestaltung als Referenz genutzt werden kann. Zu den bekanntesten Referenzarchitekturen zählen 5C, 8C, IBM I4.0, IIRA und RAMI4.0 (Cañas et al. 2022). Alle Architekturen haben gemeinsam, dass Sie im Kern auf die klassische Automatisierungspyramide zurückgehen, welche im Zuge der digitalen Transformation erweitert werden muss. Das europäische RAMI4.0-Modell schneidet im direkten Vergleich gut gegenüber den anderen Modellen ab (Cañas et al. 2022) und weist durch das Prinzip der Verwaltungsschale eine Übereinstimmung mit dem Konzept des Digital Twin auf (Wagner et al. 2017). Obwohl alle zuvor genannten Modelle eine Orientierung für die digitale Transformation bieten, sind die Transformationspfade, insbesondere aus dem Brownfield, bisher nur unzureichend adressiert (Cimini et al. 2017). Zusammenfassend wurden folgende Herausforderungen in Bezug auf die Architektur ermittelt:

- C16: Etablierung von Standards in weiten Bereichen der digitalen Transformation
- C17: Einführen eines verbreiteten und zukunftssicheren Referenzarchitekturmodells

5 Herausforderungen aus den Experteninterviews

Dieser Abschnitt vergleicht die Herausforderungen, welche in der Literatur ermittelt wurden (Abschnitt 4) mit den Herausforderungen, die aus den Expert:inneninterviews hervorgegangen sind. Die Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt und enthält die Herausforderungen sowie die Anzahl der Experten, die diese Herausforderung genannt haben (Spalte „Interview“). Herausforderungen ohne Nummer wurden lediglich in den Interviews genannt und sind kein Ergebnis der systematischen Literaturrecherche.

Tabelle 1: Übersicht der Herausforderungen in der Umsetzung der digitalen Transformation

Nr.	Beschreibung	Interview
C12	Offene Grundeinstellung und Akzeptanz der Mitarbeiter:innen gegenüber neuen Technologien	10/11
C16	Etablierung von Standards in weiten Bereichen der digitalen Transformation	9/11
C5	Gewinnen von Mitarbeiter:innen mit passenden Kompetenzen für die digitale Transformation	9/11
C13	Unterstützung des Managements	9/11
C15	Erarbeiten einer Digitalisierungsstrategie mit fortlaufender Anpassung und Erweiterung	9/11
C17	Einführen eines verbreiteten und zukunftssicheren Referenzarchitekturmodells	8/11
C2	Netzwerktechnologie, um die Daten stabil und zuverlässig zu übertragen	7/11
C11	Unsicherheiten bei der Berechnung der Amortisation	6/11
-	Abstimmung zwischen Abteilungen	5/11
C6	Umqualifizierung und kontinuierliches Lernen	5/11
C10	Aufbringen und Einplanen von hohen initialen Ausgaben	5/11
C1	Verbindung heterogener Systeme mit geeigneten Schnittstellen	3/11
-	Gewährleistung eines fortlaufenden Betriebs (Betriebskosten, Betreibermodell)	3/11
C3	Geringe Latenz bei Echtzeitanwendungen	0/11
C4	Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine bei gesteigertem Informationsfluss	0/11
C7	Sicherheit im Umgang mit Technologie für Mitarbeiter:innen	0/11
C8	Schutz der Daten vor unbefugtem Zugriff	0/11

C9	Umfassendes und wandlungsfähiges Sicherheitskonzept	0/11
C14	Anpassung der Geschäftsprozesse	0/11

Aus den Interviews geht hervor, dass technische Anforderungen in der Praxis nicht alleine ausschlaggebend sind. Die Expert:innen führen aus, dass mehr Initiativen aus dem Management heraus erwartet werden und sich die Unternehmenskultur insbesondere in eine offene Richtung für neue digitale Technologien entwickeln muss. Zudem heben die Expert:innen hervor, dass eine bereichsübergreifende Strategie sowie eine zugehörige Gesamtarchitektur auf Basis von Standards entscheidend sind. Darüber hinaus ist der Aufbau von passenden Kompetenzen für die digitale Transformation im Unternehmen ein wichtiges Handlungsfeld. Die Strategie umfasst hierbei nicht nur die Priorisierung von Themen, sondern auch die Aufstellung der Organisation hinsichtlich der Verfügbarkeit von Mitarbeiter:innen, die losgelöst von der alltäglichen Arbeit an der digitalen Transformation arbeiten können. Die Expert:innen geben zudem übereinstimmend an, dass sie in der täglichen Arbeit nicht durch ein Zielbild zur Digitalisierung des Brownfields unterstützt werden. Gleichzeitig ist hervorzuheben, dass 9 der 11 Expert:innen Referenzarchitekturen der Industrie 4.0 kennen, aber diese im Unternehmen nicht aktiv eingesetzt werden, da laut den Expert:innen die Anwendung dieser Architekturen zu theoretisch ist.

6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurden die Herausforderungen der digitalen Transformation in der Produktion erarbeitet. Mithilfe einer systematischen Literaturrecherche konnten hierfür zunächst Herausforderungen aus vorausgehenden Arbeiten in unterschiedlichen Kategorien ermittelt werden. Hierfür wurden bei der Suche auch Synonyme und eng verwandte Begriffe der digitalen Transformation verwendet. In einem zweiten Schritt wurden Experteninterviews durchgeführt, um die ermittelten Herausforderungen aus der Literatur mit der Praxis abzugleichen. Hierbei hat sich eine hohe Übereinstimmung hinsichtlich der Themen „Strategie“, „Architektur“ und „Standards“ ergeben. Ferner zeigt sich, dass das Finden von Mitarbeiter:innen mit den richtigen Kompetenzen sowie die Unterstützung des Managements sowohl in der Literatur als auch in den Interviews von großer Bedeutung ist. Während die Literatur das Thema der Cybersecurity sowie die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine hervorhebt, wird die grundsätzlich offene Einstellung gegenüber neuen digitalen Technologien in den Interviews am stärksten hervorgehoben. Der aktuelle Stand der digitalen Transformation in einem Unternehmen beeinflusst die Sichtweise auf die Herausforderungen. Daraus geht in den vorliegenden Interviews hervor, dass vermehrt Schwerpunkte auf die Rahmenbedingungen der digitalen Transformation im betrachteten Unternehmen gesetzt werden müssen. Aus dem Beitrag wird deutlich, dass die technologischen Probleme der digitalen Transformation lösbar sind. Fundamental für das Gelingen ist das Ableiten einer Strategie, welche durch eine Architektur und darin enthaltene Standards ergänzt wird. So kann die Digitalisierung zielgerichtet und realistisch erfolgen. Eine Unterstützung in der Planungs-, Umsetzungs- und Betriebsphase ist notwendig und wird durch heutige Referenzarchitekturen nicht ausreichend abgedeckt. Eine mögliche Erweiterung dieser Architekturen erscheint sinnvoll für zukünftige Arbeiten zu diesem Thema, um Unternehmen einen schnellen Fortschritt der digitalen Transformation zu ermöglichen und eine Orientierung bei der organisatorischen Durchführung zu geben.

Literatur

- Abdallah et al. 2021 ABDALLAH, O.; SHEHAB, E.; AL-ASHAAB, A.; SHAFIK M., CASE K.: *Digital transformation challenges in the manufacturing industry*. In: *Advances in Transdisciplinary Engineering* 15 (2021), S. 9-14.
- Adel 2022 ADEL, A.: *Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas*. In: *Journal of Cloud Computing* 11 (2022)

- Alabadi et al. 2022 ALABADI, M.; HABBAL, A.; WEI, X.: *Industrial Internet of Things: Requirements, Architecture, Challenges, and Future Research Directions*. In: *IEEE Access* 10 (2022), S. 66374–66400.
- Alekseev et al. 2020 ALEKSEEV, A.; BORISOV, A.; KOVALEV V., TESTOYEDOV A., VOROSHILOVA A.: *Industry 4.0 - New challenges for production*. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 919 (2020), Nr. 2.
- Alqoud et al. 2022 ALQOUD, A.; SCHAEFER, D.; MILISAVLJEVIC-SYED, J.; SHAFIK M., Case K.: *Industry 4.0: Challenges and Opportunities of Digitalisation Manufacturing Systems*. In: *Advances in Transdisciplinary Engineering* 25 (2022).
- Beuth et al. 2017 BEUTH, P.; BIERMANN, K.; KLINGST, M.; STARK, H.: *Merkel und der schicke Bär : Bundestags-Hack*. URL: <https://www.zeit.de/2017/20/cyberangriff-bundestag-fancy-bear-angela-merkel-hacker-russland> – Überprüfungsdatum 09.01.2023
- Canas et al. 2022 CAÑAS, H.; MULA, J.; CAMPUZANO-BOLARÍN, F.; POLER, R.: *A conceptual framework for smart production planning and control in Industry 4.0*. In: *Computers & Industrial Engineering* 173 (2022), S. 108659.
- Castelo et al. 2022 CASTELO-BRANCO, I.; OLIVEIRA, T.; SIMÕES-COELHO, P.; PORTUGAL, J.; FILIPE, I.: *Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain*. In: *Computers in Industry* 138 (2022).
- Cellary et al. 2019 CELLARY, W.; CAMARINHA-MATOS L.M., AFSARMANESH H., ANTONELLI D.: *Non-technical Challenges of Industry 4.0*. In: *IFIP Advances in Information and Communication Technology* 568 (2019), S. 3–10.
- Chehri et al. 2021 CHEHRI, A.; ZIMMERMANN, A.; SCHMIDT, R.; MASUDA, Y.; WATROBSKI J.; SALABUN W.; TORO C.; ZANNI-MERK C.; HOWLETT R.J.; JAIN L.C.: *Theory and practice of implementing a successful enterprise IoT strategy in the industry 4.0 era*. In: *Procedia Computer Science* 192 (2021).
- Cimini et al. 2017 CIMINI, C.; PINTO, R.; CAVALIERI, S.: *The business transformation towards smart manufacturing: a literature overview about reference models and research agenda*. In: *IFAC-PapersOnLine* 50 (2017), Nr. 1, S. 14952–14957.
- Coelho et al. 2023 COELHO, P.; BESSA, C.; LANDECK, J.; SILVA, C.: *Industry 5.0: The Arising of a Concept*. In: *Procedia Computer Science* 217 (2023), S. 1137–1144.
- Dalmarco et al. 2018 DALMARCO, G.; BARROS, A.: *Innovation and Supply Chain Management: Relationship, Collaboration and Strategies*. Cham : Springer International Publishing (2018), S. 303–319
- Defty et al. 2022 DEFTY, T.; KRUGER, K.; BASSON, A.; BORANGIU T., TRENTESAUX D., LEITAO P., CARDIN O., JOBLOT L.: *Classification of Technical Challenges to Human-System Integration in Cyber-Physical Systems*. In: *Studies in Computational Intelligence* 1034 (2022), S. 175–186.
- Dogea et al. 2021 DOGEA, R.; STOLT, R.: *Identifying challenges related to industry 4.0 in five manufacturing companies*. In: *Procedia Manufacturing* 55 (2021)
- European et al. 2021 EUROPEAN COMMISSION; DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH; INNOVATION: *Industry 5.0 : human-centric, sustainable and resilient* : Publications Office, (2021).
- Facchini et al. 2022 FACCHINI, F.; DIGIESI, S.; RODRIGUES PINTO, L.; LONGO F.; AFFENZELLER M.; PADOVANO A.: *Implementation of I4.0 technologies in production systems: Opportunities and limits in the digital transformation*. In: *Procedia Computer Science* 200 (2022).
- Goundar et al. 2021 GOUNDAR, S.; BHARDWAJ, A.; NUR, S. S.; KUMAR, S. S.; HARISH, R.: *Industrial internet of things: Benefit, applications, and challenges*. In: *Innovations in the Industrial Internet of Things (IIoT) and Smart Factory* (2021).
- Gupta et al. 2022 GUPTA, P.; KRISHNA, C.; RAJESH, R.; ANANTHAKRISHNAN, A.; VISHNUVARDHAN, A.; PATEL, S. S.; KAPRUAN, C.; BRAHMBHATT, S.; KATARAY, T.; NARAYANAN, D.; CHADHA, U.; ALAM, A.; SELVARAJ, S. K.; KARTHIKEYAN, B.; NAGALAKSHMI, R.; CHANDRAMOHAN, V.: *Industrial internet of things in intelligent manufacturing: a review, approaches, opportunities, open challenges, and future directions*. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* (2022).

- Hernandez et al. 2020 HERNANDEZ, E.; SENNA, P.; SILVA, D.; REBELO, R.; BARROS, A.; TOSCANO, C.: Implementing RAMI4.0 in Production - A Multi-case Study. In: Progress in Digital and Physical Manufacturing , (2020), S. 49–56.
- Hopkins et al. 2008 HOPKINS, R.; JENKINS, K.: Eating the IT Elephant: Moving from Greenfield Development to Brownfield, IBM Press, 2008.
- Jones et al. 2021 JONES, M. D.; HUTCHESON, S.; CAMBA, J. D.: *Past, present, and future barriers to digital transformation in manufacturing: A review*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 60 (2021), S. 936–948.
- Jung 2019 JUNG, E.: *4th Industrial Revolution and Foundry: Challenges and Opportunities*. In: *Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM 2018-December* (2019).
- Kagermann et al. 2013 KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W.: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0* : Forschungsunion, (2013).
- Kagermann et al. 2011 KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W.: *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. In: *VDI nachrichten* 13 (2011), Nr. 1, S. 2–3 .
- Kane et al. 2019 KANE, G.: *The technology fallacy: people are the real key to digital transformation*. In: *Research-Technology Management* 62 (2019), Nr. 6, S. 44–49.
- Kang et al. 2021 KANG, S. K.; JIN, R.; DENG, X.; KENETT, R. S.: *Challenges of modeling and analysis in cybermanufacturing: a review from a machine learning and computation perspective*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 34 (2021), Nr. 2, S. 415–428.
- Kübler et al. 2022 KÜBLER, P.; SCHNEIDER, M.; JELSCHOW, V.; PETERS, M.; GROß, E.; SCHÖLLHAMMER, O.; BAUERNHANSL, T.; Fraunhofer-Gesellschaft (Mitarb.): *IIoT-Plattformen als zentrale Datenbasis für die digitale Produktion* (2022).
- Kumar et al. (2020) KUMAR, A.; KUMAR, S.: *Industry 4.0: Evolution, Opportunities and Challenges* (2020), S. 2455–2992 .
- Li et al. (2018) LI DA XU; E. L.; LI L.: *Industry 4.0: state of the art and future trends*. In: *International Journal of Production Research* 56 (2018), Nr. 8, S. 2941–2962.
- Malhotra et al. 2022 MALHOTRA, S.; AGARWAL, V.; KAPUR, P. K.: *Hierarchical framework for analysing the challenges of implementing industrial Internet of Things in manufacturing industries using ISM approach*. In: *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 13 (2022), Nr. 5, S. 2356–2370.
- Michael et al. 2022 MICHAEL, J.; PFEIFFER, J.; RUMPE, B.; WORTMANN, A.: *Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems*. In: *Proceedings - 10th IEEE/ACM International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems, SESoS 2022* (2022).
- Möller 2016 MÖLLER, D.: *Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems*. Springer International Publishing, 2016.
- Mourtzis et al. 2022 MOURTZIS, D.; ANGELOPOULOS, J.; PANOPOULOS, N.: *A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0*. In: *Energies* 15 (2022), Nr. 17.
- Mumtaz et al. 2018 MUMTAZ, S.; BO, A.; AL-DULAIMI, A.; TSANG, K.: *Guest Editorial 5G and Beyond Mobile Technologies and Applications for Industrial IoT (IIoT)*. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (2018), Nr. 6, S. 2588–2591 .
- Nair et al. 2021 NAIR, M.; TYAGI, A.; SREENATH, N.: *The Future with Industry 4.0 at the Core of Society 5.0: Open Issues, Future Opportunities and Challenges*. In: *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2021* (2021).
- Nimawat et al. 2022 NIMAWAT, D.; DAS GIDWANI, B.: *Challenges facing by manufacturing industries towards implementation of industry 4.0: an empirical research*. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 16 (2022), Nr. 4, S. 1371–1383.

- Ok et al. 2021 OK, J.; KWON, S.; HEO, C.; SUH, Y.: *A Survey of Industrial Internet of Things Platforms for Establishing Centralized Data-Acquisition Middleware: Categorization, Experiment, and Challenges*. In: *Scientific Programming 2021* (2021).
- Rank et al. 2022 RANKA, D.; VASUDEVAN, H.; SINGARI R.M., KANKAR P.K.: *A Model for Challenges and Opportunities in the Implementation of Digitized Transforming Enablers in Manufacturing Industries*. In: *Advances in Transdisciplinary Engineering 27* (2022).
- Reis et al. 2021 REIS, F.; CAMARGO, A.: *Industry 4.0 in Manufacturing: Benefits, Barriers and Organizational Factors that Influence its Adoption*. In: *International Journal of Innovation and Technology Management 18* (2021), Nr. 8.
- Sapel et al. 2022 SAPEL, P.; HOPMANN, C.: *Challenges and research agenda for realizing a seamless integration of Digital Shadows into the production domain*. In: *Engineering Reports* (2022).
- Sayem et al. 2022 SAYEM, A.; BISWAS, P. K.; KHAN, M.M.A.; ROMOLI, L.; DALLE MURA, M.: *Critical Barriers to Industry 4.0 Adoption in Manufacturing Organizations and Their Mitigation Strategies*. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing 6* (2022), Nr. 6.
- Senna et al. 2022 SENNA, P.; FERREIRA, L.; BARROS, A.; BONNÍN ROCA, J.; MAGALHÃES, V.: *Prioritizing barriers for the adoption of Industry 4.0 technologies*. In: *Computers & Industrial Engineering 171* (2022).
- Shariatzadeh et al. 2016 SHARIATZADEH, N.; LUNDHOLM, T.; LINDBERG, L.; SIVARD, G.: *Integration of Digital Factory with Smart Factory Based on Internet of Things*. In: *Procedia CIRP 50* (2016), S. 512–517.
- Sheffield et al. 2012 SHEFFIELD, J.; SANKARAN, S.; HASLETT, T.: *Systems thinking: taming complexity in project management*. In: *On the Horizon 20* (2012), Nr. 2, S. 126–136.
- Sony et al. 2020 SONY, M.; NAIK, S.: *Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review*. In: *Benchmarking: An International Journal 27* (2020), Nr. 7, S. 2213–2232 .
- Szajna et al. 2020 SZAJNA, A.; STRYJSKI, R.; WOŹNIAK, W.; CHAMIER-GLISZCZYŃSKI, N.; KOSTRZEWSKI, M.: *Assessment of Augmented Reality in Manual Wiring Production Process with Use of Mobile AR Glasses*. In: *Sensors (Basel, Switzerland) 20* (2020), Nr. 17.
- Szalavetz 2022 SZALAVETZ, A.: *The digitalisation of manufacturing and blurring industry boundaries*. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 37* (2022), S. 332–343.
- Tchana et al. 2019 TCHANA, Y.; DUCELLIER, G.; REMY, S.: *Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management*. In: *Procedia CIRP 84* (2019), S. 545–549
- Tyborski et al. 2021 TYBORSKI, R.; BUCHENAU, M.: *Hacker legen IT-Systeme des Autozulieferers Eberspächer lahm*. URL:<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/cyberangriff-hacker-legen-it-systeme-des-autozulieferers-eberspaecher-lahm/27739494.html> – Überprüfungsdatum 09.01.2023
- Vishal et al. 2021 VISHAL A.; VINODH S.: *Analysis of Industry 4.0 challenges using best worst method: A case study*. In: *Computers & Industrial Engineering 159* (2021), S. 107487.
- Wagner et al. 2017 WAGNER, C., GROTHOFF, J., EPPLE, U., DRATH, R., MALAKUTI, S., GRUNER, S.: *The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant*. In: *International Conf. on Emerging Tech. and Factory Automation (2017)*, S. 1-8
- Wang et al. 2016 WANG, S.; WAN, J.; DI LI; ZHANG, C.: *Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook*. In: *International Journal of Distributed Sensor Networks 2016* (2016), S. 1–10 .
- Yang et al. 2019 YANG, Y.; WEI, L.; PEI, J.: *Application of meta-analysis technique to assess effectiveness of HACCP-based FSM systems in Chinese SLDBs*. In: *Food Control* (2019)
- Zeiler 2022 ZEILER, J.: *Architektur für ein unternehmensübergreifendes Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Dissertation, 2022.

Modellierung von abschnittswisen Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mithilfe des C&C²-Ansatzes

Modeling of Embodiment Function Relations using the C&C²-Approach

Peter M. Tröster¹, Felix Prager¹, David Schmidt¹, Albert Albers¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, 76131 Karlsruhe
peter.troester@kit.edu

Abstract (deutsch): Durch das Ausscheiden vieler Entwickler der geburtenstarken Jahrgänge riskieren Unternehmen ein zunehmendes Schwinden ihres Wissens zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ). Um das zumeist an Mitarbeiter gebundene Wissen zu erhalten, muss dieses rechtzeitig und in geeigneter Form vermittelbar dokumentiert werden. Eine Möglichkeit zur Dokumentation von GFZ bietet der Contact&Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz). Dieser beinhaltet die drei Kernelemente Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) sowie Connector (C). Mittels dieser lassen sich Funktionen und die dafür notwendige Produktgestalt darlegen. Für die Modellierung von GFZ, die sich innerhalb eines Bauteils ändern, gibt es aktuell kein definiertes Vorgehen. Am Fallbeispiel eines Körpergelenks, bei dem diese Problematik besonders stark zum Vorschein kommt, wird in diesem Beitrag eine Möglichkeit zur übersichtlichen Modellierung von abschnittswisen GFZ aufgezeigt. Möglich wird dies durch die Einführung eines neuen Modellelements, der Funktionsabgrenzung (FA). Dieses Modellelement integriert sich in den Ansatz, ohne dabei die Grundannahmen der Methode zu verletzen. Darüber hinaus werden Vorschläge für eine verbesserte Darstellung von C&C²-Modellen erläutert. Demzufolge liefert diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Steigerung des Informationsgehalts von C&C²-Modellen bei gleichzeitiger Verbesserung der Übersichtlichkeit.

Keywords (deutsch):

Gestalt-Funktion-Zusammenhang, Produktentwicklung, Wissensmanagement, Funktionsabgrenzung, Festkörpergelenk

Abstract (english): With the retirement of many employees of the baby boomer generation, companies risk an increasing loss of knowledge regarding the embodiment function relations (EFR). In order to retain the knowledge that is mostly tied to employees, it has to be documented in good time and in a form that can be communicated easily. The Contact&Channel-Approach (C&C²-Approach) offers a possibility for the documentation of EFR. This includes the three key elements of Working Surface Pair (WSP), Channel and Support Structure (CSS) and Connector (C). The approach can be used to present functions and the product design required for them. There is currently no defined procedure for modeling EFR that change within a component. Using the example of a body joint, in which this problem is particularly evident, this article shows a possibility for clear modeling of sectional EFR. This is made possible by the introduction of a new model element, the Functional Delimitation (FD). This model element is integrated into the approach without violating the basic assumptions of the method. In addition, suggestions for an improved representation of C&C²-Models are explained. Consequently, this work makes an important contribution to increasing the information content of C&C²-Models while improving comprehensibility at the same time.

Keywords (english):

Embodiment-Function-Relation, Product Development, Knowledge Management, Functional Delimitation, Solid-State Hinge

1 Herausforderungen und Motivation

In den kommenden Jahren werden aufgrund des demographischen Wandels viele Mitarbeiter der geburtenstarken Jahrgänge in den Ruhestand treten. Dadurch wird das schon bestehende Problem von oft unzureichender Dokumentation von Wissen zu den Produkten weiter verschärft. Das Wissen, welches oft nur implizit in den Köpfen der Mitarbeitenden vorhanden ist, fließt demzufolge aus den Unternehmen ab und ist für weitere Entwicklungen nicht mehr zugänglich. Um auch in Zukunft ihre Position am Markt zu sichern, beschäftigen sich bereits viele Unternehmen mit der Dokumentation und Weitergabe von vorhandenem Wissen, um dem Wissensverlust entgegenzuwirken (Adenauer 2015; Weber et al. 2007).

Unterlagen wie technische Zeichnungen, CAD-Dateien oder Simulationen sind geeignete Medien, um die Produktgestalt zu dokumentieren, jedoch fehlt in ihnen stets der Gedanke, warum genau die vorliegende Gestalt gewählt wurde. Genau an dieser Stelle – der Dokumentation des Zielsystems – greift der C&C²-Ansatz an und hilft dabei, das produktspezifische Wissen über die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) an Kollegen weiterzugeben (Oerding 2009, S. 141–142).

In einigen Situationen, wie z.B. im nachfolgenden Fallbeispiel des Festkörpergelenks, stößt man allerdings mit dem heutigen C&C²-Ansatz an Grenzen. Bei solch einteiligen Bauteilen zweigen sich häufig Leitstützstrukturen (LSS) auf und erfüllen anschließend unterschiedliche Funktionen. Darüber hinaus kann ebenso der Fall auftreten, dass LSS entlang ihrer Wegstrecke unterschiedliche Funktionen erfüllen. Um auch diese GFZ in Zukunft mithilfe des C&C²-Ansatzes vermitteln zu können, wurde die sogenannte Funktionsabgrenzung (FA) entwickelt, welche es erlaubt, eine LSS in unterschiedliche funktionelle Abschnitte aufzuteilen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Grundlagen der Modellierung von Produktgestalt und Funktionen

Für die Entwicklung von Produkten ist es für die Produktentwickler von großer Bedeutung, den Zusammenhang zwischen den erwünschten und auch unerwünschten Funktionen des zu entwickelnden Produkts und seiner Produktgestalt zu verstehen. Diese Zusammenhänge werden auch Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) genannt (Matthiesen 2021, S. 398).

Eine Übersicht über angewandte Ansätze der Gestalt- und Funktionsentwicklung geben Matthiesen et al. (2019). In der Forschung gibt es verschiedene Modelle für die graphische Darstellung von Informationen im Bereich der Produktentwicklung. Zu diesen gehören die Produktstruktur von Langeveld, bei der das Produkt in seine Baugruppen und Komponenten anhand eines Baumdiagramms zerlegt werden (Langeveld 2011). Ein weiterer Ansatz ist das Wirkraummodell, welches auf der Verknüpfung von grafischen Elementen der Konstruktion mit funktionsrelevanten Informationen aus der Funktionsstruktur basiert (Beetz et al., 2018).

Ansätze zur Modellierung von Funktionen werden von He et al. (2013, 2016) beschrieben. Dort werden ähnlich zur Produktstruktur Baumdiagramme für die Funktionen erstellt, aus denen sich später die Produktgestalt ableiten lässt. Gero und Kannengiesser (2014) beschreiben im Function-Behavior-Structure Framework (FBS), wie sich aus Funktionen, Verhalten und der Produktstruktur Konzepte für die Produktentwicklung ableiten lassen.

2.2 Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit dem Contact&Channel-Ansatz

Eine Möglichkeit zur Modellierung solcher GFZ bietet der Contact&Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz) (Matthiesen 2021, S. 421). Dieser Ansatz dient unter anderem der Visualisierung von Funktionen, die über die Gestalt eines Produkts abgebildet sind. Um GFZ zu modellieren, werden drei Kernelemente verwendet (Bild 1).

- **Wirkflächenpaare (WFP)**
Wirkflächenpaare (WFP) bestehen aus je zwei Wirkflächen. Diese stehen in Wirkkontakt (WK) zueinander. In einem WK werden Energie, Stoff und/oder Informationen zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt übertragen. Wirkflächen können feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern sein. Sie sind dauernd oder zeitweise im Wirkkontakt zu einer weiteren Wirkfläche. (Albers et al. 2016, S. 2)
- **Leitstützstrukturen (LSS)**
Unter Leitstützstrukturen (LSS) versteht man „gestaltungsrelevante Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden“. Dadurch ermöglichen sie die „Leitung von Stoff, Energie oder Information zwischen den Wirkflächenpaaren eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes“. Leitstützstrukturen erstrecken sich je nach Detaillierungsgrad über Systeme oder Subsysteme hinweg. Dabei hängt ihre Existenz, genauso wie die der Wirkflächenpaare, vom Zeitraum der Funktionserfüllung ab. (Albers et al. 2016, S. 3)
- **Connectoren (C)**
Mit Connectoren (C) werden wirkungsrelevante Eigenschaften außerhalb des Betrachtungsbereichs in die Systembetrachtung integriert. Daher sind Connectoren eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung. Connectoren besitzen eine repräsentative Wirkfläche und verknüpfen damit die relevante Systemumgebung mit dem betrachteten System. Grund für die Zusammenfassung von wirkungsrelevanten Eigenschaften zu Connectoren ist, dass sie nicht im Gestaltungsraum liegen. (Albers et al. 2016, S. 3)

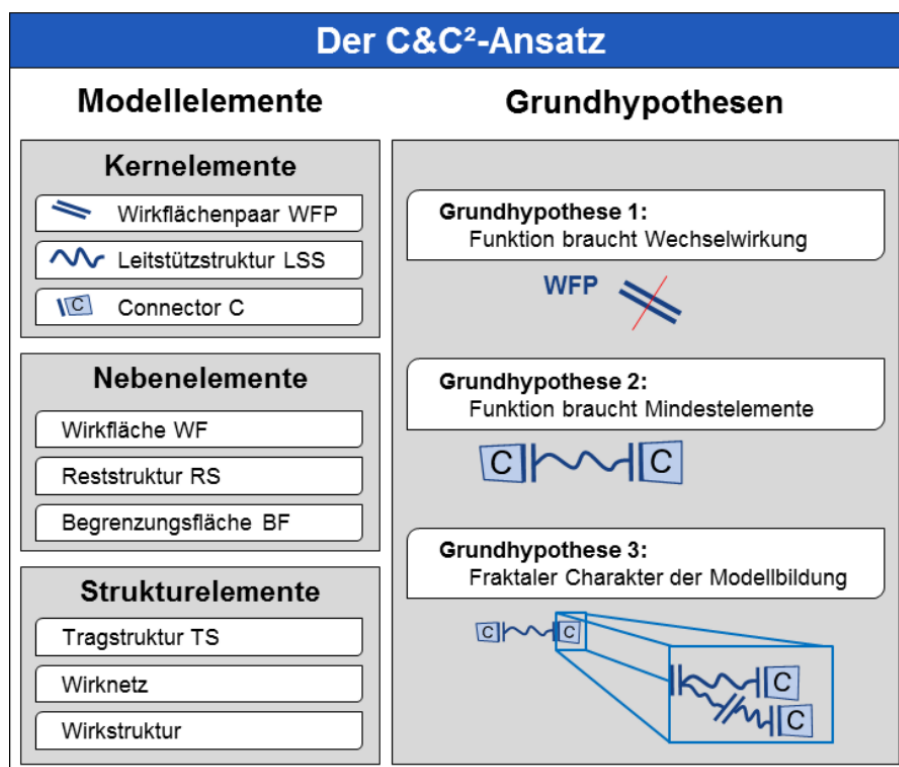


Bild 1: Modellelemente und Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes (Matthiesen et al. 2018, S. 7)

Mit dem C&C²-Ansatz lassen sich verschiedene Ziele erreichen. Zum einen kann er zur Analyse von bisher ungelösten technischen Problemstellungen angewandt werden. Zum anderen wird er auch vermehrt dazu eingesetzt, Wissen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zu vermitteln. Ein Beitrag

dazu wird unter anderem durch die Vereinheitlichung mit einem Bezeichnungsleitfaden geleistet (Tröster et al. 2023).

2.3 Anwendung eines Bezeichnungsleitfadens für die Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit dem C&C²-Ansatz

Um eine eindeutige und konsistente Bezeichnung der Modellelemente zu ermöglichen, wurde ein Bezeichnungsleitfaden entwickelt, welcher auch in diesem Beitrag angewandt wird. Für die Erstellung der jeweiligen Modellelemente werden 5 Schritte durchlaufen (Bild 2) (Tröster et al. 2023).

Im **ersten Schritt** werden die Hauptsysteme und deren Hauptfunktionen definiert. Diese Informationen stammen entweder aus einer Analyse (z.B. Reverse Engineering) oder sie stammen bestenfalls von den Entwicklern selbst. Für die Hauptsysteme werden ein oder mehrere Buchstaben verwendet. Im **zweiten Schritt** werden die Teilsysteme und ihre Teilfunktionen definiert. Für die Bezeichnung der Teilsysteme werden Nummern genutzt. Je nach Konkretisierungsgrad lassen sich beliebig viele Nummern durch einen Punkt getrennt anhängen. Im **dritten Schritt** werden die LSS in Abhängigkeit von den zuvor definierten Wirkflächen (WF) aus den Einzelbezeichnungen gebildet. Die LSS erhalten ihre Bezeichnung zusammengesetzt aus der alphabetisch ersten WF und der anderen WF. Zwischen beiden wird zur verbesserten Visualisierung eine Tilde „~“ als Symbol für die geschwungenen LSS verwendet. Im **vierten Schritt** werden die relevanten Wirksequenzen bestimmt. Diese werden im **fünften Schritt** der zuvor gebildeten Bezeichnung angehängt. Somit ergibt sich eine Bezeichnung, aus der sich direkt ablesen lässt, welche Haupt- und Teilsysteme in welchem Detaillierungsgrad zu welchen Zeitpunkten eine Funktion erfüllen (Tröster et al. 2023).

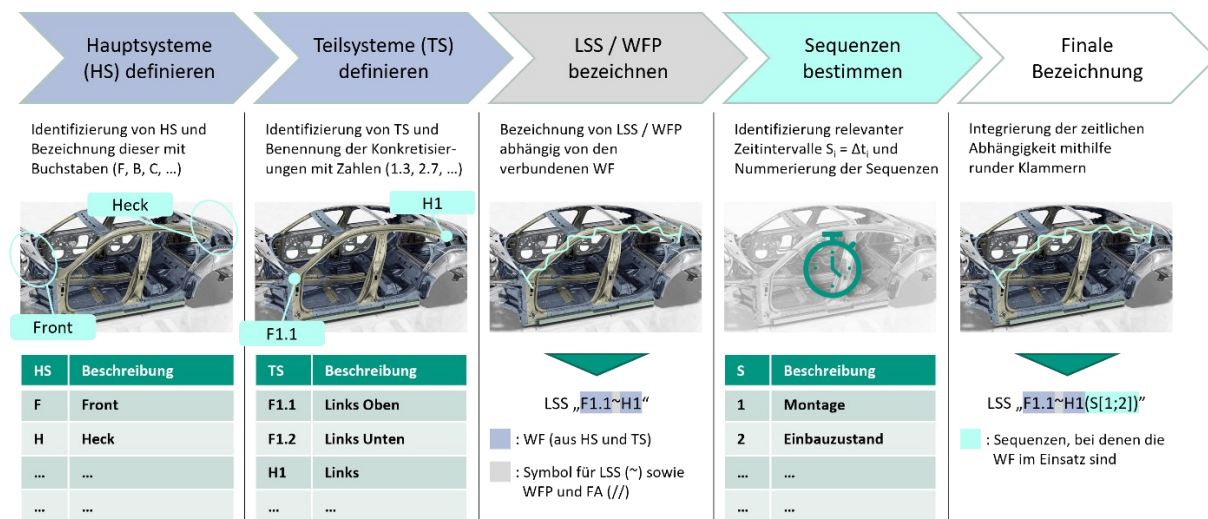


Bild 2: Bezeichnungsleitfaden in Anlehnung an Tröster et al. (2023)

Der Ansatz wird auch als „Denkzeug“ bezeichnet – ein „Werkzeug zur Unterstützung und Strukturierung des Denkens während der Gestaltung eines Produkts“ (Matthiesen 2021, S. 421). Mit dem Bezeichnungsleitfaden kann damit der Austausch bzw. das gemeinsame Denken zwischen Produktentwicklern bei der Betrachtung eines C&C²-Modells verstärkt werden.

3 Forschungsziel und -fragen

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des C&C²-Ansatzes, insbesondere bei der Dokumentation und Vermittlung von Wissen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ), geleistet werden. Ziel ist eine optimierte Anwendung des C&C²-Ansatzes sowie die Modellierung von abschnittswisen GFZ. Die Ergebnisse sollen dabei anhand eines Körpergelenks veranschaulicht werden.

Dazu werden folgende Forschungsfragen beantwortet:

- Wie lassen sich mithilfe des C&C²-Ansatzes Gestaltabschnitte modellieren?
- Welche Modifikationen sind hierfür am C&C²-Ansatz notwendig?
- Welche Vereinfachungen erhöhen die Übersichtlichkeit der Modelle?
- Welcher Nutzen ergibt sich aus der Modellierung von Gestaltabschnitten?

4 Die Funktionsabgrenzung als neues Modellelement des C&C²-Ansatzes

Insbesondere bei Körpergelenken vereinen sich unterschiedliche Funktionen in einer einzelnen Produktgestalt. Unter Zuhilfenahme des heutigen C&C²-Ansatzes werden solche Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) jeweils durch Leitstützstrukturen (LSS) zwischen Wirkflächenpaaren (WFP) modelliert. Die LSS werden dabei mitunter sehr lang und müssen zwischen allen WFP modelliert werden. Dies führt zu einer hohen Anzahl an Modellelementen. Darüber hinaus müssen die LSS auf ihrer Wegstrecke von einem WFP zum nächsten ihre Eigenschaften ändern, um die gewünschte Gesamtfunktion, bestehend aus Teilfunktionen, zu erfüllen. Dieser Zielkonflikt zeigt den Bedarf nach einer abschnittsweise funktionellen Betrachtung von Leitstützstrukturen auf. Besonders bei einteiligen Bauteilen sowie Bauteilen, bei denen LSS über ihre Wegstrecke unterschiedliche Funktionen erfüllen, können Gestalt-Funktion-Zusammenhänge mithilfe des heutigen C&C²-Ansatzes nur unzureichend detailgenau modelliert werden.

Es wird demzufolge eine Möglichkeit vorgestellt, mit der sich LSS in Segmente aufteilen lassen, ohne dabei die Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes zu verletzen – schließlich soll keine Auftrennung von LSS durch WFP stattfinden, da dieser Fall ausschließlich auf atomarer Ebene auftritt. Zur Lösung dieser Fragestellung werden, in Anlehnung an das WFP, zwei parallel nebeneinander liegende geschwungene Linien vorgeschlagen. Die geschwungenen Linien vereinen dabei den Zusammenhang zwischen dem WFP als parallele Striche und der LSS als geschwungene Linie (Bild 3). Demgemäß soll über das neue Symbol das Verständnis über das Modellelement sowie dessen Anwendung so intuitiv wie möglich gemacht werden.

Im Folgenden wird die Funktionsabgrenzung (FA) anhand einer progressiv gewickelten Schraubenfeder dargestellt (Bild 3). Sie teilt die modellierte LSS zwischen den beiden Connectoren und veranschaulicht, dass von der LSS zwei verschiedene Funktionen mit spezifischen Eigenschaften in unterschiedlichen Abschnitten der Produktgestalt erfüllt werden. Mit einer zusätzlichen Beschriftung der Modellelemente gemäß des Bezeichnungsleitfadens (Tröster et al. 2023) können die konkreten Funktionen eindeutig beschrieben und den Abschnitten zugeordnet werden. Dies wird nachfolgend am Fallbeispiel eines Körpergelenks veranschaulicht.

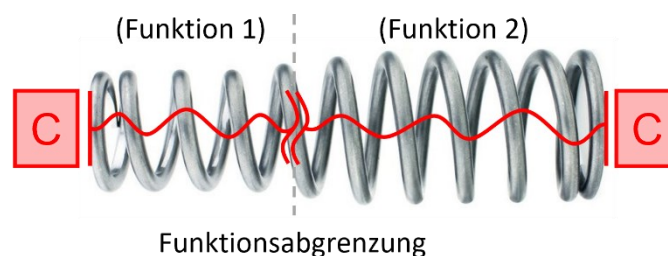


Bild 3: Darstellung einer Funktionsabgrenzung anhand einer progressiv gewickelten Schraubenfeder (TMX-24)

4.1 Fallbeispiel Festkörpergelenk

Beim vorliegenden Fallbeispiel handelt es sich um einen Greifer der sogenannten ‚roten Greiferserie‘, der mittlerweile nicht mehr aktiven Monolitix AG. Dieses Produkt kann zur Beförderung von kleineren Gegenständen eingesetzt werden, wie dies beispielsweise in der Verpackungsindustrie der

Fall ist. Es handelt sich bei diesem Greifer um ein nachgiebiges System, das Bewegungen ausführen kann, obschon der Greifmechanismus nur aus einem pneumatisch ausfahrbaren Zylinder und einem Festkörper besteht. Durch die Nachgiebigkeit des Systems kann der Greifer somit die gewünschten Stellungen erreichen. In einer Falschfarbendarstellung, als Ergebnis einer Finite Element Analyse (FEA), wird das Fallbeispiel gezeigt (Bild 4). Hierbei ist der Kolben so weit wie möglich in den Druckluftzylinder eingefahren, was zu einem Verschluss des Greifers führt. Im geöffneten Zustand ist der Zylinder ganz ausgefahren (Bild 6).

Im Verlauf der Analyse wurde zunächst ein C&C²-Modell entsprechend dem heutigen Ansatz erstellt (Bild 4 rechts). Gemäß der Definition einer LSS verbindet diese stets zwei Wirkflächenpaare (Albers et al. 2016, S. 3). Demnach muss jede (funktionsrelevante) LSS eingezeichnet werden. Wie unschwer zu erkennen ist, wird das C&C²-Modell in diesem Anwendungsfall jedoch unübersichtlich und erscheint eher ungeeignet für die Vermittlung von Wissen zu GFZ. Daher wurden erste Vereinfachungen vorgenommen, um die Übersichtlichkeit des Modells zu erhöhen. Ohne die Definition der LSS zu verletzen, werden die LSS im Folgenden zusammengefasst bzw. vereinigt betrachtet, sofern sie parallel nebeneinander verlaufen und dabei dasselbe Volumenelement nutzen (Bild 4 links). Bei detaillierterer Betrachtung (Detaillierungsgrad +1) lassen sich die LSS an erforderlichen Stellen wieder als einzelne LSS darstellen.

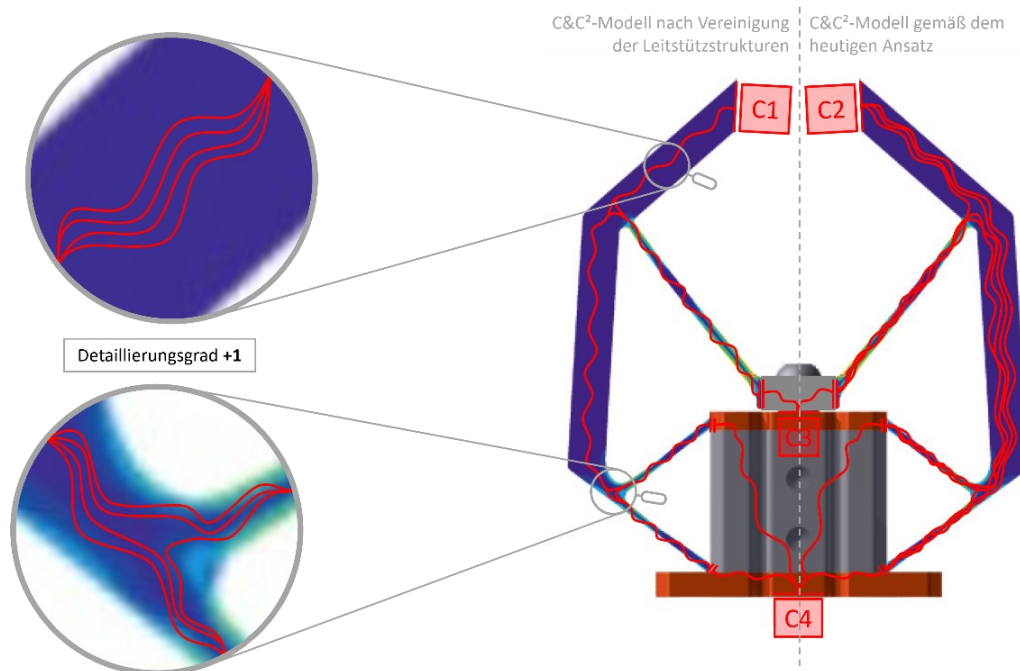


Bild 4: Vereinigung von parallel verlaufenden LSS zur übersichtlicheren Darstellung (Monolitix AG 2013)

Eine weitere Möglichkeit zur Vereinfachung von C&C²-Modellen besteht in der Zusammenfassung von LSS, wenn diese einen Ringschluss bilden – sie können zu einem Knoten konzentriert werden (Bild 5). Das Modellelement Knoten dient vor allem der leichtgängigeren Zeichnung von C&C²-Modellen. Mit dieser Modellierungsart muss nicht mehr darauf geachtet werden, die Linien bündig ineinanderfließen zu lassen. Vielmehr können sie einfach an einen Knoten angehängen werden. Diese Vereinfachung baut auf dem Grundgedanken auf, dass die Erstellung eines C&C²-Modells stets leicht von Hand gehen und dabei keine Missverständnisse hervorrufen soll. Die Modellierung mithilfe von Knoten ist also lediglich eine Art der Darstellung und verletzt somit keine Grundsätze des C&C²-Ansatzes.

Aufgrund der domänenübergreifenden Einsetzbarkeit des C&C²-Ansatz (Alink 2010, S. 46) wurde der Begriff ‚Knoten‘ in Anlehnung an die elektrische Domäne gewählt, um das intuitive Verständnis über das Hilfelement zu fördern. Ausgehend von dem in der Elektrotechnik bekannten 1. Kirchhoff’schen Gesetz (Kirchhoff 1845, S. 513) bestehen im Hinblick auf die Nutzung des Knotens im C&C²-Ansatz

zwar durchaus Analogien, jedoch ebenfalls Widersprüche, weshalb an dieser Stelle darauf aufmerksam gemacht wird, dass der hier eingesetzte Knoten nicht mit dem Modellelement elektrischer Schaltungen gleichzusetzen ist. So gilt nach dem Knotensatz beispielsweise die Forderung, dass an einem Knoten stets eine bestimmte Spannung anliegen muss. Das Pendant zur Spannung (Potentialvariable) ist in der Mechanik bekanntlich die Kraft (Schmitt und Andres 2019, S. 226). Da an einem Punkt bzw. Volumenelement eines Körpers ebenfalls nur eine bestimmte Kraft wirkt und sich mehrere LSS dieses Volumenelement teilen, wirkt an allen LSS dieselbe Kraft. Jedoch gilt dies in vielen Fällen nur für infinitesimal kleine Volumenelemente. Die Gesetzmäßigkeit, dass die Summe aller zufließenden Ströme gleich der abfließenden Ströme ist, kann nur bedingt bestätigt werden. Zum Strom (Flussvariable) ist das Pendant in der Mechanik die Geschwindigkeit. Dies ist im Grunde auch auf den C&C²-Ansatz übertragbar, da sich Bewegungen und dessen Geschwindigkeiten ebenfalls am Knoten aufteilen. Jedoch sind LSS per Definition immer eigenständig zu betrachten – eine LSS verbindet genau zwei WFP – und kann deshalb nicht als ein sich aufspaltender Fluss verstanden werden.

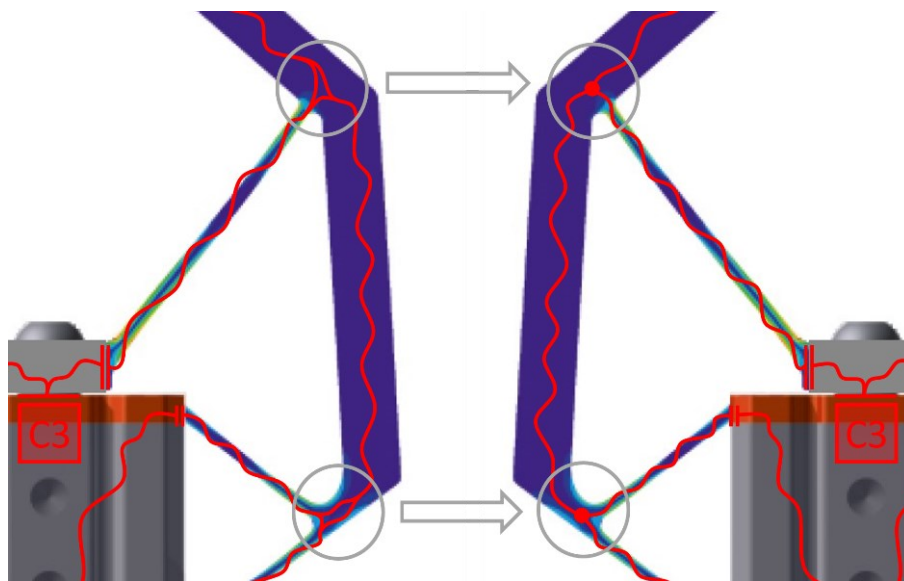


Bild 5: Ringschlüsse von LSS werden zu Knoten vereinfacht

4.2 Funktionsabgrenzung anhand des Fallbeispiels

Die vorgenommenen Vereinfachungen tragen zu einer Steigerung der Übersichtlichkeit des Modells bei. Im Folgenden soll durch das vorgeschlagene Modellelement ‚Funktionsabgrenzung‘ der Informationsgehalt des Modells gesteigert werden. Der Greifer wird dazu in Teilsysteme untergliedert und gemäß dem Bezeichnungsleitfaden beschriftet (Bild 6) – die Untergliederung ist dabei entsprechend dem Detaillierungsgrad des Modells gewählt. Da es sich um ein achsensymmetrisches Bauteil handelt, ist eine einseitige Beschriftung ausreichend. Im Gegensatz zur vorherigen Darstellung wird hier der geöffnete Zustand des Greifers veranschaulicht, der in der Bezeichnung mit dem Index eins von dem geschlossenen Zustand abgegrenzt wird. Die Beschreibungen der GFZ werden in Tabellenform angegeben und gelten (in diesem Rahmen) gleichermaßen für beide Greiferstellungen (Tabelle 1 und 2).

Durch die Aufteilung in funktionelle Abschnitte können die technischen Einzelheiten des Produkts vermittelt werden. An dieser Stelle sei beachtet, dass es sich bei den Angaben zu den technischen Einzelheiten lediglich um Mutmaßungen handelt. Diese stammen weder vom ursprünglichen Produktentwickler noch wurden sie mit der Monolitix AG abgesprochen. Die Korrektheit der technischen Einzelheiten ist jedoch auch nicht Ziel dieser Veranschaulichung, sondern lediglich die Anwendung des neuen Modellelements der Funktionsabgrenzung.

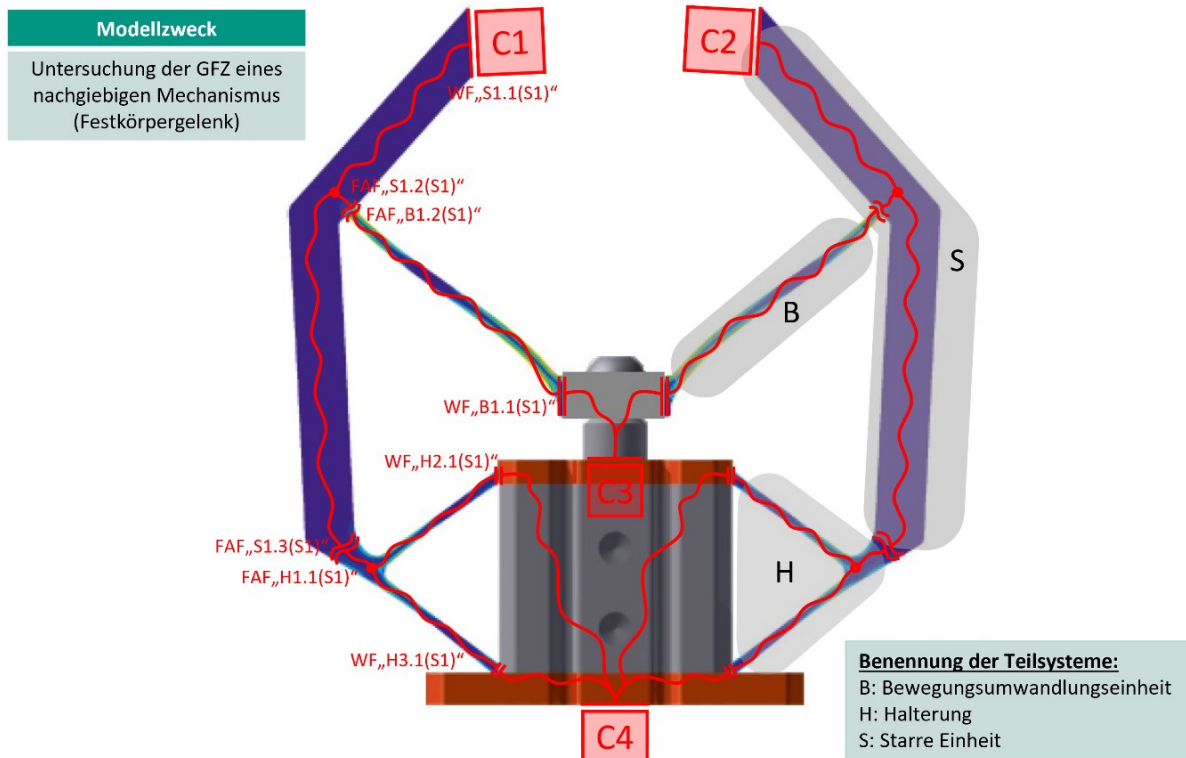


Bild 6: C&C²-Modell eines Festkörpergelenks mit Funktionsabgrenzungen

Für die Beschreibung der GFZ werden in diesem Fallbeispiel eine Tabelle für WFP und FA (Tabelle 1) sowie eine Tabelle für LSS (Tabelle 2) verwendet – das Schema zur Beschreibung der WFP, FA und LSS erfolgt nach dem Bezeichnungsleitfaden (Bild 2). Ein Beispiel für eine Funktionsabgrenzung ist FA „B1.2//S1.2(S1; 2)“ (Bild 6 und Tabelle 1). Die Bewegungsumwandlungseinheit greift nicht im Eckpunkt der starren Einheit an, um Spannungsüberhöhungen zu verhindern. Da auch die starre Einheit nicht vollständig steif ist, wird sich diese in den unterschiedlichen Greiferstellungen sowie Lastfällen leicht verbiegen. Demzufolge ändert sich ebenfalls deren Öffnungswinkel, wodurch die Kontaktstelle am Eckpunkt negativ beeinflusst werden würde. Gleiches gilt für FA „H1.1//S1.3(S1; 2)“. Ferner wurde das Wirkflächenpaar WFP „C4//H2.1(S1; 2)“ möglichst weit außen am Gehäuse des Druckluftzylinders platziert, um die Länge der Halterungsstrebe zu maximieren und dadurch das nachgiebige Verhalten zu begünstigen – denn je länger die Strebe, desto größer die mögliche Durchbiegung. Für WFP „C4//H3.1(S1; 2)“ gilt dies ebenfalls.

Tabelle 1: (Mögliche) Beschreibung der GFZ des Fallbeispiels in Bezug auf die WFP sowie FA

WFP und FA	Funktion	Technische Anmerkungen
„C1//S1.1(S1; 2)“	Kontaktstelle zwischen Greifobjekt und Körpergelenk	Berührungsfläche je nach Anwendungsfall zu wählen.
„B1.2//S1.2(S1; 2)“	Abzweigung des Kraftflusses ausgehend von C3 nach C1 (bzw. C2) und C4	FA wurde nicht in den Winkel der starren Einheit gelegt, um Spannungsüberhöhungen zu verhindern.
„C4//H2.1(S1; 2)“	Verbindungsstelle zwischen Körpergelenk und Druckluftzylinder	WFP wurde möglichst weit nach außen gelegt, um eine größtmögliche Länge der Halterungsstäbe und damit Nachgiebigkeit zu realisieren.
...

In der Tabelle der LSS werden die GFZ der abschnittswisen LSS beschrieben, wie beispielsweise die von LSS „B1.1~B1.2(S1; 2)“ (Tabelle 2). Die Besonderheit dieser LSS ist, dass diese stets unter Spannung steht und folglich für Steifigkeit und eine stets definierte Greiferstellung sorgt. Um die Lebensdauer des Greifers dabei zu verlängern, ist die Strebe im geöffneten sowie geschlossenen Zustand stets gleichseitig verbogen. Eine wiederholte Umkehr der Belastungsrichtung würde ansonsten möglicherweise zu einer vorzeitigen Materialermüdung führen. Gleiches gilt ebenfalls für LSS „H1.1~H3.1(S1; 2)“ und LSS „H1.1~H2.1(S1; 2)“. Des Weiteren sind die Wirkflächen am Druckluftzylinder durch die Leitstützstruktur LSS „H2.1~H3.1(S1; 2)“ miteinander verbunden. Diese wurde über einen abgerundeten Winkel gestaltet, um die Kerbspannung (und damit abermals die Spannungsüberhöhungen) zu verringern. Über Methoden der Kerbformoptimierung kann eine optimale Krümmung ermittelt werden (Sörensen 2008, S. 11–24).

Tabelle 2: (Mögliche) Beschreibung der GFZ des Fallbeispiels in Bezug auf die LSS

LSS	Funktion	Technische Anmerkungen
„S1.1~S1.3(S1; 2)“	Kraftleitung zur beweglichen Halterung	Möglichst dicke abschnittsweise LSS, um die Nachgiebigkeit des Systems auf die Halterung sowie die Bewegungsumwandlungseinheit zu konzentrieren. Dadurch soll zudem ein stabiler Greifakt gewährleistet werden.
„B1.1~B1.2(S1; 2)“	Umwandlung einer Linearbewegung in vertikaler Richtung in eine Bewegung in die x-y-Ebene	Die Strebe ist sowohl im Zustand S1 sowie S2 verbogen und damit unter Spannung. Dies sorgt für Steifigkeit und für eine stets definierte Greiferstellung. Zudem wird die Strebe immer gleichseitig verbogen. Sprich: Herrscht an einer Stelle Druck, wird es nicht zu einem Wechsel auf Zug kommen. Solche Spannungsänderungen würden ansonsten zur Ermüdung des Werkstoffs führen.
„H2.1~H3.1(S1; 2)“	Gegenseitige Beeinflussung der beiden Streben	Die Verbindung der beiden Streben ist über einen abgerundeten Winkel realisiert, um Spannungsüberhöhungen aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung zu vermeiden.
...

5 Diskussion

Der C&C²-Ansatz ist ein erprobter und geeigneter Ansatz zur Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ) (Grauberger et al. 2020). Mit den definierten Kernelementen lassen sich viele technische Problemstellungen modellieren. Die Modellierung von Abschnitten stand bisher nicht im Fokus der Modellbildung. Durch die immer stärkere Verbreitung von 3D-gedruckten Komponenten (Fastermann 2016), die eine Vielzahl an Funktionen in sich integrieren, vergrößert sich der Bedarf nach einer Formalisierung zur Modellierung von Abschnitten. Mit der Einführung des Modellelements Funktionsabgrenzung (FA) wird die abschnittsweise Modellierung von Produktgestalten möglich. Neu ist in dieser Hinsicht, dass sich die Leitstützstrukturen (LSS) im Gegensatz zur bisherigen Definition nicht nur „abhängig vom Detaillierungsgrad der Modellbildung über Systeme oder Subsysteme hinweg erstrecken“ können (Albers et al. 2016, S. 3), sondern sich auch innerhalb von Systemen oder Subsystemen weiter durch Funktionsabgrenzungen aufteilen lassen. Dadurch lassen sich GFZ detaillierter modellieren und beschreiben. Die Abgrenzung des Modellelements ‚Funktionsabgrenzung‘ vom WFP ist in diesem Fall nötig, um die Definition von Wirkflächen als „feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern“ (Albers et al. 2016, S. 2) nicht zu verletzen.

In Verbindung mit den aufgezeigten Vereinfachungen wie der Vereinigung von parallel verlaufenden LSS oder dem Knoten-Ansatz, lassen sich mehr GFZ detaillierter und gleichzeitig übersichtlicher darstellen. Am Fallbeispiel eines Festkörpergelenks konnte gezeigt werden, dass ein vollständiges C&C²-Modell anhand des heutigen Ansatzes sehr viele LSS mit sich bringt und diese das Modell dadurch schnell unübersichtlich machen (Bild 4 rechts). Im Gegensatz dazu stellt die Vereinigung in Verbindung mit Vergrößerungen in kritischen Bereichen eine gute Alternative dar (Bild 4 links). In vielen C&C²-Modellen findet sich dieser Ansatz bereits in Teilen wieder. Die Vereinigung von LSS wird häufig praktiziert, jedoch fehlen die Vergrößerungen in kritischen Bereichen. Dadurch sind diese Modelle streng genommen nicht korrekt, da LSS zwischen Wirkflächenpaaren (WFP) verlaufen und sich nicht aufspalten können (Albers et al. 2016, S. 3). In Verbindung mit den Vergrößerungen ergibt sich eine formal korrekte Möglichkeit, auf diesen Umstand hinzuweisen und gleichzeitig die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

Einen Schritt weiter geht die Zusammenfassung von Ringschlüssen zu Knoten (Bild 5). Dieser Ansatz sorgt für eine weitere Verbesserung der Übersichtlichkeit und verursacht zudem weniger Modellierungsaufwand, da lediglich ein Punkt modelliert werden muss. Die Verbindung der Modellierung mit Knoten und der Anwendung des neuen Modellelements der Funktionsabgrenzung sorgt für eine schnelle und übersichtliche Modellierung.

Die im Fallbeispiel gezeigte Modellierung konnte bisher noch nicht mit den Entwicklern des Körpergelenkgreifers verifiziert werden. Das Vorgehen anhand des Festkörpergelenks dient daher zunächst als Beispiel, um die Modellierung mit FA zu veranschaulichen. Diese Art der Modellierung wurde erstmalig in diesem Beitrag vorgestellt, weshalb es diesbezüglich noch keine definierten Vorgehensweisen gibt. Manche Funktionen überlagern sich in der Produktgestalt bzw. sind nicht scharf abzutrennen. Ob die Modellierung in diesen Fällen durch mehrere Einzelmodelle aufgeteilt oder in ein Modell integriert werden soll, muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Durch die vorgestellten Vereinfachungen und Einführung eines neuen Modellelements der Funktionsabgrenzung leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Erweiterung der Modellierungsmöglichkeiten des C&C²-Ansatzes auf Körpergelenke sowie weitere Bauteile. Damit wird die Lücke der formalisierten Modellierung von Gestaltabschnitten geschlossen. Durch diese Weiterentwicklungen soll die Eignung des Ansatzes für die Modellierung und auch Dokumentation von produktspezifischen GFZ verbessert werden. Letztlich soll dies ausscheidende Mitarbeiter dabei unterstützen, ihr Wissen zu produktspezifischen GFZ so aufbereitet modellieren zu können, dass zukünftigen Produktentwicklern das notwendige Wissen für die (Weiter-)Entwicklung bestehender sowie neuer Produkte zur Verfügung steht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Möglichkeit dargeboten, wie mithilfe des C&C²-Ansatzes Abschnitte von Leitstützstrukturen (LSS) modelliert und dokumentiert werden können, um Wissen über Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) vermittelbar weitergeben zu können. Die Einführung eines neuen Modellelements, der Funktionsabgrenzung (FA), ermöglicht dabei die abschnittsweise Modellierung von GFZ, die anhand eines Fallbeispiels des Körpergelenks veranschaulicht werden konnte. Zudem wurden Modellierungsvorschläge anhand des Fallbeispiels erläutert die zu einer verbesserten Darstellung von C&C²-Modellen führen. Hier ist zum einen die Vereinfachung zu einem Knoten bei Ringschlüssen von LSS zu nennen, sowie auch die Vereinigung von parallel verlaufenden LSS zu einer gesamten LSS.

Weiterführend müssen diese Erkenntnisse durch Studien und Anwender validiert und der Nutzen quantifiziert werden. Im weiteren Verlauf werden eventuell noch Anpassungen notwendig sein, die iterativ eingepflegt und erneut validiert werden müssen.

Die Modellierung von abschnittswisen GFZ bietet des Weiteren die Möglichkeit zu einer deutlich detaillierteren Beschreibung und Analyse im Sinne des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung (Albers et al. 2015). Hierbei scheint eine Bestimmung der

Variationsanteile zwischen Produkt- und Entwicklungsgenerationen möglich zu sein. Es können nämlich sowohl Abschnitte definiert werden, die ohne Änderung in eine nächste Entwicklungsgeneration übernommen werden können, als auch Gestalt- und Prinzipvariationen, da die jeweiligen Funktionen modelliert werden können. Dies soll in einer weiteren Arbeit im Detail untersucht werden.

7 Literatur

- Adenauer 2015 ADENAUER, Sibylle: Handlungsfeld „Wissen sichern und weitergeben“. In: Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): *Leistungsfähigkeit im Betrieb: Kompendium für den Betriebspraktiker zur Bewältigung des demografischen Wandels*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, S. 435–458.
- Albers et al. 2015 ALBERS, Albert; BURSAC, Nikola; WINTERGERST, Eike: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Binz, Hansgeorg; Bertsche, Bernd; Bauer, Wilhelm; Roth, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2015: Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015, S. 1–10.
- Albers et al. 2016 ALBERS, Albert; GLADYSZ, Bartosz; KNIEL, Jonas; ASCHOFF, Michael; MEYER, Armin: Integration von Versuchsergebnissen in C&C² – Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. In: Brökel, Klaus; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Rieg, Frank; Stelzer, Ralph; Köhler, Peter; Müller, Norbert; Scharr, Gerhard (Hrsg.): *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016: Traditio et Innovatio – Entwicklung und Konstruktion, am 6. und 7. Oktober 2016 in Rostock*. Aachen: Shaker Verlag, 2016 (Berichte aus der Konstruktionstechnik), S. 10–20.
- Alink 2010 ALINK, Thomas: *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Meaning and notation of function for solving design problems with the C&C-Approach*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Produktentwicklung, Dissertation, 2010.
- Beetz et al. 2018 BEETZ, Jean-Paul; SCHLEMMER, Pia Dorothea; KLOBERDANZ, Hermann; KIRCHNER, Eckhard: Using the new Working Space Model for the Development of Hygienic Products. In: *Proceedings of the DESIGN, 2018*, S. 985–996.
- Fastermann 2016 FASTERMANN, Petra: Chancen und Risiken der Technologie – Ausblick und Prognosen. In: *3D-Drucken: Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 129–140.
- Gero und Kannengiesser 2014 GERO, John S.; KANNENGIESSER, Udo: The Function-Behaviour-Structure Ontology of Design. In: Chakrabarti, A.; Blessing, L. (Hrsg.): *An Anthology of Theories and Models of Design*. London: Springer, 2014, S. 263–283.
- Grauberger et al. 2020 GRAUBERGER, Patric; WESSELS, Holger; GLADYSZ, Bartosz; BURSAC, Nikola; MATTHIESEN, Sven; ALBERS, Albert: *The contact and channel approach – 20 years of application experience in product engineering*. In: *Journal of Engineering Design* 31 (2020), Nr. 5, S. 241–265.

- He et al. 2013 HE, Bin; SONG, Wei; WANG, Yangang: *A feature-based approach towards an integrated product model in intelligent design*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (2013), S. 15–30.
- He et al. 2016 HE, Bin; SONG, Wei; WANG, Yangang: *Computational Conceptual Design Using Space Matrix*. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 15 (2015), Nr. 1, S. 1–7.
- Kirchhoff 1845 KIRCHHOFF, Gustav Robert: *Ueber den Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisförmige*. In: *Annalen der Physik und Chemie* 64 (1845), S. 497–514.
- Langeveld 2011 LANGEVELD, Lau: *Product Design with Embodiment Design as a New Perspective*. In: Coelho, Denis (Hrsg.): *Industrial Design – New Frontiers*. London: InTech, 2011, S. 121–146.
- Matthiesen 2021 MATTHIESEN, Sven: *Gestaltung – Prozess und Methoden*. In: Bender, Beate; Gericke, Kilian (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2021, S. 397–465.
- Matthiesen et al. 2018 MATTHIESEN, Sven; GRAUBERGER, Patric; HÖLZ, Kevin; NELIUS, Thomas; BREMER, Frank; WETTSTEIN, Andreas; GESSINGER, Annabell; PFLEGLER, Benjamin; NOWOSELTSCHENKO, Konstantin; VOß, Katharina: *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung: Techniken zur Analyse und Synthese*. In: *KIT Scientific Working Papers* 58 (2018), S. 1–19.
- Matthiesen et al. 2019 MATTHIESEN, Sven; GRAUBERGER, Patric; BREMER, Frank; NOWOSELTSCHENKO, Konstantin: *Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities*. In: *SN Applied Sciences* 1 (2019), Nr. 8, S. 1–11.
- Monolitix AG Monolitix AG: *Rote Greiferserie*. URL http://www.monolitix.com/files/td_rg16.pdf – Überprüfungsdatum 28.10.2022.
- Oerding 2009 OERDING, Jochen: *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Produktentwicklung, Dissertation, 2009.
- Schmitt und Andres 2019 SCHMITT, Thomas Lienhard; ANDRES, Markus: *Die Theorie der Bondgraphen*. In: Dies.: *Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme: Bondgraphen, objektorientierte Modellierungstechniken und numerische Integrationsverfahren*. Wiesbaden: Springer, 2019, S. 113–279.
- Sörensen 2008 SÖRENSEN, Jörg: *Untersuchungen zur Vereinfachung der Kerbformoptimierung*. Universität Karlsruhe, Fakultät Maschinenbau, Dissertation, 2008.
- TMX-24: TMX-24: *Progressive Federn*. URL https://tmx-24.de/media/image/77/82/2d/PROGRESSIVE_FEDERN_DRUCKSTUFENEINHEIT_415.jpg – Überprüfungsdatum 14.01.2023.
- Tröster et al. 2023 TRÖSTER, Peter Michael; SCHMIDT, David; ALBERS, Albert: *A Designation Guide for Consistent Cross-System-Level Modeling of Embodiment Function Relations*. In: *Procedia 33th CIRP Design Conference, 2023*.
- Weber et al. 2007 WEBER, Frithjof; DAUPHIN, Eva; FUSCHINI, Renata; HAARMANN, Julia; KATZUNG, Alexander; WUNRAM, Michael: *Expertise transfer: A case study about knowledge retention at airbus*. In: *2007 IEEE International Technology Management Conference (ICE), 2007*, S. 1–10.

Modellbasierter Ansatz zur Unterstützung der nachhaltigen und nutzungsorientierten Fahrzeugkonzeption

Model-based approach to supporting sustainable and usage-oriented vehicle development

Maximilian Werner¹, Luca Lanz²

¹Fraunhofer IAO, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 70569 Stuttgart
maximilian-jakob.werner@iao.fraunhofer.de

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), 70597 Stuttgart

Abstract (deutsch): Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird ein Ansatz zur Unterstützung der modellbasierten Konzeption von Produkt-Service-Systemen in den frühen Entwicklungsphasen präsentiert, welcher einen speziellen Fokus auf deren Einbettung in eine Kreislaufwirtschaft legt. Vor diesem Hintergrund wird aus dem Stand der Wissenschaft und Praxis folgernd ein Lösungsansatz im Sinne des Model-Based Systems Engineering vorgeschlagen. Trotzdem es bereits vielversprechende Ansätze zur Modellierung von PSS sowie kreislaufwirtschaftlicher Aspekte gibt, scheint deren kombinierte Betrachtung eine bestehende Forschungslücke darzustellen. Die Autoren stellen daher das *PSS-CE-Metamodell* als unterstützendes Modellierungswerkzeug vor, welches die Integration von emergierenden Anforderungen einer Kreislaufstrategie in die Systemarchitektur ermöglicht. Die Anwendung und Evaluierung des Lösungsansatzes erfolgt im Kontext des aktuellen Forschungsprojekts *CYCLOMETRIC* und wird anhand eines Carsharing-Systems als Fallbeispiel beschrieben. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse kritisch reflektiert und mögliche Ansatzpunkte für weiterführenden Forschungsbedarf genannt.

Keywords (deutsch):

Model-Based Systems Engineering, Fahrzeugentwicklung, Produkt-Service-Systeme, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit

Abstract (english): This paper presents an approach to support the model-based conception of product-service-systems in the early development phases with a special focus on their embedding in a circular economy. Against this background, a solution approach in the sense of Model-Based Systems Engineering is proposed based on the state of the art in science and practice. Although there are already promising approaches for modeling PSS as well as circular economy aspects, their combined consideration seems to represent an existing research gap. Therefore, the authors present the *PSS-CE Metamodel* as a supporting modeling tool that enables the integration of emergent requirements of a circular strategy into the system architecture. The application and evaluation of the solution approach is carried out in the context of the current research project *CYCLOMETRIC* and is described using a car sharing system as a case study. Finally, the findings are critically reflected and possible starting points for further research are identified.

Keywords (english):

Model-Based Systems Engineering, Vehicle Development, Product-Service-Systems, Circular Economy, Sustainability

1 Einleitung

Der Klimawandel und andere geopolitische Herausforderungen zeigen deutlich, dass nachhaltiges Handeln und ein schonender Umgang mit unserer Umwelt unausweichlich sind. Für Industrien wie den Automobilsektor ist es daher zwingend, eine stärkere Nachhaltigkeitsorientierung von Produkten und Dienstleistungen im Sinne des *Design-for-Sustainability* sicherzustellen (Ceschin und Gaziulusoy 2020; Mayyas et al. 2012). Der Handlungsspielraum kann dabei sehr breit sein und sollte alle Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch und sozial) in Betracht ziehen (Purvis et al. 2019). Es ist daher eine zentrale Aufgabe der nachhaltigkeitsorientierten Fahrzeugentwicklung, entsprechende Technologien und Lösungen zielführend in die bestehenden Systemarchitekturen zu integrieren.

Seit einiger Zeit werden dazu bereits diverse Lösungen entwickelt, die mitunter über rein technische Aspekte hinausgehen. So lässt sich bspw. durch ergänzende Dienste in physischen Produkten ein effizientes, nachhaltiges *Produkt-Service-System* (PSS) schaffen (Tukker 2004). Noch umfassender wird das gleiche Ziel von aktuellen Ansätzen der sogenannten *Kreislaufwirtschaft* verfolgt. Hierbei soll die Nachhaltigkeit von Produkten und Dienstleistungen gesteigert werden, indem ihre Lebenszyklen durch verschiedene Strategien verlängert und die bisherigen Konzepte zur Außerbetriebsetzung ersetzt oder zumindest zeitlich verzögert werden (Ellen MacArthur Foundation 2013).

Allerdings nimmt die von wachsenden Software- und Servicebestandteilen ohnehin verursachte Komplexität in der Fahrzeugarchitektur durch die zusätzliche Berücksichtigung von Strategien zur Steigerung des Nachhaltigkeitsbeitrags weiter zu und erfordert daher systematische Werkzeuge, um diese besser handhaben zu können (Block et al. 2020). Die Disziplin des *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) verspricht durch konsequentes Systemdenken und modellbasierte Abstraktion der Entwicklungsobjekte genau diese Hilfestellung zu leisten (Huth und Vietor 2020).

Der vorliegende Beitrag setzt sich vor diesem Hintergrund das Ziel, die nachhaltige und nutzerorientierte Entwicklung von Fahrzeugen durch einen modellbasierten Ansatz zu unterstützen. Hierzu wird nachfolgend zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft und Praxis im Bereich der nachhaltigkeitsorientierten Fahrzeugentwicklung sowie des MBSE vorgestellt und in Bezug auf konkrete Ansätze zur modellbasierten Entwicklung von PSS beziehungsweise Integration kreislaufwirtschaftlicher Aspekte analysiert. Anschließend wird die hieraus abgeleitete Forschungslücke charakterisiert und als Lösungsansatz ein konzeptionelles Modell vorgestellt, welches die modellbasierte Entwicklung von PSS unterstützt. Dabei wird speziell die kreislaufwirtschaftliche Gestaltung des PSS verfolgt, um eine entsprechende Ausrichtung bereits frühzeitig im Modell berücksichtigen zu können. Die literaturreduzierte Lösung erweitert existierende Ansätze um mobilitätsspezifische Konstrukte sowie strategische Aspekte der Kreislaufwirtschaft. Abschließend wird die Anwendung und Evaluation des *CE-PSS-Metamodells* im Rahmen des Forschungsprojekts *CYCLOMETRIC* beschrieben und ein Fazit der gewonnenen Erkenntnisse gezogen.

2 Stand der Wissenschaft und Praxis

2.1 Nachhaltigkeitsorientierte Fahrzeugentwicklung durch Kreislaufwirtschaft

Als einer der Hauptemittenten von Treibhausgasen werden der Straßenverkehr und speziell die Automobilindustrie kontinuierlich mit Forderungen nach mehr Nachhaltigkeit konfrontiert (Mayyas et al. 2012). Dem Ökodesign und ähnlichen Entwicklungsansätzen zur frühzeitigen Berücksichtigung von Umweltauswirkungen wird in diesem Kontext zunehmende Relevanz zugeschrieben (McAloone und Pigozzo 2021). Mögliche Ansatzpunkte können dabei auch über rein technische Aspekte hinausgehen, z. B. durch eine nachhaltigere Nutzung von Fahrzeugen als PSS im Rahmen des Carsharings (Meier und Uhlmann 2017). Noch umfassendere Nachhaltigkeitssteigerungen verspricht der *Cradle-to-Cradle*-Ansatz durch komplett geschlossene Material- und Energiekreisläufe (Braungart und McDonough 2021). Eine chancenreiche Option zur Umsetzung dieses Prinzips ist die sogenannte *Kreislaufwirtschaft* oder *Circular Economy* (CE) (Ellen MacArthur Foundation 2013). Potting et al. (2017) liefern eine

prominente Strukturierung möglicher Umsetzungsstrategien, wobei sie sinnvollen Materialeinsatz (*recover, recycle*), verlängerte Produktlebenszyklen (*repurpose, remanufacture, refurbish, repair, reuse*) sowie intelligente Produktnutzung und -herstellung (*reduce, rethink, refuse*) unterscheiden. Aktuell erfolgt die Nachhaltigkeitsbewertung jedoch aufgrund der Verfügbarkeit quantitativer Daten erst spät im Entwicklungsprozess, obwohl derartige Überlegungen gerade in den frühen Phasen einen erheblichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit haben könnten (Schögl et al. 2017). Es bedarf daher geeigneter Werkzeuge zur Informationsverwaltung, um kreislaufbezogene Entscheidungen bereits frühzeitig zu ermöglichen (Diaz et al. 2021). Kreislaufwirtschaft erfordert somit die ganzheitliche Berücksichtigung von Anforderungen und Abhängigkeiten einzelner Gestaltungsentscheidungen entlang des gesamten Systemlebenszyklus (Hauschild et al. 2020). MBSE kann vor diesem Hintergrund einen Lösungsansatz bieten, indem die aus diesen vielseitigen Abhängigkeiten resultierende Komplexität besser handhabbar gemacht wird (Block et al. 2023; Halstenberg et al. 2019).

2.2 Ganzheitliches Denken und Komplexitätsreduktion durch MBSE

Das MBSE ist eine Teildisziplin der Systementwicklung und kann als Überbegriff für verschiedene, modellbasierte Ansätze zur Entwicklung technischer Systeme verstanden werden. Den Kern bildet dabei das zentrale *Systemmodell*, welches alle Entwicklungsaktivitäten, von der Anforderungsentwicklung über die Spezifikation und Erprobung bis zur Implementierung des Systems dokumentiert (Friedenthal et al. 2015; Huth und Vietor 2020). Modelle sind grundsätzlich eine abstrakte Repräsentationen realer Entitäten, welche für den Betrachtungsfall irrelevante Aspekte ausblenden und die Komplexität durch eine Reduktion auf das Wesentliche besser handhabbar machen (Friedenthal et al. 2015). Die Modellerstellung selbst dient bereits dem Erkenntnisgewinn und unterstützt eine nachhaltige Systemspezifikation (Kastens und Kleine Büning 2021). Ein Modell hält Informationen konsistent zusammen und ermöglicht die Betrachtung des Systems auf verschiedenen Abstraktionsebenen, sodass Entwickler bei der Beschreibung oder Analyse interner und externer Interdependenzen in Bezug auf dessen Struktur und Verhalten unterstützt werden (Weilkiens 2014). Durch die zentrale Organisation jeglicher Informationen unterstützt das Systemmodell als sogenannte *Single Source of Truth* die Handhabung komplexer Entwicklungsprojekte (Apostolov et al. 2018; Halstenberg et al. 2019). Ein wesentlicher Schwerpunkt des MBSE liegt dabei auf der Entwicklung der *Systemarchitektur* in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses, um die nachfolgende domänenspezifische Entwicklung vorzubereiten und frühzeitig gegen mögliche Risiken abzusichern (Eigner et al. 2019; Schulze 2016). In der Anwendung erfolgt die Modellierung durch den kombinierten Einsatz von *Modellierungsmethodiken, -sprachen* und *-werkzeugen* (Huth und Vietor 2020; Weilkiens 2014).

2.3 PSS-Entwicklungsansätze

Im Gegensatz zur modellbasierten Entwicklung physischer Systeme, lässt sich für die methodische PSS-Entwicklung laut Lüttenberg et al. (2018) weiterhin ein Forschungsbedarf feststellen und es sollte laut Halstenberg et al. (2019) speziell die konzeptionelle Gestaltung sowie Architekturentwicklung von PSS durch neue Forschungsansätze unterstützt werden. Da klassische Ansätze, wie die *VDI 2206*, eine unzureichende Berücksichtigung von Dienstleistungen beinhalten, bedarf es spezieller Ansätze zur integrierten Entwicklung von PSS (Lüttenberg et al. 2018; Spath und Dangelmaier 2016). Boucher et al. (2016) stellen in diesem Kontext eine Methode zur PSS-Modellierung auf Basis eines zweigeteilten Metamodells vor, welches einerseits die strukturelle Beschreibung von Produkt, Service und Organisation sowie andererseits die dynamische Beschreibung des Angebots, der Leistung sowie der Szenarien unterstützen soll. Apostolov et al. (2018) adressieren zusätzliche Betrachtungsgegenstände im Rahmen der integrierten PSS-Entwicklung und präsentieren dazu einen modellbasierten Ansatz auf Basis der SysML und eines zentralen Modells als *Single Source of Truth*, der speziell auf die frühen Phasen von der Anforderungsdefinition bis zu Systemspezifizierung abzielt.

Zudem wird die Entwicklung domänenübergreifender PSS, wie bei einem *System of Systems (SoS)* aus Fahrzeugen und Infrastruktur, noch nicht ausreichend berücksichtigt. Fakhfakh et al. (2020) schlagen

daher ein spezifisches Metamodell vor, welches die wesentlichen Merkmale zur vollständigen Beschreibung von PSS und SoS vereint. Obwohl die Klassifizierung von PSS in der Theorie weitreichend erforscht ist, fehlen nach Auffassung von Maleki et al. (2018) in der Praxis weiterhin Ansätze zur ganzheitlichen Darstellung sowie zur klaren Beschreibung interner und externer Systemgrenzen. Ihr Ansatz soll daher die Modellierung verschiedener Perspektiven im Rahmen der PSS-Architecturentwicklung unterstützen. Der Beitrag von Idrissi et al. (2017) beschreibt die umfassende Analyse bestehender, konzeptioneller Modelle für PSS, auf deren Grundlage die Autoren im Anschluss ein allgemeingültiges Metamodell zur Modellierung von PSS ableiten. Orellano et al. (2019) kritisieren die unzureichende Berücksichtigung strategischer Zielsetzungen in den frühen Phasen der PSS-Entwicklung und stellen vor diesem Hintergrund einen Modellierungsansatz für PSS aus strategischer und operativer Sicht vor.

2.4 Entwicklungsansätze im Kontext der Kreislaufwirtschaft

Wie bereits zuvor erwähnt, erfordert die Einführung nachhaltiger PSS im Sinne der Kreislaufwirtschaft ein ganzheitliches Systemdenken sowie eine vollständige Lebenszyklusbetrachtung. Zur besseren Handhabung der damit einhergehenden Komplexität können MBSE-Ansätze eine vielversprechende Lösung darstellen (Halstenberg et al. 2019; Hauschild et al. 2020). Eine stärkere Nachhaltigkeitsorientierung erfordert demnach konsequentes *Life Cycle Engineering*, um die verschiedenen Wechselwirkungen einer Kreislaufstrategie auf erst zukünftige Sachverhalte entlang des Lebenszyklus berücksichtigen zu können (Hauschild et al. 2020). Block et al. (2023) stellen in diesem Kontext ein Modell zur Berücksichtigung individueller Systemlebenszyklen vor, welches als Metamodell im Zuge eines MBSE-Ansatzes genutzt werden kann. Einen Anknüpfungspunkt hieran stellt der ganzheitliche Modellierungsansatz von Halstenberg et al. (2019) dar, welcher die Implementierung von Kreislaufstrategien in einem PSS zum Ziel hat. Lawrenz et al. (2021) hingegen streben die Motivation zu nachhaltigerem Verhalten von Endnutzern an und schlagen dazu ein Metamodell vor, welches die zusätzliche Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsbeitrags bei der Systemmodellierung ermöglicht. Ruggieri et al. (2016) beschäftigen sich wiederum auf übergeordneter Ebene mit der zwischenbetrieblichen Kooperation im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft und stellen ein Metamodell zur Veranschaulichung der damit einhergehenden Einflussfaktoren vor. Ebenfalls aus einer betrieblichen Perspektive wollen Mboli et al. (2022) die Entscheidungsfindung in kreislaufwirtschaftlichen Geschäftsmodellen durch ein Werkzeug auf Basis semantischer Ontologien erleichtern.

3 Vorstellung des CE-PSS-Metamodells

3.1 Forschungslücke und Anforderungen an den Lösungsansatz

In Anbetracht der analysierten Literatur wird festgehalten, dass bis dato keine Metamodelle bekannt sind, welche die direkte Berücksichtigung von Aspekten der Kreislaufwirtschaft im Rahmen der modellbasierten PSS-Entwicklung ermöglichen. Weitere, den Umfang dieses Beitrags übersteigende Recherchen haben ebenfalls keine Ansätze identifiziert, welche kreislaufwirtschaftlicher Aspekte in die Modellierung der PSS-Architektur einbeziehen. Im domänenspezifischen Kontext der Mobilität und Fahrzeugentwicklung konnten ebenfalls keinerlei Ansätze identifiziert werden. Es zeigt sich die Situation, dass bestehende Modellierungsansätze, von Halstenberg et al. (2019) abgesehen, die PSS-Entwicklung und Kreislaufstrategien voneinander getrennt betrachten. Zudem scheinen Ansätze zur Modellierung kreislaufwirtschaftlicher Aspekte generell nicht weit verbreitet zu sein. Oftmals fokussieren die identifizierten Beiträge auf spezielle Teilbereiche einer konkreten Kreislaufstrategie oder bspw. nur auf die Stoffstrommodellierung. Die Unterstützung der kreislauforientierten PSS-Entwicklung auf Basis dedizierter Metamodelle stellt demnach eine Forschungslücke dar. Jedoch scheint eine Kombination bestehender Ansätze in unterschiedlichen Teilbereichen mit bereits

vielversprechenden Forschungsergebnissen erstrebenswert. Vor diesem Hintergrund werden folgende Anforderungen an einen entsprechenden Lösungsansatz formuliert:

- Modellierung von Mobilitätslösungen als Produkt-Service-Systeme unterstützen
- Modellierung der emergenten Anforderungen von Kreislaufstrategien unterstützen
- Einbindung von Kreislaufstrategien in die PSS-Architektur
- Modularer Ansatz zur einfachen Kombination mit verschiedenen Modellierungsansätzen
- Allgemeingültiger Ansatz mit domänenspezifischer Anpassungsmöglichkeit

3.2 Konzeptionelle Herleitung des modularen PSS-CE-Metamodell

Zur Berücksichtigung der zuvor formulierten Anforderungen in Bezug auf die Kombinationsmöglichkeit mit bestehenden Modellierungsansätzen wird im Rahmen dieses Beitrags eine zweiteilige, literaturdeduzierte Metamodell-Strategie vorgeschlagen. Einerseits soll ein unterstützendes Metamodell für die allgemeingültige Entwicklung von PSS erstellt werden, welches zusätzliche um eine Modell-Bibliothek für domänenspezifische Aspekte im Mobilitätskontext erweitert werden kann. Auf diese Weise wird die rein technische Systemmodellierung durch dienstleistungsbasierte Nutzungskonzepte ergänzt, um Mobilitätslösungen, wie bspw. Carsharing, als PSS beschreiben zu können. Andererseits soll ein zweites Metamodell zur Integration von Kreislaufstrategien in das Systemmodell entworfen werden, welches sich mit dem PSS-Metamodell verknüpfen lässt. Insgesamt ergibt sich damit ein unterstützendes Werkzeug, um PSS unter Berücksichtigung von Kreislaufstrategien ganzheitlich modellieren zu können. In Bild 1 ist der konzeptionelle Aufbau des *PSS-CE-Metamodells* skizziert.

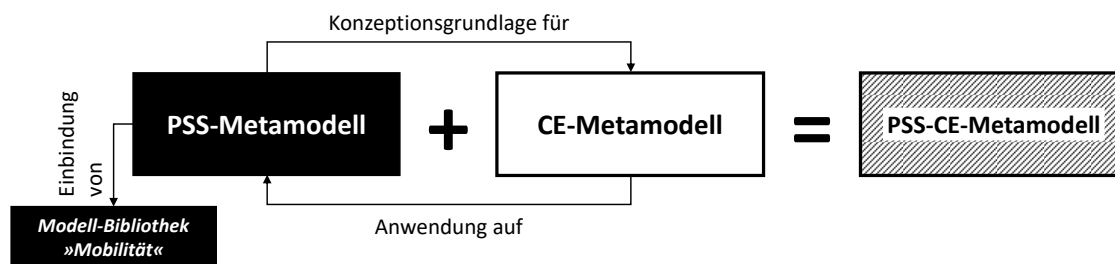


Bild 1: Konzeptioneller Aufbau des *PSS-CE-Metamodells*

Die Umsetzung der nachfolgend vorgestellten Teilbereiche des *PSS-CE-Metamodells* erfolgte unter Verwendung der Modellierungssprache *SysML v2* in einer *Eclipse* Entwicklungsumgebung (SST 2023).

3.2.1 PSS-Metamodell

Das *PSS-Metamodell* basiert in Anlehnung an Idrissi et al. (2017), Orellano et al. (2019) sowie Fakhfakh et al. (2020) auf dem allgemeingültigen Verständnis eines Systems, welches selbst aus beliebig vielen Teilsystemen bestehen kann und grundsätzlich das Subjekt zur Erfüllung von Anforderungen ist. Wie in Bild 2 dargestellt, stellt ein PSS somit eine Spezialisierung des allgemeingültigen Systems dar, das stets aus mindestens einem Produktsystem (*ProductSystem*) und einem Dienstleistungssystem (*ServiceSystem*) besteht. Das Produkt- und Dienstleistungssystem sind ebenfalls Spezialisierungen des allgemeingültigen Systems. Darüber hinaus ist analog zu Idrissi et al. (2017) sowie Maleki et al. (2018) das Betriebskonzept innerhalb des PSS berücksichtigt, welches die operativen Zusammenhänge beider Teilsysteme beschreiben soll. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden im Rahmen dieses Beitrags weitere, relevante Aspekte einer PSS-Architektur in Bezug auf Funktion, Verhalten oder System-Kontext ausgeblendet. Für mögliche Varianten zur Berücksichtigung dieser Sachverhalte wird daher auf die bereits vorgestellte Literatur verwiesen (vgl. bspw. Fakhfakh et al. 2020; Maleki et al. 2018; Orellano et al. 2019).

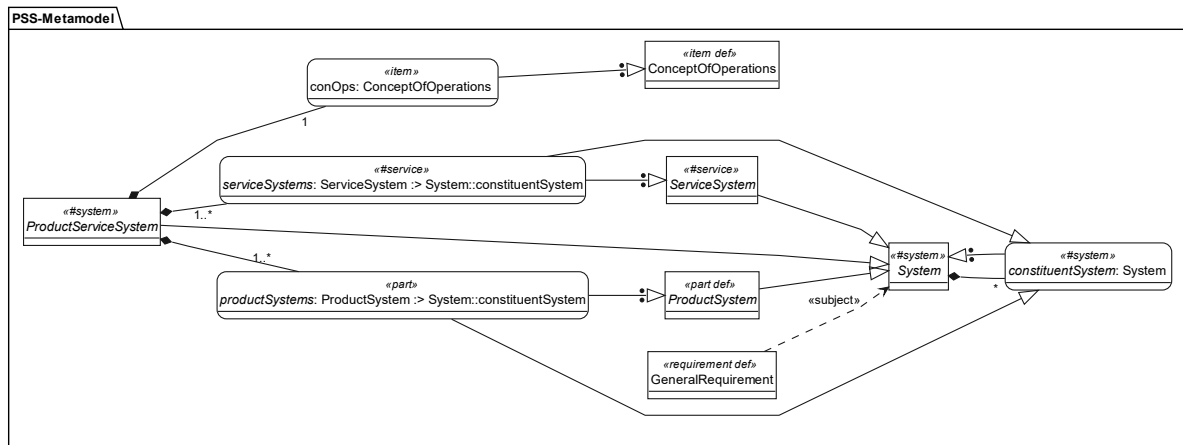


Bild 2: Grafische Darstellung des PSS-Metamodells [skalierbare Vektorgrafik]

Die ergänzende Modell-Bibliothek für domänenspezifische Spezifikationen im Mobilitätskontext baut direkt auf dem PSS-Metamodell auf. Wie in Bild 3 dargestellt, ist eine Mobilitätslösung demnach als eine Spezialisierung des PSS zu verstehen, die sich aus einem physischen Mobilitätsprodukt als Spezialisierung des *ProductSystem* sowie einem immateriellen Mobilitätsdienst als Spezialisierung des *ServiceSystem* zusammensetzt. Mit Mobilitätsprodukt ist hier im weiteren Sinne sowohl ein einzelnes Fahrzeug als auch eine Flotte aus mehreren Fahrzeugen gemeint. Als Ausprägung eines Mobilitätsdienst ist zudem die Buchung eines Fahrzeugs definiert, um die temporäre Bereitstellung eines Fahrzeugs an einen Nutzer modellieren zu können.

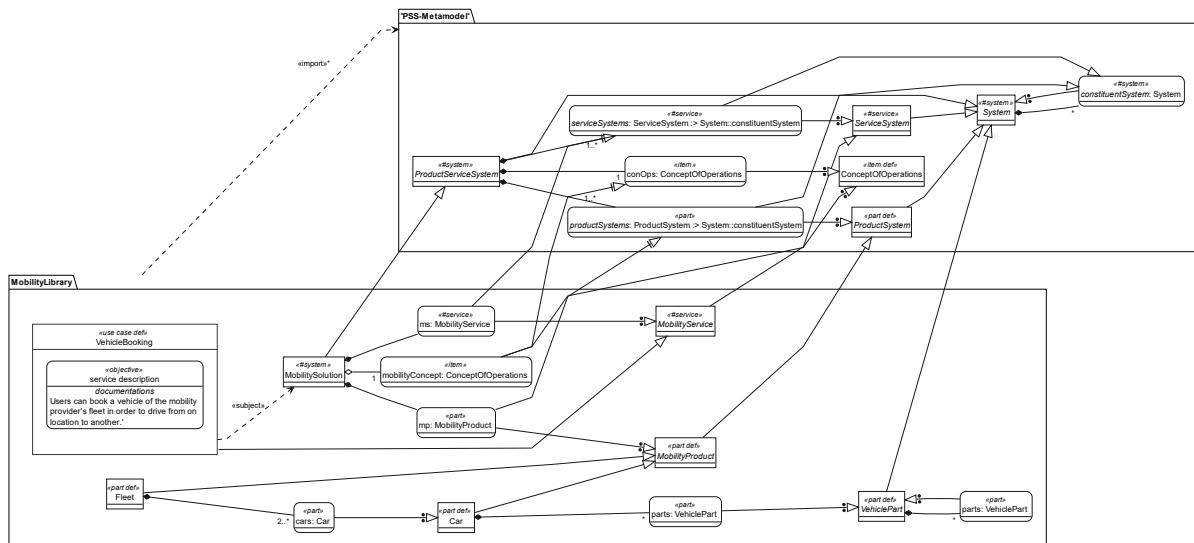


Bild 3: Mobilitätsspezifischen Modell-Bibliothek auf Basis des PSS-Metamodells [skalierbare Vektorgrafik]

3.2.2 CE-Metamodell

Zur generellen Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft wird im Rahmen des *CE-Metamodells* ein *CE Concept* definiert, welches die a priori festgelegten Kreislaufstrategien enthält. An dieser Stelle wurde auf die Kategorisierung nach Potting et al. (2017) zurückgegriffen, grundsätzlich können in der *R-Strategy* jedoch beliebige Konzepte hinterlegt werden. Da sich auf Dienstleistungen nicht alle Kreislaufstrategien abbilden lassen, bspw. Energierückgewinnung durch *recover*, wurde weiterhin eine produkt- und servicespezifische Spezialisierung des *CE Concept* hinzugefügt. Wie Bild 4 zeigt, enthält das *Service CE Concept* demnach nur diejenigen Strategien, die nach Einschätzung der Autoren umsetzbar sind. Diese subjektive Anwendung lässt sich nicht vermeiden, ist jedoch für jeden

Anwendungsfall mit wenig Aufwand adaptierbar. Die zehn Kreislaufstrategien sind importierte Spezialisierung der *R-Strategy* und anhand individueller Attribute differenzierbar. Vom *CE Concept* abhängig ergibt sich wiederum ein *CE Concern* in Bezug auf die PSS-Gestaltung. Dieser ist ferner in eine konkrete Anforderung an das System sowie ein Anliegen bezüglich der Auswirkung des *CE Concept* auf den Systemlebenszyklus aufgeteilt. Die Berücksichtigung verschiedener Lebenszyklusphasen ist aus Platzgründen nicht im Detail abgebildet, stattdessen wird auf die Veröffentlichung von Block et al. (2023) verwiesen, worin eine mögliche Ergänzung des CE-Metamodells um individuelle Lebenszykluspfade vorgeschlagen wird.

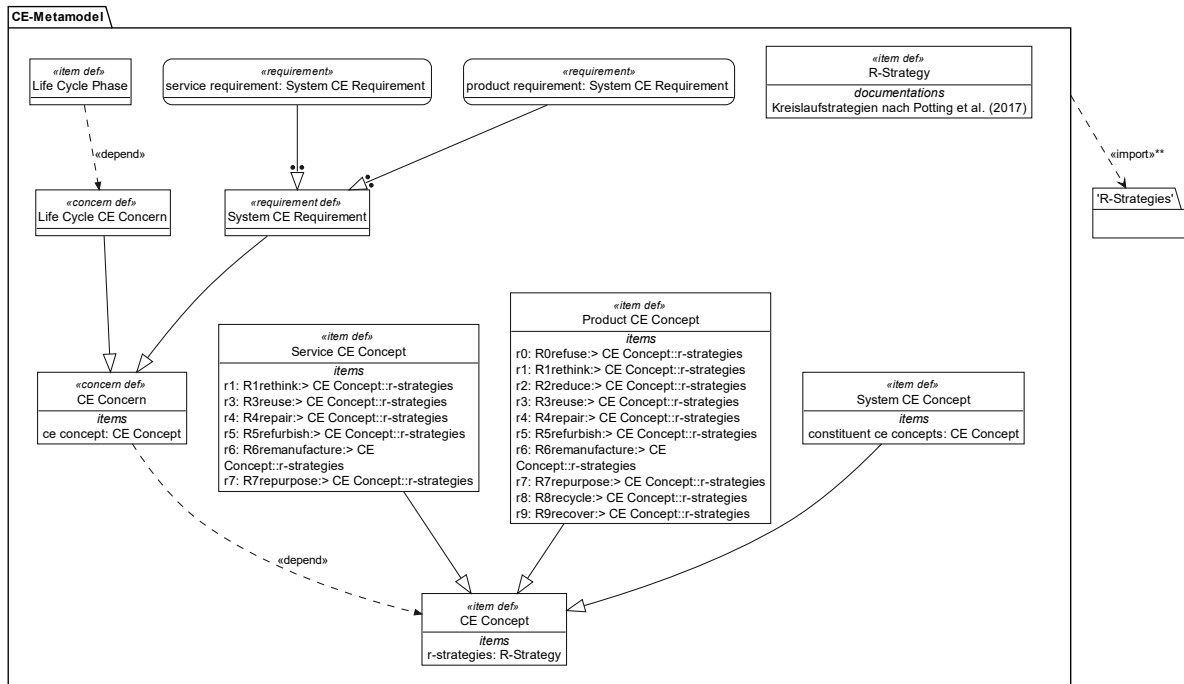


Bild 4: Grafische Darstellung des *CE-Metamodells* [skalierbare Vektorgrafik]

3.2.3 Synthese des PSS-CE-Modells

Zur Synthese der zuvor vorgestellten Metamodelle im Sinne eines *PSS-CE-Metamodells* erfolgt, wie in Bild 5 beschrieben (aus Platzgründen in textueller Notation), zunächst ein Import des *PSS-Metamodells* und *CE-Metamodells*. Auf diese Weise wird der Anforderung eines modularen Konzepts Genüge getragen, da beide Metamodelle ohne wesentlichen Mehraufwand durch Alternativen ersetzt werden können. Die Synthese selbst findet daraufhin über die Spezialisierung des PSS als *CE-PSS* und ein anschließendes Referenzieren auf das Kreislaufkonzept sowie die daraus emergierenden Anliegen statt.

```

package 'PSS-CE-Metamodell' {
    import 'PSS-Metamodel'::*;
    import 'CE-Metamodel'::*;

    #system def 'CE-PSS' specializes ProductServiceSystem {
        redefines productServiceSystems;
        redefines serviceSystems;
        redefines conOps;

        ref item 'pss ce concept' : 'System CE Concept' {
            item 'product ce concept' : 'Product CE Concept' subsets 'constituent ce concepts';
            item 'service ce concept' : 'Product CE Concept' subsets 'constituent ce concepts'; }

        ref requirement 'ce requirements' : 'System CE Requirement' [*] {
            redefines 'ce concept' = 'pss ce concept'; }
        ref concern 'life cycle concerns' : 'Life Cycle CE Concern' [*] {
            redefines 'ce concept' = 'pss ce concept'; }
    }
}
    
```

Bild 5: Textuelle Beschreibung des *PSS-CE-Metamodells* in der SysML v2-Notation

4 Anwendung und Evaluation

Die Anwendung und Evaluation des entwickelten *PSS-CE-Metamodells* als Lösungsansatz erfolgt im Rahmen des Projekts *CYCLOMETRIC*, welches das Ziel einer nachhaltigen und kreislaforientierten Fahrzeugentwicklung hat. Dabei wird am Fallbeispiel einer intelligenten Mittelkonsole ein Werkzeug zur Lebenszyklus-gerichteten Entwicklung von Fahrzeugkomponenten erarbeitet, welches Anwendern die Auswirkung einer Gestaltungsentscheidung auf ökonomische und ökologische Nachhaltigkeitsaspekte aufzeigen soll (BMBF 2021). Als Teil der kreislaforientierten Fahrzeuggestaltung wird das vorgestellte *PSS-CE-Metamodell* perspektivisch mit dem *CYCLOMETRIC*-Systemmodell verknüpft, um aus dem Nutzungskontext emergierende Anforderungen an die Mittelkonsole ableiten und bei der Planung individueller Kreislaufstrategien berücksichtigen zu können.

Wie Bild 6 zeigt, wurde für die Evaluation im Rahmen dieses Beitrags von einem Carsharing-Anwendungsfall als übergeordnete *Rethink*-Strategie zur Intensivierung der Produktnutzung ausgegangen (*satisfy intensifyUsage by carsharingService*). Die PSS-Komponenten zur Erfüllung dieser jeweiligen Anforderungen sind mit einer Erfüllungsbeziehung entsprechend verknüpft. Hierin soll die Mittelkonsole im Sinne einer *Reduce*-Strategie als selbsttragendes Leichtbauteil aus Faserverbundmaterial konzipiert werden (*satisfy reduceWeight by fibreComposite*). Zur Realisierung entsprechender Austauschmöglichkeiten von einzelnen Systemelementen als *Refurbish*-Strategie soll die Konsole zudem möglichst modular aufgebaut sein (*satisfy modularDesign by modules*). Als letzte, weitere *Reduce*-Maßnahme des Kreislauf-Konzepts soll durch den Einsatz leitfähiger Garne die direkte Bestückung berührungsempfindlicher Bedienelemente auf textile Oberflächen ermöglicht werden, um dadurch zusätzliche Bauteile einsparen zu können (*satisfy reduceParts by conductiveYarn*).

Es lässt sich festhalten, dass die Anwendung des *PSS-CE-Metamodells* grundsätzlich funktioniert und die aus den Kreislaufstrategien emergierenden Anforderungen mit den entsprechenden Komponenten des Carsharing-Systems verknüpft werden können. Die zu Beginn der Konzeption definierten Anforderungen an den Lösungsansatz (s. 3.1) sind demnach erfüllt. Das *CarsharingSystem* konnte als PSS modelliert werden und die Ableitung emergenter Anforderungen aus dem *pss ce concept* war möglich. Die Einbindung einer CE-Strategie in die PSS-Architektur ist somit als erfolgreich zu bewerten. Trotzdem es im Rahmen dieses Beispiels nicht explizit dargestellt wurde, ist weiterer Handlungsbedarf in Bezug auf das Referenzieren der Lebenszyklusphasen festzuhalten. Kreislaufwirtschaft betrifft verschiedene Phasen, die einerseits Ausgangspunkt zur Implementierung einer konkreten Kreislaufstrategie und andererseits auch direkt davon betroffen sein können, z. B. die geeignete Gestaltung eines *Refurbish*-Produkts in der Entwicklung oder die Umsetzung der eigentlichen Produktüberholung während der Nutzungsphasen. Diese Unterscheidung von Ausgangs- und Bezugspunkt sollte im Metamodell ebenfalls unterschieden werden können.

5 Fazit und Ausblick

In den vorherigen Abschnitten wurde erläutert, wie sich durch die Integration von Dienstleistungen und die Implementierung von Kreislaufstrategien eine nachhaltigkeitsorientierte Fahrzeugentwicklung unterstützen lässt. Die Analyse des Stands der Wissenschaft und Praxis zeigte, dass bereits vielversprechende Ansätze zur getrennten Berücksichtigung dieser Aspekte existieren. Ihre kombinierte Betrachtung, speziell im Mobilitätskontext, stellt jedoch eine Forschungslücke dar. Aus diesem Grund wurde das zweiteilige *PSS-CE-Metamodell* entwickelt, welches die Systemmodellierung einer Mobilitätslösung als PSS unterstützen und dabei eine Verknüpfung mit a priori festgelegten Kreislaufstrategien ermöglichen soll. Dies wird einerseits durch die Definition eines Kreislaufkonzepts auf Basis selektierter Kreislaufstrategien, hier nach Potting et al. (2017), und eine Verknüpfung daraus resultierender Anforderungen im *CE-Metamodell* (s. 3.2.2) realisiert. Andererseits ermöglicht das *PSS-Metamodell* (s. 3.2.1) unter Einbeziehung einer domänenspezifischen Modell-Bibliothek die Beschreibung einer Mobilitätslösung als PSS. Die anschließende Anwendung des Ansatzes am Carsharing-Beispiel (s. 4) zeigte die grundsätzliche Eignung des Metamodells für den festgelegten Zweck.

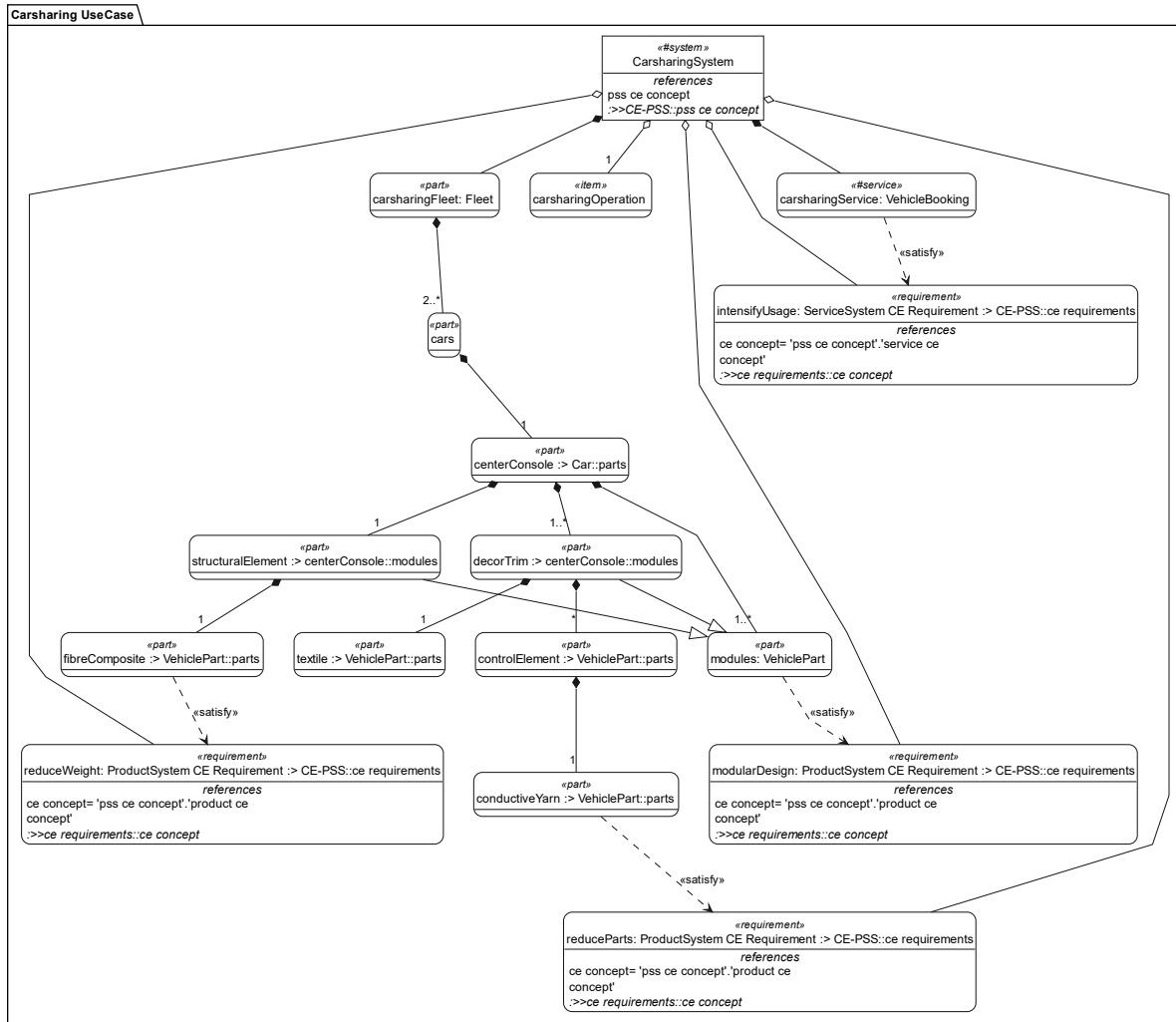


Bild 6: Anwendung des PSS-CE-Metamodells auf ein Carsharing-System [skalierbare Vektorgrafik]

Zukünftig soll das *PSS-CE-Metamodell* weiterentwickelt und mithilfe von Erkenntnissen aus der realen Anwendung optimiert werden. Im Rahmen des Projekts *CYCLOMETRIC* ist unter anderem die Erweiterung auf andere Geschäftsmodelle, wie ein Gebrauchtfahrzeug-Einsatz, geplant. Dennoch wird abschließend als Kritik und gleichzeitig weiteren Forschungsbedarf konstatiert, dass die Betrachtung stark reduziert wurde und bspw. keinerlei Berücksichtigung funktionaler Aspekte beinhaltet. Diese sollten in einer zukünftigen Version des Metamodells ergänzt werden. Gleiches gilt für die Berücksichtigung individueller Lebenszykluspfade, wie es bereits in einem früheren Beitrag vorgeschlagen wurde (Block et al. 2023). Des Weiteren erscheint es im Sinne eines ganzheitlichen MBSE-Ansatzes aus Sprache, Methodik und Werkzeug hilfreich, den Einsatz des Metamodells im Rahmen einer angeleiteten Vorgehensweise umzusetzen (Huth und Vietor 2020). Darüber hinaus könnte die direkte Einbindung dedizierter CE-Methoden, zum Beispiel eines *Life Cycle Assessment*, interessant sein (Ceschin und Gaziulusoy 2020; Diaz et al. 2021).

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung dieses Forschungsbeitrags im Rahmen des Projekts *CYCLOMETRIC* (Förderkennzeichen: 02J21E030 ff.).

Literatur

- Apostolov et al. 2018 APOSTOLOV, Hristo; FISCHER, Matthias; OLIVOTTI, Daniel; DREYER, Sonja; BREITNER, Michael; EIGNER, Martin: *Modeling Framework for Integrated, Model-based Development of Product-Service Systems*. In: *Procedia CIRP* 73 (2018), S. 9–14
- Block et al. 2020 BLOCK, Lukas; WERNER, Maximilian; HERRMANN, Florian; STEGMÜLLER, Sebastian: *Umbruch in der Fahrzeugentwicklung - Systemdenken als Schlüsselfaktor*. In: *ATZelextronik* 15 (2020), Nr. 5, S. 40–45
- Block et al. 2023 BLOCK, Lukas; WERNER, Maximilian; SPINDLER, Helge; SCHNEIDER, Benjamin: A Variability Model for Individual Life Cycle Paths in Life Cycle Engineering. In: Dröder, Klaus; Vietor, Thomas (Hrsg.): *Future Automotive Production Conference 2022*. 1st edition 2023. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, 2023, S. 1–10
- BMBF 2021 BMBF: *Modellbasierte Entscheidungsunterstützung zur proaktiven sowie lebenszyklusgerichteten Entwicklung von Fahrzeug-Komponenten (CYCLOMETRIC)*. URL <https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de/projekte/modellbasierte-entscheidungsunterstuetzung-zur-proaktiven-sowie-lebenszyklusgerichteten-entwicklung-von-fahrzeug-komponenten-cyclometric/> – Überprüfungsdatum 18.04.2023
- Boucher et al. 2016 BOUCHER, Xavier; MEDINI, Khaled; FILL, Hans-Georg: Product-Service-System Modeling Method. In: Karagiannis, Dimitris; Mayr, Heinrich C.; Mylopoulos, John (Hrsg.): *Domain-Specific Conceptual Modeling*. Cham : Springer International Publishing, 2016, S. 455–482
- Braungart und McDonough 2021 BRAUNGART, Michael; McDONOUGH, William: *Cradle to Cradle : Einfach intelligent produzieren*. 7. Auflage, ungekürzte Taschenbuchausgabe. München : Piper, 2021
- Ceschin und Gaziulusoy 2020 CESCHIN, Fabrizio; GAZIULUSOY, İdil: *Design for sustainability : A multi-level framework from products to socio-technical systems*. London, New York, NY : Routledge, 2020
- Diaz et al. 2021 DIAZ, Anna; SCHÖGGL, Josef-Peter; REYES, Tatiana; BAUMGARTNER, Rupert: *Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management*. In: *Sustainable Production and Consumption* 26 (2021), S. 1031–1045
- Eigner et al. 2019 EIGNER, Martin; DICKOPF, Thomas; APOSTOLOV, Hristo: Interdisziplinäre Design Methodik. In: Stelzer, Ralph H.; Krzywinski, Jens (Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019*. Dresden : TUDpress, 2019, S. 415–435
- Ellen MacArthur Foundation 2013 ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: *Towards the Circular Economy : Economic and business rationale for an accelerated transition*. 2013. URL <https://ellenmacarthurfoundation.org/publications> – Überprüfungsdatum 16.01.2023

- Fakhfakh et al. 2020 FAKHFAKH, S.; HEIN, A.; JANKOVIC, M.; CHAZAL, Y.: *A META-MODEL FOR PRODUCT SERVICE SYSTEMS OF SYSTEMS*. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1 (2020)*, S. 1235–1244
- Friedenthal et al. 2015 FRIEDENTHAL, Sanford; MOORE, Alan; STEINER, Rick: *A practical guide to SysML : The systems modeling language*. Third edition. Waltham, MA : Elsevier; Morgan Kaufmann, 2015
- Halstenberg et al. 2019 HALSTENBERG, Friedrich; LINDOW, Kai; STARK, Rainer: *Leveraging Circular Economy through a Methodology for Smart Service Systems Engineering*. In: *Sustainability* 11 (2019), Nr. 13, S. 3517
- Hauschild et al. 2020 HAUSCHILD, Michael; KARA, Sami; RØPKE, Inge: *Absolute sustainability: Challenges to life cycle engineering*. In: *CIRP Annals* 69 (2020), Nr. 2, S. 533–553
- Huth und Vietor 2020 HUTH, Tobias; VIETOR, Thomas: *Systems Engineering in der Produktentwicklung*. In: *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)* 51 (2020), Nr. 1, S. 125–130
- Idrissi et al. 2017 IDRISSE, Nawfal; BOUCHER, Xavier; MEDINI, Khaled: *Generic Conceptual Model to Support PSS Design Processes*. In: *Procedia CIRP* 64 (2017), S. 235–240
- Kastens und Kleine Büning 2021 KASTENS, Uwe; KLEINE BÜNING, Hans: *Modellierung : Grundlagen und formale Methoden*. 5., aktualisierte Auflage. München : Hanser, 2021
- Lawrenz et al. 2021 LAWRENZ, Sebastian; LEIDING, Benjamin; MATHISZIG, Marit; RAUSCH, Andreas; SCHINDLER, Mirco; SHARMA, Priyanka: *Implementing the Circular Economy by Tracing the Sustainable Impact*. In: *International journal of environmental research and public health* 18 (2021), Nr. 21
- Lüttenberg et al. 2018 LÜTTENBERG, Hedda; WOLF, Verena; BEVERUNGEN, Daniel: *Service (Systems) Engineering für die Produktion*, Bd. 12. In: Meyer, Kyrill; Klingner, Stephan; Zinke, Christian (Hrsg.): *Service Engineering*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 31–49
- Maleki et al. 2018 MALEKI, Elaheh; BELKADI, Farouk; BERNARD, Alain: *A Meta-model for Product-Service System based on Systems Engineering approach*. In: *Procedia CIRP* 73 (2018), S. 39–44
- Mayyas et al. 2012 MAYYAS, Ahmad; QATTAWI, Ala; OMAR, Mohammed; SHAN, Dongri: *Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), Nr. 4, S. 1845–1862
- Mboli et al. 2022 MBOLI, Julius; THAKKER, Dhavalkumar; MISHRA, Jyoti: *An Internet of Things-enabled decision support system for circular economy business model*. In: *Software: Practice and Experience* 52 (2022), Nr. 3, S. 772–787
- McAloone und Pigosso 2021 MCALOONE, Tim; PIGOSSO, Daniela: *Ökodesign*. In: Bender, Beate; Gericke, Kilian (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2021, S. 975–1021
- Meier und Uhlmann 2017 MEIER, Horst; UHLMANN, Eckart: *Industrielle Produkt-Service Systeme*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2017

- Orellano et al. 2019 ORELLANO, Martha; MEDINI, Khaled; LAMBHEY-CHECCHIN, Christine; NEUBERT, Gilles: *A system modelling approach to collaborative PSS design*. In: *Procedia CIRP* 83 (2019), S. 218–223
- Potting et al. 2017 POTTING, José; HEKKERT, Marko; WORRELL, Ernst; HANEMAAIJER, Aldert: *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. The Hague, 2017. URL <https://www.pbl.nl/en/publications/circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains> – Überprüfungsdatum 07.11.2022
- Purvis et al. 2019 PURVIS, Ben; MAO, Yong; ROBINSON, Darren: *Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins*. In: *Sustainability Science* 14 (2019), Nr. 3, S. 681–695
- Ruggieri et al. 2016 RUGGIERI, Alessandro; BRACCINI, Alessio; POPONI, Stefano; MOSCONI, Enrico: *A Meta-Model of Inter-Organisational Cooperation for the Transition to a Circular Economy*. In: *Sustainability* 8 (2016), Nr. 11, S. 1153
- Schöggel et al. 2017 SCHÖGGL, Josef-Peter; BAUMGARTNER, Rupert; HOFER, Dietmar: *Improving sustainability performance in early phases of product design: A checklist for sustainable product development tested in the automotive industry*. In: *Journal of Cleaner Production* 140 (2017), S. 1602–1617
- Schulze 2016 SCHULZE, Sven-Olaf: *Systems Engineering*. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2016, S. 153–184
- Spath und Dangelmaier 2016 SPATH, Dieter; DANGELMAIER, Manfred: *Produktentwicklung Quo Vadis*. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2016, S. 3–7
- SST 2023 SST: *GitHub - Systems-Modeling/SysML-v2-Release : The latest monthly incremental release of SysML v2*. OMG System Modeling Language™ (SysML®) v2 Release. URL <https://github.com/Systems-Modeling/SysML-v2-Release>. – Überprüfungsdatum 17.01.2023
- Tukker 2004 TUKKER, Arnold: *Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet*. In: *Business Strategy and the Environment* 13 (2004), Nr. 4, S. 246–260
- Weilkiens 2014 WEILKIENS, Tim: *Systems engineering mit SysML/UML : Anforderungen, Analyse, Architektur*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Heidelberg : dpunkt.verlag, 2014

Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials von Aluminiumschaum-Sandwich

Method for Evaluating the Application Potential of Aluminum Foam Sandwich

Patrick Hommel¹, Daniel Roth¹, Hansgeorg Binz¹, Matthias Kreimeyer¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

patrick.hommel@iktd.uni-stuttgart.de

daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de

matthias.kreimeyer@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch):

Aluminiumschaum-Sandwich (AFS) ist aufgrund verschiedener Vorteile wie einer hohen Biegesteifigkeit bei geringer Dichte sowie guten mechanischen Energieabsorptionseigenschaften und einer hohen Recyclingfähigkeit eine innovative Materialkombination für Leichtbaustrukturen. In aktuellen Werkstoffauswahlverfahren wird AFS jedoch meist gar nicht erst berücksichtigt, da entweder aus Gewohnheit und wenig Risikobereitschaft ein bereits etablierter Werkstoff eingesetzt wird oder weil einige Werkstoffeigenschaften von AFS noch nicht ausreichend erforscht sind. Bewährte Auswahlmethoden können aufgrund unzureichend bewertbarer Werkstoffparameter für AFS nicht vollumfänglich eingesetzt werden. Infolgedessen wird AFS selten in industriellen Anwendungen eingesetzt und das Anwendungspotenzial bleibt ungenutzt. In diesem Beitrag wird eine Methode entwickelt, die das Einsatzpotenzial von AFS bewertet. Ein zweistufiges Verfahren ermöglicht dabei eine schnelle Bewertung der grundsätzlichen Eignung eines AFS-Einsatzes sowie im zweiten Schritt die Beurteilung, ob sich ein Werkstoffwechsel lohnt, da AFS gegenüber dem Referenzwerkstoff für die Anwendung einen größeren Nutzen vorweisen kann.

Keywords (deutsch):

Aluminiumschaum-Sandwich, Bewertungsmethode, Materialauswahl, Design for X (DfX), Leichtbau

Abstract (english):

Aluminum foam sandwich (AFS) is an innovative material for lightweight structures due to various advantages such as a high bending stiffness at a low density as well as good mechanical energy absorption properties and a high recyclability. However, in current material selection processes, AFS is usually not even considered, either because an already established material is used due to familiarity and little risk tolerance, or because some material properties of AFS have not yet been sufficiently researched. Proven selection methods cannot be fully applied for AFS due to insufficiently evaluable material parameters. As a result, AFS is rarely used in industrial applications and its application potential remains untapped. In this paper, a method is developed to evaluate the application potential of AFS. A two-step procedure allows a quick evaluation of the basic suitability of an AFS application. In the second step, an assessment is made whether a material change is profitable because AFS can demonstrate a greater benefit for the application compared to the reference material.

Keywords (english):

Aluminum foam sandwich, Evaluation method, Material selection, Design for X (DfX), Lightweight design

1 Einführung und Motivation

Leichtbauweisen und -strategien werden angewendet, um Bauteilmassen zu reduzieren und Ressourcen zu schonen. Je geringer die Masse einer bewegten Komponente ist, desto weniger Energie wird für die Bewegung benötigt weshalb neben Energiekosten auch Emissionen sinken (Friedrich 2013; Krause et al. 2018). Die Umsetzung von vorteilhaften Leichtbaukonstruktionen ist eine große Herausforderung, bei der verschiedene Werkstoffe und Konstruktionsmethoden von relevanter Bedeutung sind. Eine innovative Materialkombination für Leichtbaustrukturen ist Aluminiumschaum-Sandwich (AFS), welches in den letzten Jahren aufgrund der stetig steigenden Qualität weiter an Bedeutung gewonnen hat (Banhart et al. 2019). Wie in Bild 1 dargestellt, besteht AFS aus einem Kern aus Aluminiumschaum, der typischerweise von zwei Deckschichten aus Aluminium umgeben ist. Der pulvermetallurgische Herstellungsprozess, bei dem der Schaum durch Erhitzen des Rohmaterials entsteht, erzeugt eine metallische Verbindung zwischen den Deckschichten und dem Schaumkern, die ohne Klebstoffe auskommt, sodass AFS eine hohe Recyclingqualität aufweist (Seeliger 2011).



Bild 1: Aufbau eines Aluminiumschaum-Sandwichs

Weitere Vorteile von AFS sind unter anderem eine hohe Biegesteifigkeit bei geringer Dichte, nützliche mechanische Energieabsorptionsfähigkeiten sowie eine gute Feuerbeständigkeit, sodass sich ein breites Gebiet von Anwendungsmöglichkeiten für das Material ergibt (Banhart et al. 2019), welches von Hommel et al. (2021) übersichtlich zusammengefasst wurde. Besonders geeignete Anwendungen von AFS sind beispielsweise Batteriekästen für Elektrofahrzeuge oder andere crash-relevante Bauteile (Banhart et al. 2019). Weitere Einsätze existieren im Maschinen- und Anlagenbau als bewegte Komponenten sowie als tragende Strukturen innerhalb von Werkzeugmaschinen (Hipke et al. 2007; Hohlfeld et al. 2018).

2 Problemstellung und Zielsetzung

Trotz zahlreicher Vorteile für verschiedene Anwendungsbereiche ist der reale Einsatz von AFS in Serienanwendungen relativ gering (Banhart et al. 2019). In einer Studie von Hommel et al. (2020) konnten verschiedene Hemmnisse für den Einsatz von AFS identifiziert werden, die diese Diskrepanz begründen. Beispielsweise fehlen AFS-spezifische Konstruktionskenntnisse oder Referenzanwendungen mit Hinweisen zu vorteilhaften Einsätzen von AFS, sodass Konstrukteure häufig über die Möglichkeiten, AFS auf vorteilhafte Weise zu nutzen, nicht ausreichend Bescheid wissen. Eine weitere Erkenntnis dieser Untersuchung ist, dass AFS in Werkstoffauswahlprozessen in der Industrie oftmals nicht berücksichtigt wird und gar nicht erst in die Bewertung miteingeschlossen wird. Konstrukteure können häufig nicht beurteilen, ob der Einsatz von AFS tatsächlich möglich und gewinnbringend ist (Hommel et al. 2020) und greifen daher auf vertraute und bereits bewährte Werkstoffe zurück, um das Produktrisiko zu minimieren (Reuter 2021, S. IX). Wird AFS jedoch bereits vor der Werkstoffauswahl ausgeschlossen und ein anderer Werkstoff ausgewählt, ohne dass eine Bewertung der Eignung von AFS vorgenommen wird, bleibt das Potenzial von AFS möglicherweise ungenutzt und Innovationen werden gehemmt.

Bewährte Vorgehensweisen der systematischen Werkstoffauswahl wie beispielsweise nach Ashby (2016) sind unter anderem aufgrund nicht ausreichend bewertbarer Charakteristiken von Aluminiumschaum-Sandwich nicht vollumfänglich anwendbar. Auch bei ersten Ansätzen von Bewertungsvor-

gehen speziell für AFS (Hommel et al. 2022) existiert noch Verbesserungspotenzial. Somit sind derzeit keine geeigneten Bewertungsmethoden – in Bezug auf AFS – für unerfahrene Konstrukteure verfügbar, sodass das Einsatzpotenzial von AFS meist nur von Experten bewertet werden kann. Das Ziel des Beitrags ist daher die Entwicklung einer Methode, mit der auch unerfahrene Konstrukteure bei der Bewertung des Einsatzpotenzials von AFS unterstützt werden, um zu beurteilen, ob der Einsatz des Materials für eine bestimmte Anwendung gewinnbringend ist. Die zugehörige Forschungsfrage lautet:

Wie kann eine Methode aussehen, die Konstrukteure bei der Entscheidung unterstützt, ob der Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich (anstelle eines Referenzmaterials) in einer Anwendung geeignet ist?

3 Vorgehensweise und Aufbau des Beitrags

Nachdem in den ersten beiden Kapiteln die aktuelle Situation und die Zielsetzung dieses Beitrags erläutert wurden, folgt im nächsten Kapitel ein Überblick über den Stand der Technik. Dabei werden neben den Einsatzgründen für AFS, klassische Auswahl- und Bewertungsmethoden der Produktentwicklung sowie die systematische Werkstoffauswahl und erste Ansätze einer Bewertungsmethode für AFS vorgestellt. Aufgrund verschiedener Herausforderungen sind bisherige Methoden für die Bewertung des Einsatzpotenzials von AFS nicht ausreichend geeignet, weshalb in Kapitel 5 Anforderungen an die zu entwickelnde Methode definiert werden. Darauf aufbauend folgt in Kapitel 6 das Vorgehen zur Entwicklung der Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials, welche anschließend näher vorgestellt wird. Anhand einer initialen Evaluation werden die Anwendbarkeit und Nützlichkeit der Methode hinterfragt (Kapitel 7). In Kapitel 8 werden schließlich die Erkenntnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick über weitere notwendige Forschungsaktivitäten gegeben.

4 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst die Gründe und Motivatoren für den Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich bei verschiedenen Anwendungen vorgestellt. Anschließend wird ein kurzer Überblick über gängige Auswahl- und Bewertungsmethoden in der Produktentwicklung gegeben. In Kapitel 4.3 wird die Methodik der systematischen Werkstoffauswahl nach Ashby (2016) erläutert, welche eine der bekanntesten Vorgehensweisen ist, um auf Basis von geforderten Werkstoffkennwerten einen für eine Anwendung geeigneten Werkstoff auszuwählen. Da diese Vorgehensweise bei der Verwendung von Aluminiumschaum-Sandwich zu verschiedenen Herausforderungen führt, werden abschließend erste alternative Ansätze für die Auswahl von AFS präsentiert.

4.1 Motivatoren für den Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich

In der Literatur werden verschiedene positive Eigenschaften von AFS genannt, welche den Einsatz des Materials lohnenswert machen, wie beispielsweise die geringe Dichte (Hipke 2002, S. 34; Sviridov 2011, S. 31 f.), die hohe mechanische Energieabsorptionsfähigkeit (Banhart und Seeliger 2008, S. 794; Hipke 2002, S. 47 ff.; Hipke et al. 2007, S. 55; Lange 2020, S. 19 ff.) oder die hohe Recyclingfähigkeit (Banhart und Seeliger 2008, S. 795; Seeliger 2011, S. 16; Banhart et al. 2019, S. 63). Um ein breites Bild dieser Einsatzgründe zu erhalten und die wichtigsten Gründe für einen Einsatz von AFS zu ermitteln, wurde von Hommel et al. (2021) eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Das Ergebnis ist eine Liste von charakteristischen Eigenschaften, die nachfolgend nach Häufigkeit der Nennungen in der Literatur in absteigender Reihenfolge sortiert sind: hohe mechanische Energieabsorptionsfähigkeit, Massenreduzierung durch geringe Dichte, hohe Festigkeitseigenschaften, gute Schalldämmung, gute Wärmeübertragung, gute Schwingungsdämpfung, Nichtentflammbarkeit und Feuer-/ Hitzebeständigkeit, Abschirmung von elektromagnetischen Wellen und guter Strahlenschutz, hohe Recyclingfähigkeit, gute Korrosionsbeständigkeit, Kostenreduzierung durch wenig benötigte Einzelteile, Abstimmung der Schwingungsfrequenz,

ansprechendes optisches Design und gute Möglichkeiten der Funktionsintegration (Hommel et al. 2021, S. 937).

4.2 Methoden zur Auswahl und Bewertung von Konzepten

In der Produktentwicklung kommen verschiedene Methoden zum Einsatz, welche in der Fachliteratur ausführlich beschrieben werden (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017; Gausemaier et al. 2001; Lindemann 2009; Pahl et al. 2007). Im Rahmen dieses Beitrags geht es um den Prozess der Entscheidungsfindung eines geeigneten Materialeinsatzes, welcher von Auswahl- und Bewertungsmethoden unterstützt wird (Wartzack 2021, S. 307). Diese Methoden sind anwendbar, um aus einer Vielzahl an Ideen die geeignetsten Lösungen zu ermitteln (VDI 2221 1993). Dabei werden im ersten Schritt (Auswählen) prinzipiell geeignete Lösungen von absolut ungeeigneten Lösungen getrennt, um diese zu verwerfen. Im zweiten Schritt (Bewerten) werden schließlich die als verfolgungswürdig erkannten Lösungen weiter konkretisiert und bewertet (Pahl et al. 2007, S. 162). In vielen Fällen ist eine Auswahlliste, bei der die Varianten entsprechend ihrer Erfüllung verschiedener binärer Kriterien beurteilt werden (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017, S. 644), als Auswahlmethode zweckmäßig (Pahl et al. 2007, S. 162 ff.).

Bewertungsverfahren unterstützen die Entscheidungsfindung, wenn aus verschiedenen Varianten eine ausgewählt werden soll (Wartzack 2021, S. 308). Eine Bewertung kann nur dann zu einer Entscheidung führen, wenn mindestens zwei Lösungsvarianten zur Verfügung stehen, die verwendeten Bewertungskriterien zielbezogen definiert sind und die Möglichkeit existiert, dass die Varianten nach dem Erfüllungsgrad der Kriterien beurteilt werden können (Haberfellner et al. 2019). Um die Eignung einer Lösung bewerten zu können, sind somit einheitliche Bewertungskriterien zu definieren, die mit vergleichbaren Werten versehen werden können, sodass auf Basis der Summenbildung dann ein Vergleich der Wertigkeiten erfolgen kann (Breiing und Knosala 1997). Die Bewertung kann dabei einen Wert oder Stärken und Schwächen einer Lösung angeben, sodass Bewertungsmethoden auch qualitative Eigenschaften beurteilen können, was besonders in den frühen Phasen notwendig ist, da aufgrund des noch nicht ausgeprägten Konzeptentwurfs oftmals eine genaue Bewertung verschiedener Kriterien schwierig ist (Wartzack 2021, S. 309 f.).

Für die Bewertung von Konzepten stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, wie beispielsweise eine grundlegende Bewertung mit Hilfe von Stärken-Schwächen-Analysen, paarweisen Vergleichen oder einfachen Punktbewertungssystemen (Ehrlenspiel und Meerkamm 2007; Pahl et al. 2007). Sind aufwändigere Bewertungsverfahren notwendig, können gewichtete Punktesysteme, die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225-3 (1998) oder Kesselring (1951) sowie die Nutzwertanalyse (Zangemeister 2014) eingesetzt werden.

4.3 Systematische Werkstoffauswahl

Die Gründe für einen Wechsel eines verwendeten Werkstoffs können unterschiedlich sein, wie beispielsweise eine geplante Erhöhung der technischen Leistungsfähigkeit, Senkung von Herstellungskosten oder auch Änderungen der gesetzlichen Anforderungen sowie sozialen Aspekten (Reuter 2021, S. 5 ff.). In der Literatur existieren viele unterschiedliche Verfahren zur systematischen Auswahl eines geeigneten Werkstoffs (Kaiser 2017), welche sich am allgemeinen Problemlösungszyklus nach Haberfellner et al. (2019) orientieren.

Ein etabliertes Verfahren zur Auswahl eines geeigneten Werkstoffs ist die systematische Werkstoffauswahl nach Ashby (2016). Hierbei werden zunächst alle Werkstoffe betrachtet, um kein Material voreilig auszuschließen. Nachdem die relevanten Werkstoffparameter aus den Anforderungen abgeleitet und mit den Eigenschaften der Werkstoffe verglichen werden, scheiden die Werkstoffe aus, die den Anforderungen nicht entsprechen. Die verbleibenden Werkstoffe werden entsprechend der zu optimierenden Parameter (z. B. Kosten- und Gewichtsreduktion) und ggf. unterstützender Informationen in eine Rangfolge gebracht und die endgültige Werkstoffauswahl kann getroffen werden. (Ashby 2016)

Das beschriebene Verfahren ist jedoch auf einzelne Vollmaterialien ausgerichtet, weshalb der Vergleich mit Sandwichverbunden zusätzliche Schritte erfordert. Nach Ashby (2016) kann ein Sandwichverbund als ein „Werkstoff“ angesehen werden, welcher die Eigenschaften der einzelnen Komponenten miteinander kombiniert – nach unterschiedlichen Mischungsregeln, abhängig von der Belastungsart und -richtung. Aufgrund nicht ausreichend bewertbarer Charakteristiken sowie qualitativer Eigenschaften von Aluminiumschaum-Sandwich ist die Vorgehensweise dieser Werkstoffauswahl jedoch nicht vollumfänglich anwendbar, da das Vorgehen nach Ashby hauptsächlich exakte Werkstoffkennwerte als Anforderungen erfordert. Darüber hinaus ist die manuelle Anwendung zeitaufwendig, während die computergestützten Programme kostenintensiv sind.

4.4 Bisherige Ansätze einer Auswahlmethode mit Berücksichtigung von AFS

In Hommel et al. (2022) werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt, die eine Auswahl von AFS unterstützen sollen. Im ersten Ansatz wird AFS in die bekannten Werkstoffdiagramme von Ashby (2016) integriert. Dies ist jedoch nur bei einzelnen Diagrammen, d. h. einzelnen Werkstoffkennwerten, möglich, da manche Kennwerte herstellungsbedingt und abhängig von den Schichtdicken starken Schwankungen unterliegen und bisher nicht ausreichend untersucht wurden oder weil andere Kennwerte nicht angegeben werden können. Bei den bekannten und verlässlich angebbaren Eigenschaften ist die Verwendung dieser Diagramme hilfreich bei der Werkstoffauswahl. Aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit ist eine vollumfängliche Anwendung jedoch derzeit nicht zufriedenstellend möglich und für eine grundsätzliche Eignungsprüfung nicht geeignet.

Die Grundidee des zweiten Ansatzes besteht darin, die Nutzwertanalyse sowie einfache Punktbewertungssysteme anzuwenden. Hierbei sind zu vergleichende Werkstoffe auf Basis von verschiedenen qualitativen sowie quantitativen Kriterien zu bewerten, indem die Kriterien mit Punkten (0-4) versehen werden, sodass eine Wertigkeit gebildet werden kann. Bei der Punktevergabe wird auf Werkstoffdatenblätter und Konstruktionserfahrungen zurückgegriffen. Das Verfahren kann zum Vergleich verschiedener Werkstoffe eingesetzt werden sowie für eine grundsätzliche Eignungsprüfung, die gleichermaßen anzuwenden ist, jedoch anhand eines vorzugebenden Schwellwerts (Erfüllungsgrad) dann über eine prinzipielle Eignung entscheidet. Ein Vorteil dieser Variante liegt in der eher qualitativen Bewertung, sodass die Herausforderungen des ersten beschriebenen Ansatz, der von einer quantitativen Spezifikation der Eigenschaften mit exakten Werten abhängig ist, umgangen werden. Zugleich liegt die Herausforderung jedoch in der Vergabe der Punktzahlen, welche teilweise nur geschätzt werden und subjektiv sind, sodass dieses Vorgehen aufgrund der Unsicherheiten fehleranfällig ist. Eine grundsätzliche Anwendbarkeit ist zwar gegeben, für eine schnelle und verlässliche Überprüfung der prinzipiellen Eignung des Einsatzes von AFS sind jedoch noch Anpassungen notwendig.

5 Anforderungen an die Bewertungsmethode

Damit die zu entwickelnde Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials von AFS eine Unterstützung für Konstrukteure darstellt, sind wesentliche Anforderungen zu identifizieren, die erfüllt werden müssen. Keller und Binz (2009) haben hierfür eine Übersicht über allgemeine Anforderungen an Konstruktionsmethoden entwickelt und diese in acht Gruppen eingeteilt (Überprüfbarkeit, praktische Relevanz und Konkurrenzfähigkeit, wissenschaftliche Sinnhaftigkeit, Verständlichkeit, Nützlichkeit, Problemspezifität, Strukturiertheit und Kompatibilität sowie Flexibilität). Im Rahmen von verschiedenen durchgeführten Befragungen der Autoren (persönliche Gespräche, Umfragen) mit insgesamt über 50 Konstrukteuren wurden einzelne Anforderungen an die AFS-Bewertungsmethode ermittelt, die ergänzend zu den Kriterien nach Keller und Binz (2009) zu beachten sind. So ist eine Bewertungsmethode gewünscht, die schnell und einfach zu einer verlässlichen Aussage führt. Bei der Werkstoffauswahl ist es besonders wichtig, dass die Entscheidungen nachvollziehbar und transparent getroffen werden, damit die Werkstoffe nicht

aufgrund persönlicher Meinungen oder aus Gewohnheit getroffen werden und somit möglicherweise Innovationen gehemmt werden (Reuter 2021, S. IX). Nachfolgend sind die am häufigsten genannten Anforderungen an die Bewertungsmethode des Einsatzpotenzials von AFS zusammengefasst.

- Schnell zu einer ersten Aussage kommen (Effizienz)
- Eindeutige Handlungsempfehlungen (Effektivität)
- Einfach und intuitiv anzuwendende Methode
- Nachvollziehbare/transparente und wiederholbare Entscheidungsfindung
- Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen
- Bereits in frühen Phasen anwendbar, auch wenn dort Konzepte eher unkonkret sind
- Sowohl als prinzipielle Eignungsprüfung als auch zum Werkstoffvergleich mit Referenzwerkstoff einsetzbar (Wahlmöglichkeit)

Neben diesen Anforderungen sind auch die materialspezifischen Besonderheiten von AFS zu berücksichtigen, weshalb bisherige Methoden nicht ausreichend geeignet sind. Die Herausforderungen bei der Beurteilung der Eignung von AFS liegen unter anderem in der begrenzten Datenverfügbarkeit der Werkstoffkennwerte, weshalb bisherige Methoden für AFS unzureichend geeignet sind. Die Vorgehensweise nach Ashby (2016) erfordert bereits zu Beginn der Bewertung eine genaue Kenntnis über eine Vielzahl von Werkstoffkennwerten. Diese Vorgehensweise beruht auf quantitativen Werten und weniger auf qualitativen Eigenschaften, welche für AFS jedoch vermehrt vorhanden sind. Der Ansatz von Hommel et al. (2022) ist prinzipiell geeignet und kann vorteilhaft angewendet werden. Nachteilig ist hier jedoch, dass der Ansatz qualitative und quantitative Eigenschaften zusammen betrachtet und jeweils mit Punkten von 0 bis 4 bewertet. Dies reduziert die Genauigkeit der bekannten Werkstoffkennwerte von AFS und schätzt die unbekannt Kennwerte nur grob ab. Die Vergabe der Punktzahlen bei qualitativen Kriterien ist aufgrund der subjektiven Meinung zudem fehleranfällig. Darüber hinaus ist keine verwendbare Anwendung für eine schnelle prinzipielle Eignungsprüfung ohne Vergleich mit anderen Werkstoffen möglich.

6 Entwicklung und Vorstellung der AFS-Bewertungsmethode

Um den richtigen Werkstoff für eine Anwendung auswählen zu können, müssen die Einsatzbedingungen analysiert und die Aufgaben des Bauteils in einem Anforderungsprofil erfasst werden. Zum einen sind die funktionalen Anforderungen zu erfüllen, zum anderen muss der Werkstoff auch für die entsprechenden Fertigungs- und Fügeverfahren geeignet sein (Ashby 2016). Die Wahl der Bewertungskriterien wird im folgenden Unterkapitel erläutert. In Kapitel 6.2 werden die entwickelte Bewertungsmethode für das Einsatzpotenzial von AFS vorgestellt und die Vorteile gegenüber bisherigen Methoden sowie Ansätzen erläutert.

6.1 Wahl der Bewertungskriterien

Auf Basis einer Konstruktionsaufgabe bzw. der betrachteten Anwendung kann ein Anforderungsprofil abgeleitet werden, während aus einem Werkstoff ein Eigenschaftsprofil abgeleitet wird. Ziel bei der Werkstoffauswahl ist, eine möglichst große Überschneidung dieser Profile im Hinblick auf den gesamten Produktlebenszyklus zu erreichen (Reuter 2021, S. 58). Eine entscheidende Grundlage einer systematischen Werkstoffauswahl sind somit Anforderungen, die an einen Werkstoff gestellt werden (Reuter 2021, S. 44). Bewertungskriterien sollten so ausgewählt werden, dass die Werkstoffe auf einem vergleichbaren Aussageniveau bewertet werden können. Die Kriterien können im Allgemeinen quantitativ oder qualitativ beschrieben werden, wobei eine möglichst quantitative Bewertung vorzuziehen ist, um die Eigenschaften einfacher miteinander vergleichen zu können. Eine qualitative Bewertung gibt vielmehr eine grobe Einteilung an und wird verwendet, wenn Werte unbekannt sind oder Eigenschaften nicht mit Zahlenwerten beschreibbar sind (z. B. sehr gut oder schlecht schweißbar, ästhetische Wahrnehmung, Beständigkeit). Kriterien sollen einheitlich und aufgrund der Zuordnung zu Wertvorstellungen stets positiv formuliert werden (Pahl et al. 2007, S. 167).

Eine allgemeine Übersicht an Werkstoffeigenschaften, die für die Werkstoffauswahl entscheidend sein können, hat Reuter (2021) zusammengefasst. Die Kriterien sind dabei in fünf Gruppen eingeteilt: Physikalisch, Mechanisch, Technologisch, Gebrauch, Wirtschaftlichkeit (Reuter 2021, S. 56). Mögliche spezifische Kriterien für eine Werkstoffauswahl mit Verwendung von AFS sind unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1 genannten Motivatoren für den Einsatz von AFS (vorteilhafte Eigenschaften) sowie ebenfalls auch von recherchierten typischen Nachteilen von AFS (bspw. inhomogene Materialstruktur, notwendige Vorbereitungen oder Zusatzelemente für lösbare Verbindungen) in Tabelle 1 zusammengefasst. Bei der Bewertung ist es wichtig, dass alle Phasen des Produktlebenszyklus betrachtet werden, sodass neben mechanischen Eigenschaften auch Themen wie Recyclbarkeit oder Reparaturfähigkeit berücksichtigt werden. Auch Möglichkeiten, dass durch die Verwendung von AFS Schwingungen gedämpft werden können, wodurch wiederum eventuell weniger Wartungszyklen notwendig sind als bei anderen Werkstoffen, sollten beachtet werden.

Tabelle 1: Mögliche qualitative Kriterien für die Grobbewertung des Einsatzes von AFS (siehe auch Bild 2, B1)

Geringe Dichte	Hohe Temperaturbeständigkeit	Hohe Marktverfügbarkeit
Hohe mechanische Energieabsorptionsfähigkeit	Gute Schall- oder Schwingungsdämmung	Lange Lebensdauer
Hohe Festigkeitseigenschaften	Gute Wärmeübertragung	Hohe Recyclingfähigkeit
Gute Bearbeitbarkeit mit geringem Aufwand	Guter Strahlenschutz und Abschirmung elektromagn. Wellen	Gute Korrosionsbeständigkeit
Einsatz lösbarer Verbindungselemente ohne Vorkehrungen	Homogene Materialstruktur	Verlässliche und gleichbleibende Materialkennwerte vorhanden

Um die für einen Anwendungsfall geeigneten Kriterien zu erhalten, können auch Fragenkataloge zur Identifizierung von Werkstoffanforderungen verwendet werden, wie beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt ist. Abschließend kann daraus dann eine Werkstoffanforderungsliste erstellt werden, die eine jeweilige Grenze oder einen Zielwert für die Kennwerte angibt (bspw. $R_e > 600 \text{ N/mm}^2$ oder minimale Dichte anstreben), welche als Bewertungskriterium dienen kann.

Tabelle 2: Auszug eines Fragenkatalogs mit resultierenden Werkstoffkennwerten für eine quantitative Bewertung (in Anlehnung an Reuter 2021, S. 60 f.)

<i>Gefordert? (Ja, nein, vielleicht)</i>	<i>Werkstoffanforderung</i>	<i>Zugehörige Werkstoffkennwerte (als Grenzwert oder Ziel formulieren)</i>
	Ist eine hohe Festigkeit bei kleinem Bauteilvolumen gefordert?	Streckgrenze/Volumen oder Zugfestigkeit/Volumen
	Ist eine hohe Festigkeit bei niedrigem Gewicht gefordert?	Streckgrenze/Dichte oder Zugfestigkeit/Dichte
	Ist eine hohe Festigkeit bei erhöhten Temperaturen gefordert?	Festigkeitsverlust/Temperaturdifferenz; Warmfestigkeit
	Ist eine langfristige Formbeständigkeit bei erhöhter Temperatur gefordert?	Kriechfestigkeit bei Betriebstemperatur

6.2 Vorgehensweise der entwickelten AFS-Bewertungsmethode

Analog zum Auswählen und Bewertung nach Pahl et al. (2007) wurde der Ansatz von Hommel et al. (2022) dahingehend optimiert, dass eine Vorauswahl vorgeschaltet wird und die Methode in eine Grob- und Feinbewertung unterteilt wird. Dies ermöglicht eine schnelle Vorauswahl anhand von qualitativen Kriterien, bevor eine nachgelagerte ausführlichere Bewertung anhand von verlässlichen quantitativen Kennwerten erfolgt. Als geeignete Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials von AFS hat sich daher der in Bild 2 schematisch dargestellte zweistufige Prozess herausgestellt, welcher sowohl analog als auch digital umgesetzt werden kann.

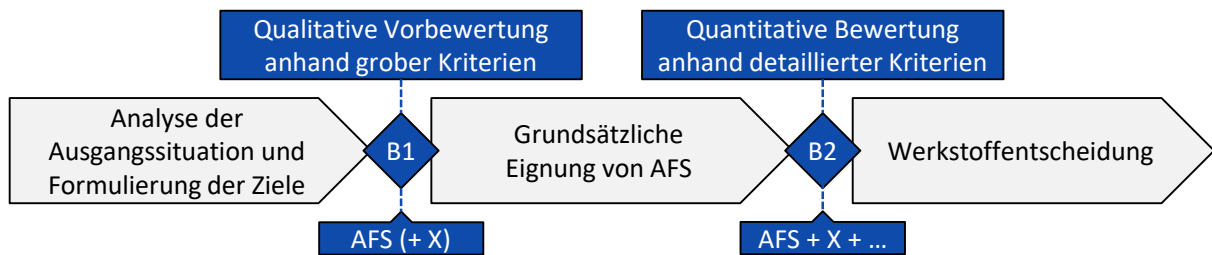


Bild 2: Schematischer Ablauf des zweistufigen Bewertungsprozesses für AFS

In einer ersten Bewertungsstufe (Bild 2, B1) soll mithilfe einer Grobbewertung die prinzipielle Eignung des Einsatzes von AFS geprüft werden, ohne dass zunächst weitere Werkstoffe parallel betrachtet werden müssen (optional möglich). Dabei wird die Eignung ähnlich einer Auswahlliste (siehe Pahl et al. 2007, S. 163) mit Plus-Minus-Entscheidungen bewertet, um schnell zu einer ersten Aussage zu gelangen. Ein entsprechendes beispielhaft ausgefülltes Formblatt zur Vorauswahl ist in Bild 3 zu sehen. Bei der Anwendung wählt der Nutzer zunächst aus einer Liste an verschiedenen Anforderungen (siehe Tabelle 1) diejenigen aus, die im vorliegenden Anwendungsfall zwingend erfüllt sein müssen. Nur mit diesen K.O.-Kriterien wird die Tabelle dann befüllt. Dabei können sowohl qualitative Kriterien (bspw. gute Korrosionsbeständigkeit) als auch geforderte Grenzwerte von Werkstoffkennwerten die für AFS vorliegen (bspw. Dichte $< 5 \text{ g/cm}^3$) angegeben werden. Die Gesamtzahl der Bewertungskriterien sollte nicht zu hoch sein. Für Entscheidungen in der Konzeptphase werden 8 bis 15 Kriterien empfohlen (Pahl et al. 2007, S. 269), was auch hier als eine sinnvolle Größenordnung für die Vorauswahl erscheint. Die Bewertungstabelle (Bild 3) wird auf Basis einer hinterlegten und mit Anforderungen und klassischen Werkstoffgruppen vorausgefüllten Datentabelle erzeugt. Darüber hinaus hat der Nutzer auch die Möglichkeit, die Tabelle zu erweitern und die Bewertungsvorlage selbst auszufüllen. Der übersichtliche Aufbau des Formblatts zur Vorauswahl erleichtert die Anwendung, da die Fragen wie bei einer Checkliste nacheinander beantwortet werden können, sodass die Nutzer durch den Prozess geleitet werden und keine Schritte vergessen werden.

Vorauswahl	Qualitative Kriterien (ausgewählte K.O.-Kriterien)						Entscheidung
	Geringe Dichte, zugehörig zu Leichtmetallen ($\rho < 5 \text{ g/cm}^3$)						
Kriterien (+) erfüllt (-) nicht erfüllt (?) Informationsmangel	Hohe mechanische Energieabsorptionsfähigkeit						(+) weiterverfolgen (-) nicht weiterverfolgen (?) Informationen beschaffen
	Prinzipiell hohe Festigkeitseigenschaften						
	Hohe Temperaturbeständigkeit						
	Gute Korrosionsbeständigkeit						
	Hohe Recyclingfähigkeit						
	Bemerkungen						
Werkstoffe							
Aluminiumschaum-Sandwich	+	+	+	+	+	+	+
Werkstoff XY (optional)	+	-	+	+	?	-	...

Bild 3: Formblatt zur qualitativen Vorauswahl anhand grober Kriterien

Ist die Tabelle vollständig ausgefüllt, kann entschieden werden, ob AFS grundsätzlich für den entsprechenden Einsatz geeignet ist. Wird ein Kriterium nicht erfüllt, welches aber für die vorliegende Anwendung relevant ist, so scheidet der Werkstoff für diesen Anwendungsfall aus und wird nicht weiterverfolgt. Mithilfe dieser Vorbewertung kann eine Vorentscheidung getroffen werden, ob der Einsatz von AFS bei einer Anwendung grundsätzlich geeignet sein könnte und es lohnenswert ist, diesen in einem weiteren Schritt detaillierter zu betrachten. Dieser Quick-Check kann sowohl erfolgen, wenn lediglich AFS betrachtet wird als auch wenn weitere Werkstoffe ebenfalls mitberücksichtigt werden sollen, um eine breitere Vorauswahl zu treffen und die Werkstoffanzahl zu reduzieren.

Wird AFS in der ersten Bewertungsstufe als möglicherweise geeigneter Werkstoff identifiziert, so folgt Bewertungsstufe 2 (B2), welche detaillierter und quantitativer aufgebaut ist. Anhand vorhandener Werkstoffkennwerte und weiterer Eigenschaften ist zu prüfen, ob der Einsatz von AFS gegenüber anderen zu vergleichenden Werkstoffen (ebenfalls als Plattenmaterial) einen Mehrwert besitzt und sich der Materialwechsel somit lohnt. Da bei einer Werkstoffauswahl meist ein existierendes Produkt vorliegt, bei dem ein Werkstoffwechsel angestrebt wird, ist neben AFS zumindest ein Referenzwerkstoff aufgeführt. Der Bewertungsschritt erfolgt anhand der in Bild 4 dargestellten und exemplarisch ausgefüllten Bewertungsvorlage. Spaltenweise sind hier die zu vergleichenden Werkstoffe eingetragen (Anzahl beliebig), während zeilenweise die quantitativen Kriterien eingetragen werden. Eine Gewichtung der Kriterien kann dabei optional verwendet werden, ist aber im Einzelfall zu prüfen, da das Ergebnis bei einer gewichteten Bewertung aufgrund der subjektiven Wahrnehmung leicht verfälscht werden kann, wenn einzelne Kriterien zu stark gewichtet werden. Für die Gewichtung wird dabei eine dreistufige Likert-Skala verwendet. Die Bewertungskriterien in den Zeilen werden schließlich – soweit vorhanden – mit Werkstoffkennwerten einer Datentabelle versehen. Sind einzelne gewünschte Kennwerte nicht angegeben, so sind diese firmenspezifisch und mittels geltender Normen zu prüfen und ggf. experimentell zu ermitteln.

Die Bewertungstabelle in Bild 4 gibt einzelne technische Eigenschaften wieder, welche mit Hilfe der Gewichtung und Vorzugsrichtung der Werte (Ziel) zu einem Gesamtwert berechnet werden kann (siehe Bild 4 unten links). Falls ein Wertebereich für einen Kennwert angegeben ist, so wird der Mittelwert verwendet. Durch die angegebene Gleichung werden die Werte des Referenzwerkstoffs auf 1 normiert, sodass die Werte der anderen Werkstoffe dann prozentual als Verbesserung (>1) oder Verschlechterung (<1) zur Referenz berechnet werden. Dadurch erhält der Nutzer eine Aussage, ob sich AFS gegenüber dem Referenzwerkstoff tendenziell verbessert. Darüber hinaus kann dieser Wert dann in einem zweiachsigen Diagramm über der Wirtschaftlichkeit des Werkstoffs, welche separat zu bewerten ist, aufgetragen werden (siehe Bild 4 unten rechts). Die Materialkosten sind jedoch abhängig von der Losgröße und Plattendicke sowie der aktuellen Marktsituation. Hierbei ist es empfehlenswert, zunächst eine notwendige Blechdicke der verschiedenen Werkstoffe zu ermitteln, bei der eine gleiche Biegesteifigkeit vorliegt (siehe hierzu auch Banhart et al. 2019, S. 66) und die Kosten dann in Abhängigkeit der Masse (€/kg) oder Fläche (€/m²) anzugeben. Mit einem solchen Diagramm kann dargestellt werden, ob ein ausreichender Mehrwert geschaffen wird, um den möglicherweise erhöhten Preis von einer AFS-Platte zu rechtfertigen.

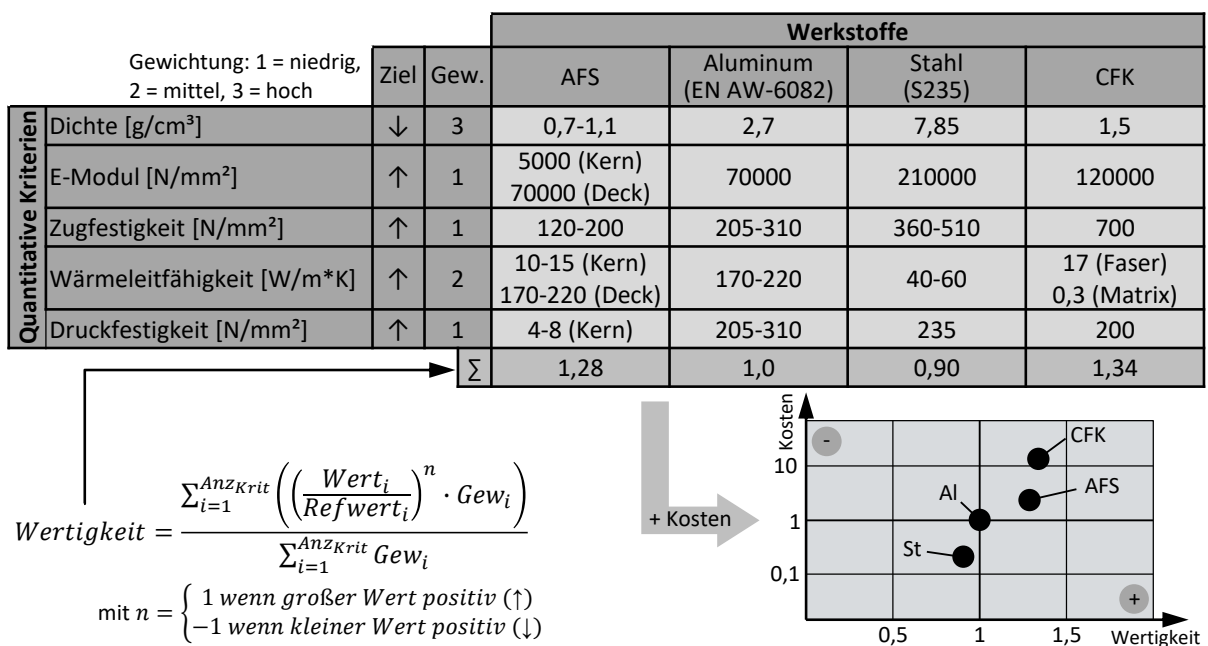


Bild 4: Exemplarisch ausgefülltes Formblatt zur quantitativen Bewertung der zu vergleichenden Werkstoffe (oben) sowie Möglichkeit der Ergebnisinterpretation mit Einbeziehung der Wirtschaftlichkeit (unten rechts)

Nach Abschluss der beiden Bewertungsstufen kann eine Aussage getroffen werden, welche Werkstoffe am besten bzw. besser als der Referenzwerkstoff geeignet sind. Somit ist es auch möglich, das Einsatzpotenzial von AFS für eine Anwendung zu bewerten. Nach der Bewertung sind die Ergebnisse abschließend kritisch zu überprüfen, da es bei Bewertungsverfahren zu unterschiedlichsten Fehlern kommen kann. Die Bewertung ist insbesondere hinsichtlich der Objektivität (subjektive Einflüsse minimieren), Plausibilität (Ergebnis nachvollziehbar) und Sensitivität (Analyse der erreichbaren Aussagesicherheit) zu prüfen (Wartzack 2021, S. 330).

7 Initiale Anwendungsevaluation aus Expertensicht und Diskussion

Nachdem zuvor die entwickelte Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials von AFS vorgestellt wurde, behandelt dieses Kapitel eine erste initiale Evaluation der Methode. Die Anforderungen aus Kapitel 5 wurden dabei während der Entwicklung kontinuierlich als Grundlage verwendet. Um abschließend ein erstes Meinungsbild zu erhalten, wurden zwölf halbstündige Experteninterviews durchgeführt. Als Experten wurden vier Produktentwickler und Konstrukteure verschiedener Firmen sowie acht wissenschaftliche Mitarbeitende eines Forschungslehrstuhl einer Universität befragt. Zu Beginn wurde die entwickelte Bewertungsmethode vorgestellt und anschließend wurden die beiden Bewertungsschritte exemplarisch anhand der Anwendung eines Batteriegehäuses von den Experten angewandt. Insgesamt wurden zwölf Experten befragt, deren Antworten in Bild 5 dargestellt sind. Zusammengefasst ergibt sich ein positives Meinungsbild, da alle Fragen mit „vielleicht“, „eher ja“ oder „ja“ beantwortet wurden.

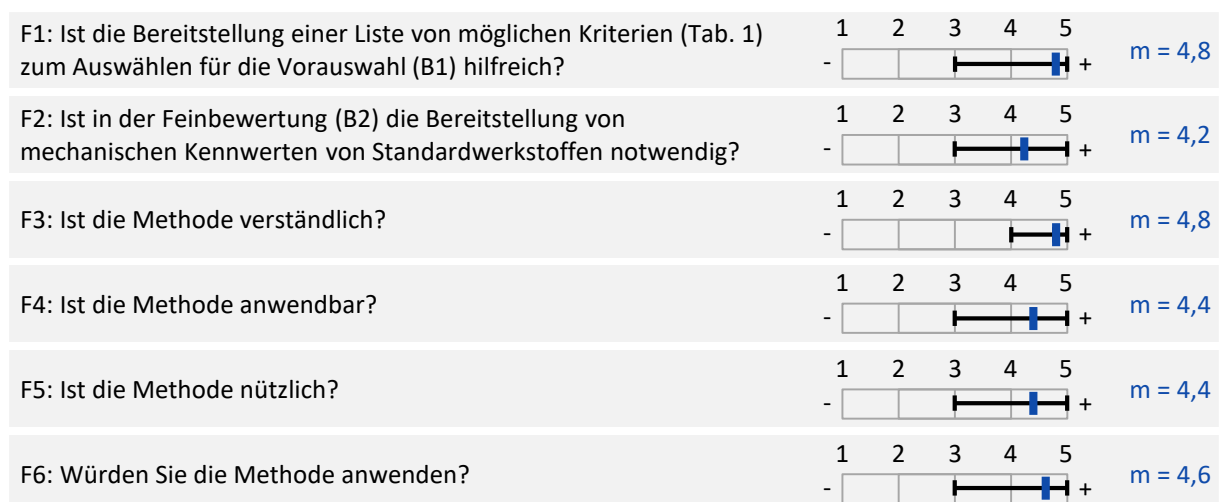


Bild 5: Ergebnisse einer Expertenbefragung mit zwölf Teilnehmenden
(Antworten: 1 = nein, 2 = eher nein, 3 = vielleicht, 4 eher ja, 5 = ja)

Darüber hinaus wurde im Gespräch von allen Teilnehmenden bestätigt, dass ein zweistufiges Vorgehen geeignet ist, um einfach und schnell eine Vorauswahl treffen zu können und sich erst danach mit Detailbewertungen auseinander zu setzen. Die qualitativen Kriterien sollen laut den Experten nur für die Vorbewertung (B1) berücksichtigt werden. Daher werden im zweiten Schritt (B2) zwar nur wenige Kriterien verwendet, welche dafür mit exakten und verlässlichen Werten versehen werden können. Dadurch wird eine objektive und transparente Bewertung ermöglicht. Auch die notwendige Zeitdauer zur Durchführung der Methode wurde als ausreichend kurz eingeschätzt.

Diskussionswürdig war, ob Kriterien in der Feinbewertung (B2) mit 0-4 Punkten bewertet werden, damit beispielsweise auch die „Schweißbarkeit“ mitbewertet werden kann. Da dies wiederum zu subjektiven Antworten führt, blieb dieser Aspekt bisher unberücksichtigt und wird nur in der Vorauswahl (B1) als qualitatives Kriterium verwendet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde eine Methode zur Bewertung des Einsatzpotenzials von Aluminiumschaum-Sandwich entwickelt. Mithilfe des beschriebenen zweistufigen Vorgehens wird einerseits mit geringem Aufwand die grundsätzliche Eignung des AFS-Einsatzes frühzeitig überprüft und andererseits werden bei erfolgsversprechendem Ergebnis der Vorauswahl im zweiten Schritt die Werkstoffe auf einheitlicher Grundlage und auf Basis von verlässlichen Kennwerten miteinander verglichen. Eine erste Evaluation konnte die Anwendbarkeit und den Nutzen der Methode aufzeigen. Darüber hinaus ist die Vorgehensweise der Methode auch auf andere Werkstoffe übertragbar, welche noch nicht zu den etablierten Werkstoffen gehören oder bei denen ebenfalls eine begrenzte Datenverfügbarkeit vorliegt.

Die Bewertungsmethode soll dazu führen, dass AFS zukünftig stärker in Werkstoffauswahlprozesse integriert wird und sich somit der gewinnbringende Einsatz von AFS erhöht. Hierfür sind Case Studies und eine umfassende Evaluation im industriellen Umfeld geplant.

Literatur

- Ashby 2016 ASHBY, Michael Farries: *Materials Selection in Mechanical Design*. 5. Aufl. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.
- Banhart und Seeliger 2008 BANHART, John; SEELIGER, Hans-Wolfgang: *Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications*. In: *Advanced Engineering Materials* 10, Nr. 9, 2008, S. 793-802.
- Banhart et al. 2019 BANHART, John; GARCÍA-MORENO, Francisco; HEIM, Korbinian; SEELIGER, Hans-Wolfgang: *Light-Weighting in Transportation and Defence Using Aluminium Foam Sandwich Structures*. In: GOKHALE, Amol A.; PRASAD, N. Eswara; BASU, Biswajit (Hrsg): *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation*. Singapur: Springer, 2019, S. 61-72.
- Breiting und Knosala 1997 BREITING, Alois; KNOSALA, Ryszard: *Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Berlin Heidelberg: Springer, 1997.
- Ehrlenspiel und Meerkamm 2017 EHRENSPIEL, Klaus; MEERKAMM, Harald: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- Friedrich 2013 FRIEDRICH, Horst E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Berlin: Springer-Vieweg, 2013.
- Gausemaier et al. 2001 GAUSEMEIER, Jürgen; EBBESMEYER, Peter; KALLMEYER, Ferdinand: *Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. München: Hanser, 2001.
- Haberfellner et al. 2019 HABERFELLNER, Reinhard; DE WECK, Oliver; FRICKE, Ernst; VÖSSNER, Siegfried: *Systems Engineering – Fundamentals and Applications*. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- Hipke 2002 HIPKE, Thomas: *Analyse, Bewertung und Eignung von Aluminiumschäumen für die Werkzeugmaschinenkonstruktion*. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2002.
- Hipke et al. 2007 HIPKE, Thomas; LANGE, Günther; POSS, René: *Taschenbuch für Aluminiumschäume*. 1. Aufl. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2007.
- Hohlfeld et al. 2018 HOHLFELD, Jörg; HIPKE, Thomas; SCHULLER, Friedrich: *Sandwich Manufacturing with Foam Core and Aluminum Face Sheets - A New Process without Rolling*. In: *Materials Science Forum*, Vol. 993, 2018, S. 3-10.

- Hommel et al. 2020 HOMMEL, Patrick; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg: *Deficits in the Application of Aluminum Foam Sandwich: An Industrial Perspective*. In: *Proceedings of the Design 2020 – 16th International Design Conference*, 2020, S. 927-936.
- Hommel et al. 2021 HOMMEL, Patrick; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg: Derivation of Motivators for the Use of Aluminum Foam Sandwich and Advantageous Applications. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*, Göteborg, Schweden, 16.-20. August 2021, S. 933-942.
- Hommel et al. 2022 HOMMEL, Patrick; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg; KREIMEYER, Matthias: *Toward a Method for Evaluating the Applicability of Aluminum Foam Sandwich*. In: *Proceedings of the Design 2022 – 17th International Design Conference*, 2022, S. 455-464.
- Kaiser 2017 KAISER, Robin: *Ein Vorgehensmodell zur systematischen Werkstoffauswahl in der frühen Phase der Entwicklung von Fahrzeugstrukturbauteilen*, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2017.
- Keller und Binz 2009 KELLER, Alexander; BINZ, Hansgeorg: *Requirements on Engineering Design Methodologies*. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design*, 2009, S. 203-214.
- Kesselring 1951 KESSELRING, Fritz: *Bewertung von Konstruktionen, ein Mittel zur Steuerung von Konstruktionsarbeit*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1951.
- Krause et al. 2018 KRAUSE, Dieter; SCHWENKE, Johann; GUMPINGER, Thomas; PLAUMANN, Benedikt: *Leichtbau*. In: RIEG, Frank; STEINHILPER, Rolf (Hrsg.): *Handbuch Konstruktion*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2018, S. 485-507.
- Lange 2020 LANGE, Günther: *Metallschäume*, Berlin: De Gruyter, 2020.
- Lindemann 2009 LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- Pahl et al. 2007 PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- Reuter 2021 REUTER, Martin: *Methodik der Werkstoffauswahl – Der systematische Weg zum richtigen Material*. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2021.
- Seeliger 2011 SEELIGER, Hans-Wolfgang: *AFS-Weiterentwicklung erreicht Serienreife: Aluminiumschaum frisch vom Band*. In: *Aluminium Kurier News 03/2011*, S. 16.
- Sviridov 2011 SVIRIDOV, Alexander: *Leichtbau mit Aluminiumschaumsandwich: Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen*. Technische Universität Cottbus, Dissertation, 2011.
- VDI 2221 1993 VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth Verlag, 1993.
- VDI 2225-3 1998 VDI 2225 Blatt 3: *Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren: Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- Wartzack 2021 WARTZACK, Sandro: *Auswahl- und Bewertungsmethoden*. In: BENDER, Beate; GERICKE, Kilian (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 9. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2021, S. 307-334.
- Zangemeister 2014 ZANGEMEISTER, Christof: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 5. Aufl. Zangemeister & Partner, 2014.

Interdisziplinäre Entwicklung einer adaptiven Geschossdecke als leichtes Tragwerkselement im Bauwesen

Interdisciplinary development of an adaptive slab as a lightweight civil structure

Matthias J. Bosch¹, Markus Nitzlader², Michael P. Voigt¹, Matthias Bachmann¹, Daniel Roth¹, Hansgeorg Binz¹, Lucio Blandini², Matthias Kreimeyer¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
matthias.bosch@iktd.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Stuttgart
markus.nitzlader@ilek.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Geschossdecken umfassen den Großteil der Masse eines Gebäudes. Ein Ansatz zur Reduktion des Materialeinsatzes sind adaptive Tragwerke, bei denen durch innere Aktuierung den äußeren Einwirkungen entgegengewirkt wird. Bei der Entwicklung geeigneter Aktuierungs- und dazugehöriger Aktorkonzepte für einzelne Tragwerkselemente, wie z. B. Geschossdecken, zeigt sich eine starke gegenseitige Beeinflussung zwischen beiden Konzeptbereichen, weshalb eine scharfe Abgrenzung der Aufgaben der beteiligten Disziplinen nicht gelingt. Es ist vielmehr eine sehr enge Abstimmung sowie die Identifikation der gegenseitigen Beeinflussung während des Entwicklungsprozesses notwendig. An einem Fallbeispiel werden die Abhängigkeiten für die Aktuierungs- und Aktorkonzeptentwicklung analysiert und grafisch aufgearbeitet. Durch eine Kondensation der Ergebnisse ergibt sich ein erster Ansatz für die interdisziplinäre Entwicklung adaptiver Tragwerkselemente.

Keywords (deutsch):

Interdisziplinarität, Entwicklungsprozess, Geschossdecken, Bauingenieurwesen

Abstract (english):

Floor slabs comprise the majority of the mass of a building. One approach to reducing the use of materials is adaptive structures, in which external forces are counteracted by internal actuation. In the development of suitable actuation and associated actuator concepts for individual structural elements, such as floor slabs, there is a strong mutual influence between the actuation and actuator concept, meaning a clear separation between the tasks of the disciplines involved is not possible. Rather, a tight coordination as well as the identification of the mutual influence during the development process is necessary. A case study is used to analyze the dependencies for actuation and actuator concept development and to present them graphically. A condensation of the results results in a first approach for the interdisciplinary development of adaptive structural elements.

Keywords (english):

Interdisciplinarity, development process, floor slabs, civil engineering

1 Einleitung

Geschosdecken aus Stahlbeton nehmen einen großen Anteil der Masse eines Gebäudes ein. Bei deren Dimensionierung sind insbesondere Verformungsgrenzwerte einzuhalten. Hierfür maßgebende Beanspruchungen basieren auf Extremereignissen, die jedoch nur selten während der Lebensdauer des Bauteils auftreten und somit zu einer Überdimensionierung führen. Daher ist das Material zu einem Großteil der Nutzungsdauer nicht ideal ausgelastet. Bei biegebeanspruchten Tragwerkselementen können durch gezielte Aktuierung innerer Kräfte die Durchbiegung verringert und infolge dessen die Querschnitte des Tragwerkselements reduziert werden, was zu einer höheren Auslastung führt. Ein Konzept zur Aktuierung eines biegebeanspruchten Trägers wird von Kelleter (2022) und Burghardt et al. (2022) entwickelt. Dabei werden integrierte fluidische Aktoren eingesetzt. Diese generieren ein Moment, das dem Moment aus der äußeren Einwirkung entgegenwirkt. Die Durchbiegung kann so deutlich reduziert werden, bis hin zu deren vollständigen Kompensation. Damit können die zulässigen Verformungskriterien auch für größere Lasten eingehalten werden (siehe Bild 1).

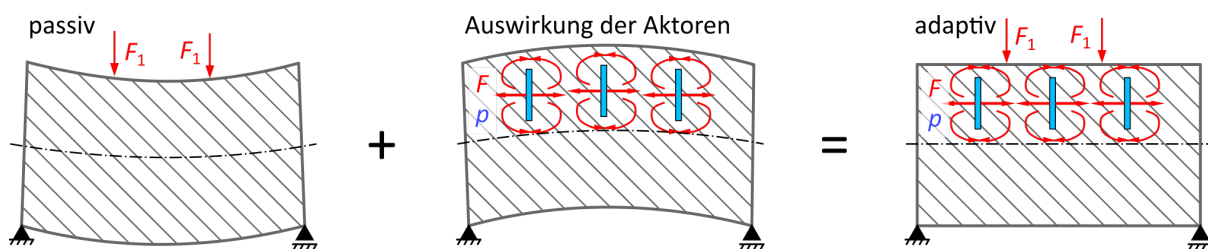


Bild 1: Schematische Darstellung eines Aktuierungskonzepts für Biegeträger, F_1 sind zwei Einzelkräfte durch äußere Belastung im Rahmen eines Vierpunktbiegeversuches, F ist die durch den fluidischen Druck p entstehende Aktuierungskraft, rote gebogene Pfeile im Strukturelement stellen den Kraftfluss schematisch dar

Das Konzept konnte numerisch und anhand von Funktionsmustern nachgewiesen werden (Kelleter 2022; Burghardt et al. 2022). Die dort gewonnenen Erkenntnisse werden zur Entwicklung von Aktuierungs- und Aktorkonzepten für biegebeanspruchte Platten genutzt. Das Aktuierungskonzept beinhaltet die Definition, welche Art von Kräften und Stellwegen an welchen Stellen des Tragwerkselements benötigt werden und wird aufgrund des anwendungsspezifisch benötigten Wissens maßgeblich dem Bauingenieurwesen zugeordnet. In Ergänzung dazu beinhaltet das Aktorkonzept die Fragestellung, mit welchen Wirkprinzipien und Strukturen die im Tragwerk geforderten Kräfte und Stellwege zur Verfügung gestellt werden. Dies ist Bestandteil der Aktorentwicklung und fällt somit in die Disziplin des Maschinenbaus. Erste Ergebnisse zur Erstellung eines Aktuierungskonzepts für adaptive Geschosdecken wurden in (Nitzlader et al. 2022a) vorgestellt. Bosch et al. (2022a) zeigen in numerischen Untersuchungen verschiedene geometrische Parameter eines Aktorkonzepts für adaptive Geschosdecken, die das Aktuierungskonzept beeinflussen. Bereits in diesen Ergebnissen wurde ersichtlich, dass die Entwicklung neuer Aktor- und Aktuierungskonzepte eine enge Zusammenarbeit zwischen Bauingenieurwesen und Maschinenbau erfordert.

Für adaptive Stabtragwerke wurde von Honold et al. (2019b) ein perspektivisches Vorgehensmodell nach den Richtlinien VDI 2221 (VDI 2221 Blatt 1) und VDI 2206 (VDI 2206) entwickelt. Hier befindet sich stets das komplette Tragwerk im Blickfeld der Entwicklung. Im Gegensatz dazu wird bei der Entwicklung von Aktuierungs- und Aktorkonzepten für Plattenelemente nur ein einzelnes Tragwerkselement betrachtet. Dies erfordert wie zuvor dargestellt eine sehr enge Abstimmung der Tätigkeiten bereits auf dieser Ebene.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aktor- und Aktuierungskonzept lassen sich nur eingeschränkt trennen und eine separate Entwicklung beider Konzepte ist somit schwierig. Durch Berücksichtigung der gegenseitigen Auswirkung von

Festlegungen zwischen Aktuierungs- und Aktorkonzept soll eine parallele Bearbeitung und Entwicklung ermöglicht werden, wodurch eine Zeitersparnis erzielt werden kann sowie ein besseres Gesamtkonzept entsteht. Die Forschungsfrage lautet daher:

Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen der Entwicklung von Aktuierungs- und Aktorkonzepten für adaptive Geschossdecken und wie sieht ein dafür geeigneter Entwicklungsprozess aus?

Durch die Beantwortung dieser Frage soll eine Effizienzsteigerung bei der Entwicklung adaptiver Tragwerkselemente erzielt werden. Der sich ergebende Entwicklungsprozess kann in einem nächsten Schritt zu einer allgemeinen Vorgehensweise für adaptive Tragwerkselemente erweitert werden.

1.2 Aufbau des Beitrags

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird in Kapitel 2 ein Einblick in Vorarbeiten zu Entwicklungsmethoden bei adaptiven Tragwerken gegeben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 eine interdisziplinäre Vorgehensweise zur Entwicklung einer adaptiven Geschossdecke vorgestellt. Diese werden im Rahmen einer Fallstudie erstellt, in der die bei der Entwicklung durchlaufenen Schritte erfasst und anschließend in ein Ablaufschemata überführt werden. Die in Kapitel 2 beschriebenen Entwicklungsmethoden werden dabei zur Orientierung herangezogen. In den Abschnitten 3.1, 3.2 und 3.3 werden die einzelnen Teile der Vorgehensweise näher erläutert bevor in Abschnitt 3.4 das Vorgehen am Beispiel eines Funktionsmusters in Form eines Schaumstoffmodells einer adaptiven Platte präsentiert wird. Im darauf folgenden Kapitel 4 wird die erarbeitete Vorgehensweise in die für Stabtragwerke bestehende Vorgehensweise nach Honold et al. (2019b) eingeordnet. Der Beitrag schließt mit der Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 5. Eine Übersicht zum Aufbau des Beitrags ist in Bild 2 gegeben.

Kapitel 2	Vorarbeiten zu Entwicklungsmethoden bei adaptiven Tragwerken	
Kapitel 3	Fallstudie zur Entwicklung einer interdisziplinären Vorgehensweise am Beispiel einer Geschossdecke	
	3.1	Definition des Tragwerkelements
	3.2	Machbarkeitsanalyse und grundlegende Konzeption der Aktuierung und Aktorik
	3.3	Detaillierung der Konzepte für Aktuierung und Aktorik
	3.4	Weiteres Vorgehen und beispielhafte Umsetzung eines Schaumstoffmodells
Kapitel 4	Einordnung der Vorgehensweise in Honold et al. (2019b)	
Kapitel 5	Zusammenfassung und Ausblick	

Bild 2: Aufbau des Beitrags

2 Vorarbeiten zu Entwicklungsmethoden bei adaptiven Tragwerken

Mit der Entwicklung adaptiver Tragwerke im interdisziplinären Kontext befassen sich Honold et al. (2019b) (vgl. Bild 3), wobei anhand der Erfahrungen bei der Entwicklung des Demonstrator-Hochhauses D1244 (Blandini et al. 2022) des Sonderforschungsbereichs 1244 (Sobek et al. 2021) ein perspektivisches Vorgehensmodell aufgestellt wurde, das die Interaktion der beteiligten Disziplinen Tragwerksplanung (Bauingenieurwesen), Systemdynamik und Maschinenbau auf der Tragwerkebene beschreibt. Ergänzend dazu stellen Honold et al. (2019a) eine Landkarte mit Methoden zur Anwendung im Bereich adaptiver Gebäude vor. Hierbei wird deutlich, dass bereits im Bereich des Vorentwurfs bzw. der Tragwerkskonzeption eine Machbarkeitsanalyse durch den Maschinenbau durchzuführen ist. Letztlich fließen die Erkenntnisse der verschiedenen Disziplinen in eine Anforderungsdefinition ein. Darauf basierend wird das Tragwerk entworfen sowie die Aktorik konzipiert, worauf eine Konzeptauswahl zur Aktorintegration der Entwurf mit Bemessung und Bauteilauslegung beginnt.

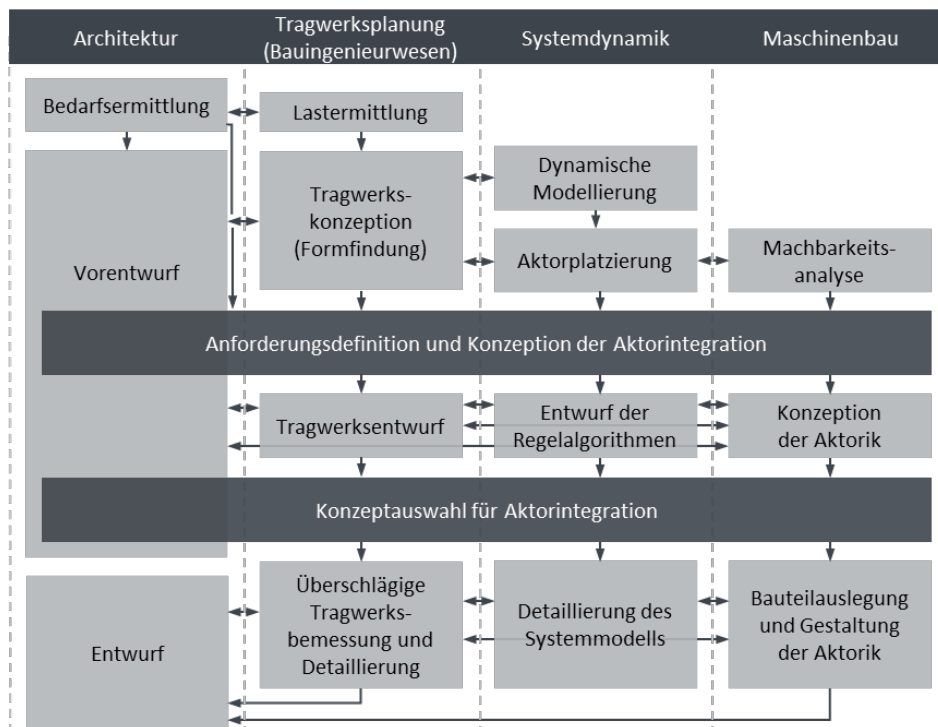


Bild 3: Perspektivisches Vorgehensmodell für die Planung und Entwicklung eines adaptiven Tragwerks, in Anlehnung an (Honold et al. 2019b)

Vergleichende Arbeiten zur methodischen Unterstützung und zum Prozessmapping finden sich im erweiterten Kontext zur Entwicklung adaptiver Fassaden, beispielsweise bei Voigt et al. (2021; 2022), Juaristi et al. (2020) oder Battisti et al. (2019). In Borschewski et al. (2022) wird über die Einbeziehung der Ökobilanzierung im Planungs- und Entwicklungsprozess adaptiver Gebäude berichtet.

Die Methodenlandkarte und das perspektivische Vorgehensmodell nach Honold et al. (2019a; 2019b) bieten einen ersten Einstiegspunkt zur Entwicklung adaptiver Gebäude. Die Übertragbarkeit auf die Entwicklung einzelner adaptiver Tragwerkelemente ist noch nicht geklärt, eine Orientierung daran erscheint aber zweckmäßig. Für die interdisziplinäre Entwicklung können Methoden aus dem Concurrent Engineering (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017), wie Parallelisierung der Arbeitsabläufe und enge Abstimmung zwischen den Disziplinen genutzt werden. Dadurch sollen Iterationsschleifen reduziert werden, indem bereits frühzeitig auf sich ändernde Anforderungen reagiert wird. Bezogen auf das konkrete Projekt ist damit die Entwicklung von Werkzeugen und die Definition von Kennzahlen zur quantitativen Beschreibung der Schnittstellen zwischen Aktuierungs- und Aktorkonzept verbunden. Diese wurden in Grundzügen bereits beschrieben (Nitzlader et al. 2022a; Nitzlader et al. 2022b; Bosch et al. 2022b; Bosch et al. 2022a). Genaue Abhängigkeiten in der Entwicklung von Aktuierungs- und Aktorkonzepten inklusive eines dafür geeigneten Entwicklungsprozesses sind in keinem der hier aufgeführten Beiträge zu finden.

3 Fallstudie zur interdisziplinären Entwicklung adaptiver Tragwerke am Beispiel einer Geschossdecke

In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer interdisziplinären Vorgehensweise am Beispiel einer Geschossdecke vorgestellt, wobei sich auf die Interaktion von Bauingenieurwesen und Maschinenbau beschränkt wird. Zur Ermittlung eines für den Anwendungszweck geeigneten Entwicklungsprozesses und zur Identifizierung der Abhängigkeiten wurde der Prozess grafisch aufbereitet (siehe Bild 4). Die dort mit Bulletpoints aufgezählten Unterpunkte der einzelnen Entwicklungsschritte, auch Ausprägungen genannt, wurden im Rahmen der Fallstudie von den Autoren als maßgeblich identifiziert. Diese wurden im Nachgang geclustert und hierfür Überbegriffe definiert. Für ein anderes Anwendungsfeld oder

Vorgehen können insbesondere die notwendigen und zweckmäßigen Ausprägungen abweichen. Dies betrifft sowohl das Aktuierungs- als auch das Aktorkonzept. Im Folgenden werden die einzelnen Teile des Entwicklungsprozesses beschrieben sowie auf die identifizierten Schnittstellen näher eingegangen. Für die mit der hier vorgestellten Fallstudie verbundene Untersuchung wird eine zweiachsig gespannte Platte gewählt. Diese stellt ein Tragwerkselement mit großem potentiellm Ressourcen- und Emissionseinsparpotential gegenüber der gebauten Umwelt dar (Nitzlader et al. 2022a). Außerdem ist mit der Wahl der isotropen, liniengelagerten Einfeldplatte aus Stahlbeton als Untersuchungsobjekt eine gute Übertragbarkeit auf andere Plattentypen gegeben.

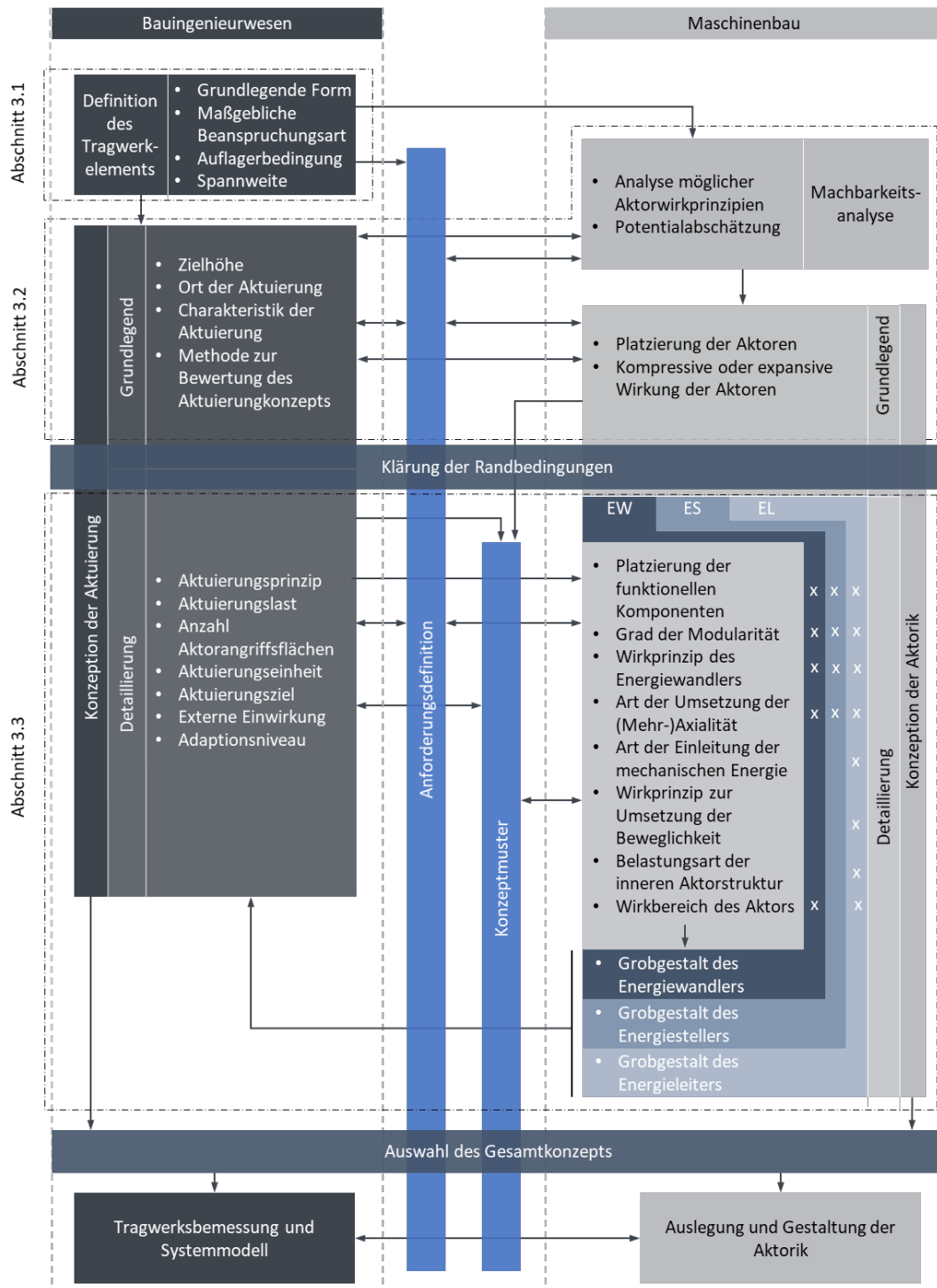


Bild 4: Abgeleitete beispielhafte Form der Vorgehensweise, die Wechselwirkungen sind vereinfacht dargestellt, EW steht für Energiewandler, ES für Energiesteller und EL für Energieleiter

3.1 Definition des Tragwerkselements

Ausgehend von der Tragwerksstruktur müssen die grundlegende Form des Tragwerkselements definiert und die dafür maßgebliche Beanspruchungssituation sowie die Auflagerbedingungen identifiziert werden. Daraus ergibt sich auch die Spannweite, d. h. Länge und Breite, des Tragwerkselements

3.2 Machbarkeitsanalyse und grundlegende Konzeption der Aktuierung und Aktorik

Nach Festlegung der grundlegenden Form des Tragwerkselements kann die Konzeption der Aktuierung erfolgen. Detaillierte Einblicke in diese Phase werden in (Nitzlader et al. 2022a; Nitzlader et al. 2022b) gegeben. Als Entscheidung steht die Wahl der Zielhöhe, d. h. die angestrebte Höhe des Tragwerkselements an. Die Höhe der Platte unterliegt dabei einer wechselseitigen Optimierung zwischen den Disziplinen, da hier eine Einschätzung notwendig ist, ob diese überhaupt ausreichend Raum für eine realistische technische Umsetzung der Aktorik bietet. Durch Abschätzung der erforderlichen Kräfte zur Kompensation der Durchbiegung unter der maßgeblichen Beanspruchung kann bei gegebener Tragwerksdimension eine Abschätzung der notwendigen Energiedichte erfolgen. Dies führt zu einer Eingrenzung der in Frage kommenden Aktorwirkprinzipien im Rahmen einer Machbarkeitsanalyse (Weidner et al. 2018). Es besteht an diesem Punkt die Gefahr, vielversprechende Aktorwirkprinzipien bereits in einem frühen Stadium zu verwerfen. Gleichzeitig ermöglicht dies aber auch eine Fokussierung auf wenige Aktorwirkprinzipien, um die Lösungsmenge für die weiteren Betrachtungen des Aktorkonzepts zweckmäßig einzugrenzen. Wird dies nicht durchgeführt, eröffnet sich ein weites Feld an Möglichkeiten, womit eine Lösung nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand gefunden werden kann, solange nicht weitere Randbedingungen festgelegt sind.

Wesentlich für die Konzeption der Aktuierung sind die folgenden Festlegungen, die nicht ausschließlich für Plattentragwerke gelten müssen:

- Ort der Aktuierung, d. h. an welcher Stelle erfolgt die Einleitung der Kräfte: am Rand oder im Querschnitt des Tragwerkselements, zwischen mehreren Tragwerkselementen,
- Charakteristik der Aktuierung: u. a. serielle oder parallele Aktuierung (Kelleter et al. 2020).

Die Entscheidung zur Krafteinleitung wirkt sich auf den Charakter der Aktuierung direkt aus und legt damit die Möglichkeiten zur Manipulation des Lastabtrags fest. Die vorgenannten Festlegungen haben einen maßgeblichen Einfluss auf das grundlegende Aktorkonzept, da hierdurch beispielsweise folgende Punkte implizit definiert werden:

- Platzierung der Aktoren,
- Kompressive oder expansive Wirkung der Aktoren.

Daraus ergeben sich Anforderungen an verschiedene Eigenschaften des Aktors, wie beispielsweise die Lebensdauer und Wartung aufgrund gegebenenfalls eingeschränkter Zugänglichkeit von Aktorkomponenten. Außerdem kann eine erste Abschätzung der zu erwartenden Komplexität des Aktorsystems erfolgen, was wiederum die Festlegung des grundlegenden Aktuierungskonzepts beeinflusst. Für die weiteren Untersuchungen wird an diesem Punkt die Methode der Einflussmatrizen als Sensitivitätsanalyse zur Bewertung der einzelnen Bestandteile des Aktuierungskonzepts gewählt (Nitzlader et al. 2022b). Einflussmatrizen bieten die Möglichkeit für unterschiedliche Aktuierungsprinzipien die Reaktion des Tragwerkselements infolge einer Einheitsaktuierung zu quantifizieren und analysieren. Aus den dabei ermittelten Einflussgrößen lassen sich geeignete Aktuierungskonzepte ableiten. Für das Untersuchungsobjekt der Fallstudie gilt, dass die Aktuierungskraft in einer exzentrischen Lage innerhalb des Bauteils eingeleitet wird, wodurch Momente erzeugt werden können. Fehlend ist zu diesem Zeitpunkt, in welche Richtungen, mit welchem Betrag oder in welchem Bereich diese Aktuierungskraft eingeleitet wird. Für das Aktorkonzept ist festgelegt, dass der Aktor prinzipiell innerhalb des Querschnitts der Platte platziert wird. Als Aktorwirkprinzip zwecks hoher notwendiger Energiedichte und erprobter Technik wird Hydraulik bevorzugt. Außerdem ist die Wirkung expansiv. Eine genauere Ausgestaltung der Aktorfunktionen steht noch aus.

3.3 Detaillierung der Konzepte für Aktuierung und Aktorik

Nach der Festlegung der Randbedingungen werden die Konzepte weiter detailliert. Für das Aktuierungskonzept werden folgende Ausprägungen untersucht, die das Aktorkonzept an mehreren Stellen direkt beeinflussen (Bild 4 bei „Detaillierung“):

- Aktuierungsprinzip: u. a. uniaxiale, biaxiale oder kombinierte Druck- oder Zugaktuierung,
- Definition der Aktuierungslast,
- Anzahl und Ort der Aktorangriffsflächen,
- Definition von Aktuierungseinheiten: Zusammenschluss mehrerer aktuierter Elemente / Distanz zwischen den Aktorangriffsflächen,
- Aktuierungsziel: u. a. Verformungskompensation, Spannungshomogenisierung,
- Ausprägung der externen Einwirkung,
- Festlegung des Adaptionsniveaus: durch Aktuierung abgedeckter Anteil am Lastabtrag.

Diese bedingen sich gegenseitig und werden durch die zuvor genannte Sensitivitätsanalyse sowie Rückspiegelungen aus der Aktorkonzept-Entwicklung optimiert. Daraus resultieren detailliertere Anforderungen an den Aktor, wie z. B. genauere Aussagen über:

- Stellkraft,
- Stellweg,
- Stellfrequenz,
- Bauraum,
- Aktoranzahl je Tragwerkselement,
- Anzahl der notwendigen Aktuierungsrichtungen je Aktor.

Für die weitere Detaillierung des Aktors wird dieser in die funktionellen Komponenten Energiesteller (ES), Energiewandler (EW) und Energieleiter (EL) aufgeteilt, vergleiche hierzu Bosch et al. (2022b). Diese sind dabei unterschiedlich stark vom Aktuierungskonzept abhängig, wobei der Energieleiter an der Schnittstelle zum Tragwerkselement am stärksten beeinflusst wird. Dessen Ausprägung hat indirekt Auswirkung auf Energiewandler und -steller. Für die Fallstudie erweist sich die in Bild 4 ersichtlichen Ausprägungen als zweckmäßige Abstraktionsebene des Aktorkonzepts. Dabei ist ergänzt, auf welche funktionellen Komponenten die Ausprägung den maßgeblichen Einfluss hat. Die Platzierung der funktionellen Komponenten kann über eine Teilintegration von Energiewandler und Energieleiter bis hin zu einer Integration aller drei Komponenten ausgeführt werden, woraus unterschiedliche Auswirkungen auf bereits definierte Anforderungen entstehen. Insbesondere Wartungs- und Lebensdaueraspekte werden bei erhöhtem Integrationsgrad relevant. Hinter dem Grad der Modularität verbirgt sich die Möglichkeit, verschiedene Konzepte der funktionellen Komponenten kombinierbar zu gestalten. Damit können gegebenenfalls mehrere Aktuierungskonzepte mit austauschbaren Komponenten abgedeckt werden, um die Komplexität eines Gesamtsystems aus mehreren Aktoren zu reduzieren. Weitere Aspekte sowie beispielhafte Lösungsmöglichkeiten sind:

- Art der Umsetzung von (Mehr-)Axialität: u. a. mehrere EW, mehraxialer EL,
- Art der Einleitung der mechanischen Energie: u. a. Momenteneinleitung, Krafteinleitung,
- Wirkprinzip zur Umsetzung der Beweglichkeit: u. a. Gehäuse, nachgiebige Beschichtung,
- Belastungsart der inneren Aktorstruktur: u. a. Nutzung von Verformungseffekten,
- Wirkprinzip des Energiewandlers: bei Hydraulik u. a.: Membran, Kolben.

Die Lösungsauswahl für diese Ausprägungen basiert maßgeblich auf den genannten Anforderungen an das Aktorkonzept. Des Weiteren werden die Ausprägungen durch Festlegungen in den jeweiligen Disziplinen als auch gegenseitig beeinflusst. So führt beispielweise eine Erhöhung der Anzahl der krafteinleitenden Flächen zu einer gesteigerten Anpassungsfähigkeit des adaptiven Tragwerkselements, andererseits aber auch zu einem komplexeren Gesamtsystem infolge komplexerer Aktorstruktur oder höherer Aktoranzahl. Hier gilt es im intensiven Austausch der Disziplinen eine optimale Lösung zwischen Aktuierungs- und Aktorkonzept zu finden. Die Zusammenführung der Grobgestalt der drei

funktionellen Komponenten führt zu einer Grobgestalt des Aktors. An den Schnittstellen zum Tragwerk treten Wechselwirkungen zwischen Aktor- und Aktuierungskonzept auf, wobei die krafteinleitende Fläche wesentlich ist. Bei integrierten fluidischen Aktoren in Plattentragwerken führt beispielsweise deren Vergrößerung zu einem größeren Wirkungsbereich des Aktors, gleichzeitig wird dadurch aber auch der notwendige Bauraum vergrößert, wodurch bei der bautechnischen Integration Probleme auftreten können. Um den Wirkungsbereich eines integrierten Aktors zu identifizieren und eine erste Festlegung treffen zu können, wurde von Bosch et al. (2022a) eine analytische Methode zur überschlägigen Berechnung entwickelt. Durch die Festlegung des Energiewandlers und der auftretenden Nachgiebigkeit des Betons kann eine maximale Nachgiebigkeit für die Aktorstruktur, d. h. maßgeblich den Energieleiter, definiert werden. Hierauf kann eine erste Materialauswahl sowie eine grobe Dimensionierung der Aktorstruktur erfolgen. Auch hier muss eine Rückspiegelung auf das Aktuierungskonzept erfolgen, um die Auswirkungen des Bauraums auf den Belastungsverlauf im Tragwerkelement zu identifizieren. Letztlich muss das weiter zu verfolgende Gesamtkonzept aus Aktuierungs- und Aktorkonzept ausgewählt werden.

3.4 Weiteres Vorgehen und beispielhafte Umsetzung eines Schaumstoffmodells

Nach der Auswahl des Gesamtkonzepts und der nun quantifizierbaren Anforderungen an den Aktor kann dessen weitere Ausarbeitung erfolgen. Zur frühzeitigen Identifizierung von Problemstellen sind hierbei begleitende numerische Untersuchungen und der Einsatz einfacher Funktionsmuster zweckmäßig. Für die Fallstudie wurde beispielhaft zur Darstellung des Aktuierungsprinzips und des Aktorfunktionsprinzips ein Schaumstoffmodell der adaptiven Platte aufgebaut, wobei auf bereits mit einem Schaumstoffbalken gewonnene Erkenntnisse zurückgegriffen werden konnte. Grundlage des hier angewendeten Aktuierungskonzepts bildet eine Sensitivitätsanalyse mittels Einflussmatrizen. Bild 5 zeigt einen exemplarischen Auszug mittels Einflussmatrizen generierter Einflussfelder für unterschiedliche Aktuierungsprinzipien. Die hier abgebildeten Einflussfelder zeigen die Effizienz der jeweiligen Aktuierungsprinzipien hinsichtlich der Reduktion von Verschiebungen in Feldmitte, unter Bezugnahme der Aktorposition innerhalb der xy -Ebene.

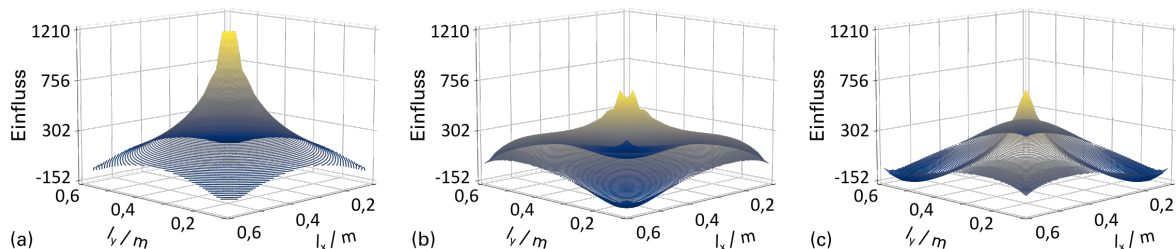


Bild 5: Einflussfelder für das Aktuierungsziel Verformungsreduktion: (a) biaxiales Aktuierungsprinzip, (b) uniaxiales Aktuierungsprinzip (45°), (c) uniaxiales Aktuierungsprinzip (135°)

Aus Bild 5 (a) wird ersichtlich, dass eine biaxiale Aktuierung in Feldmitte am Effizientesten ist um beispielsweise die vertikalen Verschiebungen infolge einer vollflächigen Belastung zu kompensieren. Entlang der Hauptdiagonalen klingt der Einfluss dieses Aktuierungsprinzips jedoch stark ab. Eine uniaxiale Aktuierung, welche sich an den Hauptmomenten der Platte orientiert, hat hingegen entlang der Diagonalen einen größeren Einfluss (Bild 5 (b), (c)). Um diese Effekte zu nutzen und gleichzeitig das Schaumstoffmodell einfach zu gestalten, wurde eine geringe Anzahl an Kraftangriffsflächen definiert. Diese sind so angeordnet, dass in Plattenmitte eine biaxiale Wirkrichtung sowie auf den Diagonalen eine uniaxiale Kraftwirkung entsprechend der vorherigen Beobachtung erzeugt wird. Der Abstand zwischen den Kraftangriffsflächen einer Aktuierungseinheit wurde möglichst groß gewählt, um ein Moment über eine möglichst große Strecke entsprechend dem in Kapitel 1 dargestellten Wirkprinzip zu erzeugen. Damit wird die Aktoranzahl reduziert. Gleichzeitig werden für die Diagonalen und die Plattenmitte dieselben Abstände genutzt, um so die Gleichteil-Anzahl zu erhöhen. Letztlich resultieren die starken Vereinfachungen in einer Gesamtzahl von fünf Aktoren mit zwei Aktuierungsprinzipien: einem

uniaxialen Aktor je Diagonale und einem biaxialen Aktor in Plattenmitte. Die Verformungen der Platte unter Last sollten so in der Theorie bei Aktuierung deutlich reduziert werden. Dieses Konzept entspricht einem stark vereinfachten Aktuierungskonzept nach Nitzlader et al. (2022b).

Die zur Umsetzung in einem Schaumstoffmodell (s. Bild 6) notwendigen Aktor-Prototypen bestehen aus zwei Druckkammern mit je einer Umhausung aus PLA und einem Luftballon. Die Druckkammern sind über eine verbindende Holz-Struktur in eine Richtung kurzgeschlossen. In der anderen Richtung schließt sich der Kraftfluss über den umgebenden Schaumstoff. Die Länge der Struktur ist hier so gewählt, dass eine möglichst große Distanz überbrückt werden kann. So kann für diese beispielhafte Umsetzung eine minimale Anzahl an einzelnen Aktoren genutzt werden, bei gleichzeitigem Befolgen der theoretischen Herleitungen. Die Wirkprinzipien der Aktoren wurden leicht verändert, da im Vergleich zum realen Objekt deutlich geringere Kräfte notwendig sind. Entsprechend wird anstelle von hydraulischem Druck mit pneumatischem Druck aktuiert.

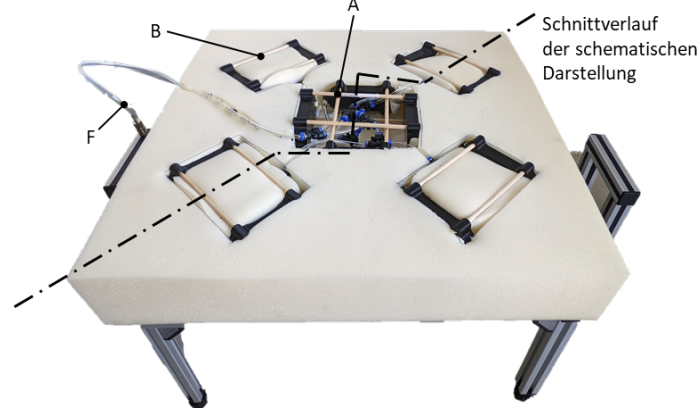


Bild 6: Schaumstoffmodell zur Darstellung des Aktuierungskonzepts mit vereinfachten Aktoren und ohne Deckschicht

Zur weiteren Erläuterung ist in Bild 7 ein schematisches Schnittbild des Schaumstoffmodells dargestellt. In der Mitte der Platte kommt ein biaxial wirkender Aktor (A), auf den Diagonalen kommen uniaxial wirkende Aktoren (B) zum Einsatz.

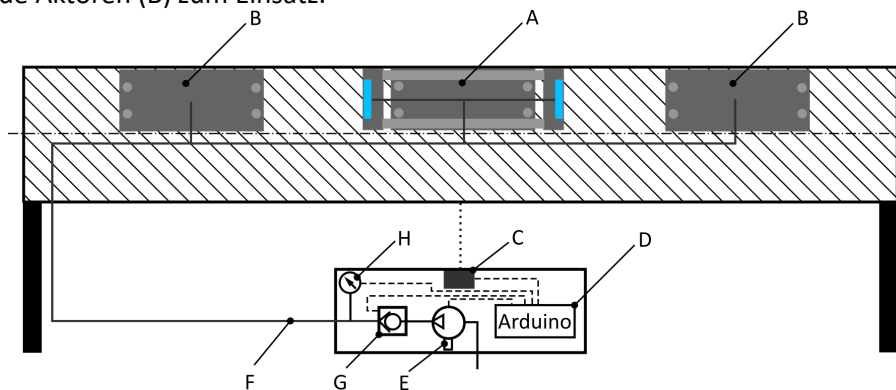


Bild 7: Schematisches Schnittbild des Schaumstoffmodells mit markierten Komponenten

Die Verformung der Platte wird mit einem Distanzsensord (C) gemessen, der von einem Arduino als speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) (D) ausgelesen wird. Dieser steuert über einen Regelkreis einen Druckluftherzeuger (E) an, der die Druckkammern mit einem Druck über pneumatische Leitungen (F) versorgt. Wirkt auf die Platte eine Auflast, kann somit der dadurch verursachten Durchbiegung entgegengewirkt werden. Bei Reduzierung der Last kann über ein entsperresbares Rückschlagventil (G) automatisch Druck abgelassen und damit die Durchbiegung angepasst werden. Um einen Überdruck zu verhindern, wird der Luftdruck im System ebenfalls elektronisch erfasst (H).

4 Einordnung der Vorgehensweise in Honold et al. (2019b)

Wenn man die in Kapitel 3 vorgestellte und in Bild 4 zusammengefasste Vorgehensweise wie in Bild 8 gezeigt weiter verdichtet, kann eine Übereinstimmung mit der in Bild 3 gezeigten Vorgehensweise nach Honold et al. (2019b) festgestellt werden. Dies zeigt, dass die für gesamte Tragwerke entwickelte Methodik durch geeignete Anpassung auch auf das einzelne Tragwerkelement übertragen werden kann. Wesentlicher Unterschied ist, dass die scharfe Trennung zwischen Anforderungsdefinition und Konzeptphase aufgelöst werden muss. Die variierten Punkte sind kursiv geschrieben. Die hier gewonnenen Erkenntnisse gelten vorerst nur für das Untersuchungsobjekt adaptive Stahlbetonplatte und die hierfür festgelegten Randbedingungen. Die Übertragbarkeit auf andere Tragwerkelemente ist noch zu prüfen. Erwartet werden Abweichungen der hier erarbeiteten Ausprägungen des Aktuierungs- und Aktorkonzepts. Die hier festgestellte gegenseitige Beeinflussung wird auch für die noch zu entwickelnde Vorgehensweise für die Entwurfsphase erwartet.

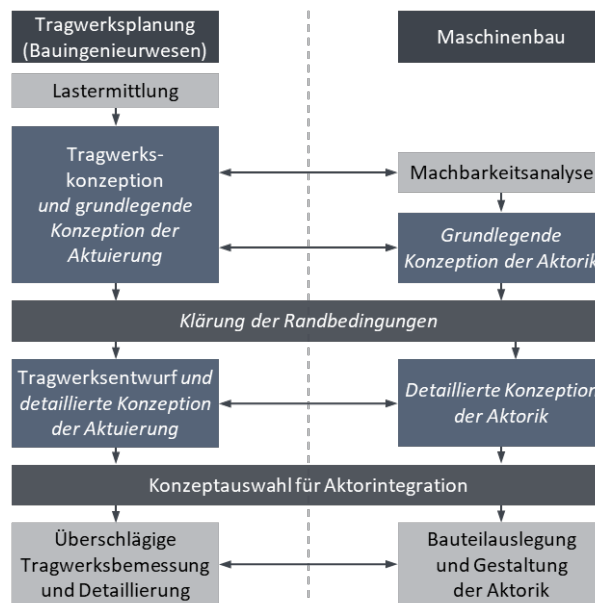


Bild 8: Mögliche Verdichtung der vorgestellten Vorgehensweise zur Entwicklung einer adaptiven Platte mit Einordnung in die Vorgehensweise nach Honold et al. (2019b)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Adaptive Gebäude bieten in Zukunft einen Beitrag zur Einsparung von Ressourcen und Emissionen im Bauwesen. Wesentlich sind dabei adaptive Tragwerkelemente, bei denen Aktoren direkt in das Element integriert werden. Bei der Entwicklung des Tragwerkelements ist eine enge Abstimmung zwischen den Disziplinen Bauingenieurwesen und Maschinenbau notwendig. In diesem Beitrag wurde eine Vorgehensweise zur Konzeption adaptiver Tragwerkelemente anhand des Beispiels einer adaptiven Geschossdecke vorgestellt, die unter Nutzung des Concurrent Engineering in Anlehnung an Honold et al. (2019b) angewendet wurde. Relevante Schlüsselstellen der Vorgehensweise wurden identifiziert sowie eine beispielhafte Umsetzung eines Konzepts in Form eines Schaumstoffmodells vorgestellt. Bei Betrachtung eines einzelnen Tragwerkelements muss insbesondere die Interaktion zwischen Bauingenieurwesen und Maschinenbau nochmals deutlich vertiefter erfolgen. Maßgebliche Abhängigkeiten sind dabei die erwünschte Einbausituation und die Lastbedingungen, sowie die daraus resultierenden Anforderungen an einen Aktor. Daraus ergibt sich eine Einschränkung des Lösungsraums für das Aktorkonzept. Eine weitere Abhängigkeit ist der Wirkungsbereich des Aktors innerhalb des Tragwerkelements. Dieser hat direkte Auswirkungen auf das Aktuierungskonzept. Außerdem sollte das Ziel sein, die Komplexität des Gesamtsystems „adaptive Platte“ möglichst gering zu halten, woraus

Abwägungen zwischen Aktuierungs- und Aktorkonzept erfolgen. Insgesamt zeigt sich, dass die Vorgehensweise in die von Honold abgeleitete Methodik integriert werden kann, so dass diese sowohl für das gesamte Tragwerk als auch das einzelne Tragwerkselement anwendbar ist.

In folgenden Schritten kann untersucht werden, ob sich die Vorgehensweise für die Konzeption adaptiver Tragwerkselemente verallgemeinern lässt. Auch steht die Erweiterung auf die Entwurfsphase noch aus. Des Weiteren soll in Folgearbeiten eine Umsetzung der Aktuierungs- und Aktorkonzepte in konkrete Funktionsmuster aus Stahl (Aktoren) und Beton (Geschossdecke) erfolgen. Dabei lassen sich voraussichtlich Optimierungen auf methodischer sowie technologischer Seite ableiten, um in einem nächsten Schritt ein Funktionsmuster im realen Maßstab einer Geschossdecke des Demonstrator-Hochhauses D1244 umzusetzen. Weitere Untersuchungen können sich konkret mit der Erforschung der Aktorwirkprinzipien und Aktorwirkstrukturen für die Aktuierungsprinzipien beschäftigen.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 279064222 – SFB 1244

Literatur

- Battisti et al. 2019 BATTISTI, Alessandra; PERSIANI, Sandra; CRESPI, Manuela: Review and Mapping of Parameters for the Early Stage Design of Adaptive Building Technologies through Life Cycle Assessment Tools. In: *Energies* 12 (2019), Nr. 9
- Blandini et al. 2022 BLANDINI, Lucio; HAASE, Walter; WEIDNER, Stefanie; BÖHM, Michael; BURGHARDT, Timon; ROTH, Daniel; SAWODNY, Oliver; SOBEK, Werner: D1244: Design and Construction of the First Adaptive High-Rise Experimental Building. In: *Frontiers in Built Environment* 8 (2022)
- Borschewski et al. 2022 BORSCHESKI, David; ALBRECHT, Stefan; BISCHOFF, Manfred; BLANDINI, Lucio; BOSCH, Matthias; DAZER, Martin; EFINGER, Dshamil; EISENBARTH, Christina; HAASE, Walter; KREIMEYER, Matthias; LEISTNER, Philip; NITZLADER, Markus; ROTH, Daniel; SAWODNY, Oliver; VAN DEN ADEL, Friederike; VOIGT, Michael; WEBER, Simon: Ökobilanzierung adaptiver Hüllen und Strukturen. In: *Bautechnik* 99 (2022), Nr. 10, S. 731–745
- Bosch et al. 2022a BOSCH, M. J.; NITZLADER, M.; BURGHARDT, T.; BACHMANN, M.; BINZ, H.; BLANDINI, L.; KREIMEYER, M.: Effective range of integrated fluidic actuators in structural elements. In: *15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII): CIMNE, 2022.*
- Bosch et al. 2022b BOSCH, M.; NITZLADER, M.; BURGHARDT, T.; BACHMANN, M.; BINZ, H.; BLANDINI, L.; KREIMEYER, M.: Design of integrated fluidic actuators for multi-axial loaded structural elements. In: *8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering: CIMNE, 2022.*
- Burghardt et al. 2022 BURGHARDT, T.; KELLETER, C.; BOSCH, M.; NITZLADER, M.; BACHMANN, M.; BINZ, H.; BLANDINI, L.; SOBEK, W.: Investigation of a large-scale adaptive concrete beam with integrated fluidic actuators. In: *Civil Engineering Design* 4 (2022), 1-3, S. 35–42
- Ehrlenspiel et al. 2017 EHRENSPIEL, Klaus; MEERKAMM, Harald: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Wien: Hanser, 2017.

- Honold et al. 2019a HONOLD, C.; FISCHER, S.; ROTH, D.; BINZ, H.: Methodenlandkarte zur Auswahl von Produktentwicklungsmethoden im interdisziplinären Kontext. In: BINZ, H.; BERTSCHE, B.; BAUER, W.; RIEDEL, O.; SPATH, D.; ROTH, D. (Hrsg.): Stuttgart Symposium für Produktentwicklung SSP 2019, 2019, S. 143–152
- Honold et al. 2019b HONOLD, C.; LEISTNER, S.; ROTH, D.; BINZ, H.; SOBEK, W.: Anforderungen in der Entwurfsphase des integralen Planungsprozesses adaptiver Gebäude. In: BINZ, H.; BERTSCHE, B.; BAUER, W.; RIEDEL, O.; SPATH, D.; ROTH, D. (Hrsg.): Stuttgart Symposium für Produktentwicklung SSP 2019, 2019, S. 203–212
- Juaristi et al. 2020 JUARISTI, Miren; KONSTANTINOVA, Thaleia; GÓMEZ-ACEBO, Tomás; MONGE-BARRIO, Aurora: Development and Validation of a Roadmap to Assist the Performance-Based Early-Stage Design Process of Adaptive Opaque Facades. In: Sustainability 12 (2020), Nr. 23, S. 1–27
- Kelleter 2022 KELLETER, C.: Untersuchungen zur Manipulation des Lastabtrages biegebeanspruchter Betonbauteile durch integrierte fluidische Aktoren. 2022
- Kelleter et al. 2020 KELLETER, C.; BURGHARDT, T.; BINZ, H.; BLANDINI, L.; SOBEK, W.: Adaptive Concrete Beams Equipped With Integrated Fluidic Actuators. In: Frontiers in Built Environment 6 (2020)
- Nitzlader et al. 2022a NITZLADER, M.; BOSCH, M.; BINZ, H.; KREIMEYER, M.; BLANDINI, L.: Actuation of concrete slabs under bending with integrated fluidic actuators. In: 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII): CIMNE, 2022.
- Nitzlader et al. 2022b NITZLADER, M.; STEFFEN, S.; BOSCH, M. J.; BINZ, H.; KREIMEYER, M.; BLANDINI, L.: Designing Actuation Concepts for Adaptive Slabs with Integrated Fluidic Actuators Using Influence Matrices. In: CivilEng 3 (2022), Nr. 3, S. 809–830
- Sobek et al. 2021 SOBEK, Werner; SAWODNY, Oliver; BISCHOFF, Manfred; BLANDINI, Lucio; BÖHM, Michael; HAASE, Walter; KLETT, Yves; MAHALL, Mona; WEIDNER, Stefanie; BURGHARDT, Timon; LEISTNER, Philip; MAIERHOFER, Mathias; PARK, Sumee; REINA, Guido; ROTH, Daniel; TARÍN, Cristina: Adaptive Hüllen und Strukturen. In: Bau-technik 98 (2021), Nr. 3, S. 208–221. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bate.202000107>
- VDI 2206 2021 VDI 2206. November 2021. VDI/VDE 2206, Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)
- VDI 2221 Blatt 1 2019 VDI 2221 Blatt 1. 2019. Entwicklung technischer Produkte und Systeme
- Voigt et al. 2021 VOIGT, Michael; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg: Challenges with Adaptive Façades - a Lifecycle Perspective. In: ABBATE, Cinzia; BRIDGENS, Ben; BURROUGHS, Steve; FREY, David; GARRISON, Michael (Hrsg.): 16th Advanced Building Skins Conference & Expo, 2021, S. 459–468
- Voigt et al. 2022 VOIGT, M. P.; ROTH, D.; KREIMEYER, M.: Main Characteristics of Adaptive Façades. In: Proceedings of the Design Society 2 (2022), S. 2543–2552
- Weidner et al. 2018 WEIDNER, Stefanie; KELLETER, Christian; STERNBERG, Paula; HAASE, Walter; GEIGER, Florian; BURGHARDT, Timon; HONOLD, Clemens; WAGNER, Julia; BÖHM, Michael; BISCHOFF, Manfred; SAWODNY, Oliver; BINZ, Hansgeorg: The implementation of adaptive elements into an experimental high-rise building. In: Steel Construction 11 (2018), Nr. 2, S. 109–117

Stakeholderbeteiligung im Sprint Review bei der agilen Produktentwicklung mechatronischer Systeme

Stakeholder participation in Sprint Review in agile product development of mechatronic systems

Daniel Ankele¹, Katharina Duehr², Albert Albers¹, Nikola Bursac²

¹Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe
daniel.ankele@student.kit.edu

²Technische Universität Hamburg, Institut für smarte Entwicklung und Maschinenelemente, Hamburg
nikola.bursac@isem-tuhh.de

Abstract (deutsch): In dieser Forschungsarbeit werden 39 Maßnahmen zur Steigerung der Stakeholderbeteiligung während des Sprint Reviews im Rahmen der agilen Produktentwicklung eines mechatronischen Systems vorgestellt. Durch die Anwendung von 15 Maßnahmen wird der Effekt auf die Stakeholderbeteiligung einer realen Produktentwicklung in einem industriellen Umfeld gezeigt. Die Maßnahmen sind zum Beispiel *Selbstvorstellung der Stakeholder im Sprint Review*, *Umstellung der Beitragsreihenfolge*, *Einführung einer im Voraus veröffentlichten Agenda* oder *aktive Aufforderung zur Beteiligung*. Abschließend werden die Maßnahmen in einer weiteren Studie einzeln von den Stakeholdern bezüglich ihres Aufwand und Nutzen bewertet. Es zeigt sich, dass durch die eingeführten Maßnahmen die Redezeit der Stakeholder um 41,6% und die Anzahl der sich beteiligenden Stakeholder um 48,0% gesteigert werden konnte. Weiter wird veranschaulicht, dass für diese Steigerung mehrere Maßnahmen notwendig sind, da jeder Stakeholder unterschiedlich auf eine Maßnahme reagiert. Abschließend wird ein Ausblick gegeben, wie die Forschung im Bereich der Stakeholderbeteiligung im Rahmen eines Sprint Reviews weitergeführt werden kann.

Keywords (deutsch): Stakeholder, Agile Produktentwicklung, Scrum, Sprint Review

Abstract (english): This research paper presents 39 measures for increasing stakeholder participation during Sprint Review within the agile product development of a mechatronic system. Based on 15 selected measures, the effect on stakeholder participation in real product development in an industrial environment is shown. The measures are, for example, *self-introduction of stakeholders in the sprint review*, *change of contribution order*, *introduction of an agenda published in advance* or *active invitation to participate*. Finally, the measures are evaluated individually by the stakeholders regarding their benefits and efforts in a further study. It is shown that stakeholder participation in terms of speaking time is increased by 41,6% and the number of participating stakeholders is increased by 48,0% as a result of the introduced measures. It is further illustrated that multiple different measures are necessary for this increase, since each stakeholder reacts to and evaluates the benefits of a measure differently. At the end, the outlook shows how research in the area of stakeholder participation can be continued within the context of a Sprint Review.

Keywords (english): Stakeholder, Agile product development, Scrum, Sprint Review

1 Einleitung

Um ein Produkt erfolgreich am Markt zu platzieren, müssen zu verschiedenen Zeiten im Produktentwicklungsprozess die richtigen Entscheidungen wie z.B. bezüglich benötigter Funktionen, erforderlicher Qualität und der maximalen Kosten für bestimmte Bauteile getroffen werden. Diese Entscheidungen sind abhängig von den am Entscheidungsprozess beteiligten Personen. In einer Studie belegen Nakata und Im (2010), dass bei einer Produktentwicklung eine funktionsübergreifende Zusammenarbeit von Personen mit unterschiedlichen Ausrichtungen und Fachkenntnisse das Produkt verbessert. Die Voraussetzung dafür ist, dass alle Personen die Möglichkeit haben, sich adäquat beteiligen zu können. In der agilen Entwicklungsmethodik Scrum ist dafür das sich regelmäßig wiederholende Sprint Review vorgesehen. In diesem Termin werden von allen Projektbeteiligten das bis zu diesem Zeitpunkt entstandene Produkt bewertet und das weitere Vorgehen diskutiert (Schwaber et al. 2020). Es zeigt sich, dass durch ein falsches Verständnis vom Sprint Review oder keiner guten Einbindung der Teilnehmenden, die Interaktion leidet (Burkhard et al. 2015).

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Validierung in der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung ist ein Prozess, welche die Erfassung sowie Interpretation der Kundenbedürfnisse, Umsetzung in ein Produkt und die abschließende Produktion umfasst (Albers et al. 2017). Dies ist durch kontinuierliche Unsicherheit geprägt (Albers et al. 2019). Als Unsicherheit wird die Unfähigkeit verstanden, zukünftige Ergebnisse aufgrund der Differenz von notwendigen Informationen zu den tatsächlich vorhandenen Informationen vorherzusagen (Olausson et al. 2010). Die Validierung ist nach Albers et al. (2016) daher die zentrale Aktivität, welche den Prozess steuert und fortlaufend ausgeführt werden muss. Kontinuierliche Validierung, wie sie zum Beispiel im Scrum Framework vorkommt, unterstützt die Entwickelnden im Umgang mit den Unsicherheiten und damit in der kontinuierlichen Reduzierung der Unsicherheiten.

Die Notwendigkeit einer frühen und fortlaufenden Validierung ergibt sich durch steigende Änderungskosten im fortschreitenden Entwicklungsprojekt. Plakatativ wird dies durch die "Rule of Ten" beschrieben, welche eine Kostensteigerung um Faktor zehn in jeder weiteren Entwicklungsphase vorsieht (Ehrlenspiel et al. 2017 basierend auf Clark et al. 1992). Um Änderungsbedarfe zu entdecken, sollten Vertreter aus internen Bereichen wie z.B. Produktion und Einkauf in die Validierung einbezogen werden. Weiter sollte Feedback von Kunden eingeholt werden, da die Kundenzufriedenheit welche vom Produkt ausgehen soll, insbesondere aus der Perspektive vom Kunden bewertet werden kann (Nörr 2016). Neben dem Aufwand besteht jedoch die Gefahr, dass dabei Wissen aus dem Unternehmen nach außen dringt und Wettbewerbern einen Vorteil bereitet (Nörr 2016). Ist die Einbindung von Kunden daher nicht möglich, können interne Abteilungen mit engem Kundenkontakt wie z.B. Vertrieb und Service diese Rolle einnehmen.

In einer Zeit, in der Kundenansprüche steigen und neue Funktionen in immer kürzeren Zeiten entwickelt werden müssen, stellt das Unternehmen vor immer größere Herausforderungen (Bögemann 2018). Unternehmen reagieren darauf, mit der Implementierung von neuen Entwicklungsmethoden (Nicklas et al. 2021).

2.2 Einführung agiler Methoden und Herausforderung in der Zusammenarbeit

Unternehmen implementieren agile Methoden in ihren Entwicklungsprozessen, um von den dahinter liegenden Prinzipien wie z.B. selbst organisierende Teams zu profitieren (Beck et al. 2001). Unter anderem lassen sich nach der Einführung die folgenden Veränderungen beobachtet (Atzberger et al. 2020):

- Verbesserte teaminterne Kommunikation
- Erhöhte Flexibilität um auf Änderungen zu reagieren
- Verbesserte Produktqualität
- Verbesserte Befriedigung der Kundenbedürfnisse
- Verkürzte Produktentwicklung

Ursprünglich für die Entwicklung von Software Produkten konzipiert (Gloger 2016), halten agile Methoden trotz Herausforderungen (Zimmermann et al. 2019) beim Übertrag in andere Produktkategorien Einzug. Bei der Entwicklung von einem mechatronischem System, kann aus verschiedenen agilen Methoden wie zum Beispiel Scrum, Design-Thinking oder Lean Start-Up ausgewählt werden (Heimicke et al. 2019). Nach einer Studie zu agiler Entwicklung bei physischen Produkten in mehrheitlich deutschen Unternehmen im Bereich Maschinen- und Anlagenbau sowie Fahrzeug- und Verkehrstechnik ist Scrum die verbreitetste agile Methodik (Nicklas et al. 2021).

Das Sprint Review ist ein Event innerhalb von Scrum, dass am Ende jedes Sprints stattfindet. Im Sprint Review treffen Stakeholder und Scrum Team aufeinander, um das im Sprint entstandene Inkrement zu validieren. Das Scrum Team umfasst Entwickler, Product Owner sowie Scrum Master (Schwaber et al. 2020). Es ist verantwortlich für alle produktbezogenen Aktivitäten wie z.B. Entwicklung, Betrieb und Zusammenarbeit mit den Stakeholdern. Stakeholder sind Personen, welche vom Projektergebnis betroffen sind, aber im Entwicklungsprojekt nicht aktiv mitarbeiten wie z.B. Nutzer, Vertrieb und Service (Pichler 2008).

Der Austausch der beiden Parteien und das Feedback der Stakeholder zum Inkrement in Bezug auf das Produktziel, bildet die Basis für die nächsten Sprints und die Weiterentwicklung des Produkts. Die Interaktion zwischen Scrum Team und Stakeholder ist daher das zentrale Element beim Sprint Review. Im Scrum Guide (Schwaber et al. 2020) wird speziell darauf hingewiesen, dass das Sprint Review ein Arbeitstermin ist. In einer Interview Studie (Burkhard et al. 2015) zur erfolgreichen Zusammenarbeit in agilen Teams wird von wenig gelungenen Sprint Reviews berichtet, bei denen der Grund die fehlende Interaktion unter den Teilnehmenden war. Weiter ist festgehalten, dass sich die Interaktion erhöhte, sobald die Teilnehmenden stärker im Termin involviert wurden. Die quantitative Beteiligung der Teilnehmenden ist somit ein Aspekt, der zeigt, wie erfolgreich ein Sprint Review ist.

2.3 Stakeholdermanagement in einem Entwicklungsprojekt

Um Stakeholder in einem Entwicklungsprojekt zu integrieren und für das Projekt zu befähigen, gibt es das Stakeholdermanagement. Nach Miller und Oliver (2015) erfolgt dies in einem 3 stufigen Ansatz:

1. Stakeholder-Karte
2. Stakeholder Priorisierung
3. Stakeholder Entwicklung

Der erste Schritt beschäftigt sich mit der Erstellung einer Stakeholder-Karte. Hier werden alle Stakeholder identifiziert und z.B. in einem Beziehungsdiagramm dargestellt. Im zweiten Schritt werden die identifizierten Stakeholder gegenüber dem Projekt eingeordnet. Es ist wichtig zu verstehen, welchen Einfluss ein Stakeholder auf das Projekt hat und welche Absichten oder auch Interessen verfolgt werden. Im dritten Schritt werden Stakeholder befähigt mehr Feedback geben zu können.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Zielsetzung

Nach Albers et al. (2016) ist die fortlaufende Validierung vom entstehenden Produkt die zentrale Aktivität während einer Produktentwicklung. Die agile Entwicklungsmethodik Scrum bietet dazu im Sprint Review die Gelegenheit. Im Sprint Review treffen die Stakeholder sowie das Scrum Team

aufeinander, um das bisher entwickelte Produkt zu bewerten und das weitere Vorgehen zu diskutieren (Schwaber et al. 2020). Die Stakeholder bringen dabei ihre Expertise aus den jeweiligen Arbeitsgebieten ein. Das Sprint Review ist daher ein wichtiges Event mit großem Einfluss auf das entstehende Produkt.

Da das Sprint Review vom Scrum Team inhaltlich und organisatorisch gestaltet wird, müssen vor allem die Stakeholder in die Lage versetzt werden sich beteiligen zu können. Eine bessere Einbindung und damit mögliche Steigerung der Stakeholderbeteiligung, bietet daher ein großes Potenzial für ein Produkt mit höherer Kundenzufriedenheit. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen daher Maßnahmen zur Steigerung der Stakeholderbeteiligung anhand einer realen Produktentwicklung im industriellen Umfeld identifiziert und angewendet werden. Für diese Untersuchung ist eine Produktentwicklung eines mechatronischen Systems sehr geeignet, da es aufgrund der Komplexität viele involvierte Stakeholder gibt. Entsprechend lässt sich für diese Forschungsarbeit folgende Zielsetzung ableiten:

Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Steigerung der Stakeholderbeteiligung im Rahmen vom Sprint Review einer agilen Produktentwicklung eines mechatronischen Systems zur Validierung des entstehenden Produkts.

3.2 Forschungsfragen

Basierend auf der Zielsetzung, werden folgende drei Forschungsfragen zur Gliederung des Forschungsvorhabens formuliert:

1. Welche Faktoren beeinflussen die Stakeholderbeteiligung in einem Sprint Review?
2. Wie ist ein Sprint Review für die Entwicklung eines mechatronischen Systems zu gestalten, um die Stakeholderbeteiligung zu steigern?
3. Welchen Effekt haben die eingeführten Maßnahmen auf die Stakeholderbeteiligung im Sprint Review und wie ist das Verhältnis zum Aufwand?

3.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise folgt dem Ansatz der Design Research Methodology (nachfolgend auch mit "DRM" abgekürzt) nach Blessing und Chakrabarti (2009).

Die Daten wurden innerhalb der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG während der fortlaufenden Entwicklung der Laserschweißanlage TruLaser Weld 5000 erhoben. Der betrachtete Zeitraum umfasste insgesamt 16 Monate.

4 Einflussfaktoren für die Stakeholderbeteiligung im Sprint Review

Im Rahmen einer deskriptiven Studie, wurden 19 Stakeholder der TruLaser Weld 5000, mittels eines Interviews zu ihren Eindrücken des betreffenden Sprint Reviews befragt. Bei den Stakeholdern handelte es sich um Personen innerhalb der Firma, die vom Produkt betroffen sind wie z.B. Vertrieb, Produktmanagement und Service. Der Fragebogen enthielt 48 Fragen zu den Kategorien *Anwesenheit*, *Beteiligung* sowie *Inhalt*. In der Kategorie *Beteiligung* wurde zum Beispiel gefragt, in welcher Form sich ein Stakeholder am Sprint Review beteiligen möchte oder was sich generell verändern müsste, um die eigene Beteiligung steigern zu können.

Mit den Antworten wurde das in Bild 1 dargestellte Datenstrukturdiagramm erstellt. Im Diagramm sind die einzelnen Faktoren zur Beeinflussung der Stakeholderbeteiligung dargestellt. Die Faktoren basieren auf den Antworten der Stakeholder. Die Antworten sind teilweise gebündelt und einem

Faktor zugeordnet. Pfeile, welche einzelne Faktoren verbinden, symbolisieren Zusammenhänge sowie Abhängigkeiten. Die Faktoren lassen sich in die folgenden zehn Bereiche gruppieren: (1) *Moderation*, (2) *Inhalt*, (3) *Voraussetzung Beteiligung*, (4) *Beteiligung*, (5) *Teilnahme* (6) *Vorbereitung*, (7) *Absicht*, (8) *Framework*, (9) *Atmosphäre* und (10) *Ablauf*.

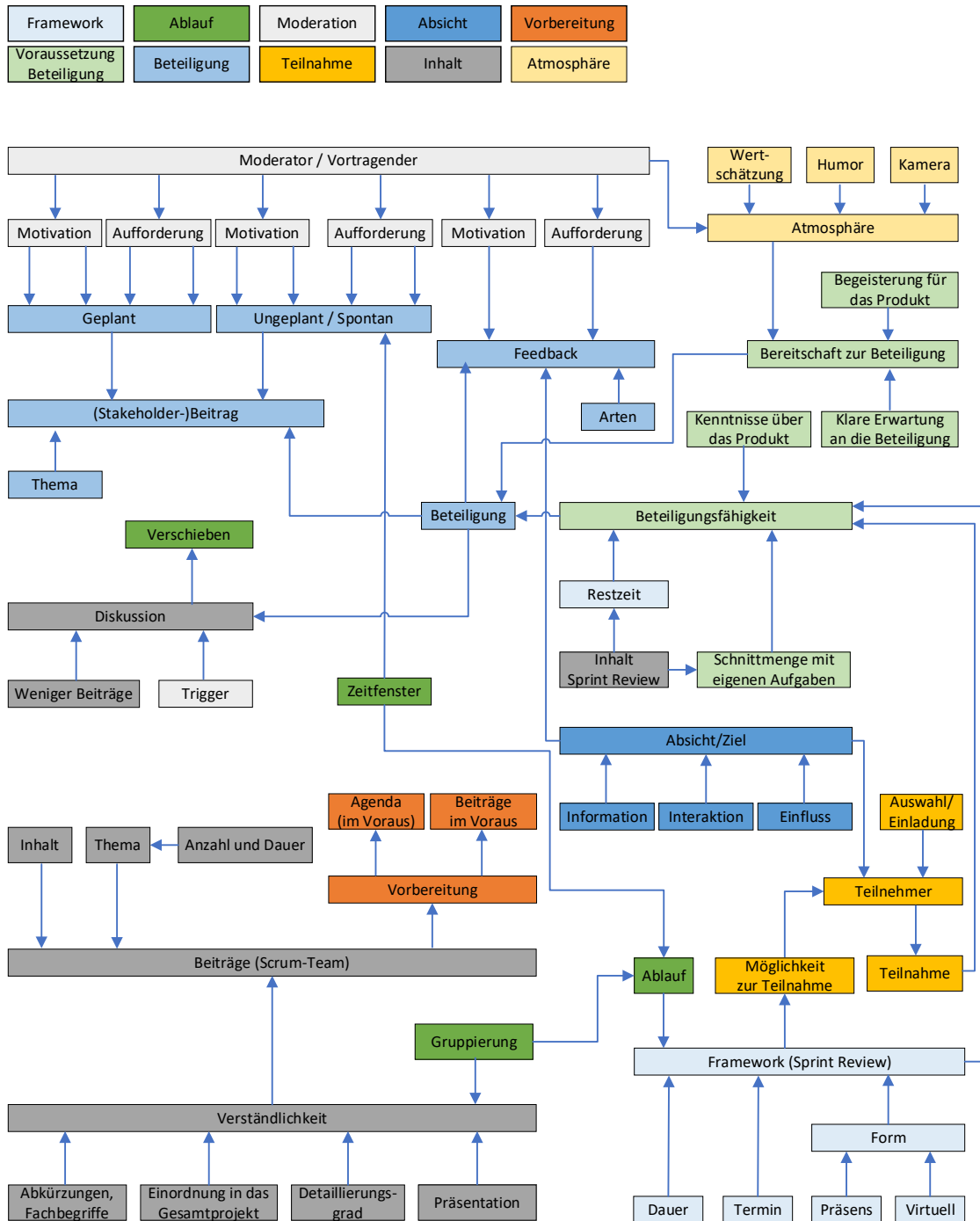


Bild 1: Einflussfaktoren und Zusammenhänge der Stakeholder-Beteiligung im Sprint Review

Die deskriptive Studie zeigt, dass es viele Faktoren aus unterschiedlichen Bereichen gibt, welche die Stakeholderbeteiligung beeinflussen.

5 Sprint Review Design für eine stärkere Stakeholderbeteiligung

In den zehn identifizierten Bereichen von Kapitel 4, wurden insgesamt 39 Maßnahmen zur Steigerung der Stakeholderbeteiligung im Sprint Review entwickelt. Ein Überblick ist in Bild 2 dargestellt.

Nr.	Framework	Nr.	Beteiligung
1	Termin virtuell via Videokonferenz durchführen	20	Diskussion auf einen extra Termin verschieben wenn dieser zu lange dauert oder zu detailliert ist
2	Termin am Nachmittag	21	Art von Feedback je nach Ziel auswählen (z.B. Umfrage oder Gespräch)
3	Dauer des Termins so kurz wie möglich	22	Umfragen namentlich durchführen um nachfragen zu können
4	Wiederholende Rahmenbedingungen z.B. immer gleiche Zeit und gleicher Ort (Dräther et al. 2019)		
Nr.	Ablauf	Nr.	Teilnahme
5	Zeitslot für spontane Beiträge vorsehen	23	Stakeholder um Teilnahme bitten welche wichtig sind für z.B. Entscheidungen oder Feedback (Pichler 2017)
6	Beiträge in Abhängigkeit des Projekts gruppieren (z.B. Teilprojekte)	24	Alle interessierte Personen aus dem Projekt die Teilnahme am Sprint Review ermöglichen
Nr.	Moderation	Nr.	Inhalt
7	Teilnehmende für Beteiligung auffordern und motivieren	25	Vorstellung eines Ausblick auf die Ziele und Schwerpunkte des kommenden Sprints
8	Teilnehmende ab einer gewissen Teilnehmerzahl persönlich Ansprechen für z.B. Feedback	26	Keine Abkürzungen oder Fachbegriffe verwenden
9	Scrum Master übernimmt die Moderation (Pichler 2008)	27	Glossar für Abkürzungen und Fachbegriffe zu Verfügung stellen
10	Teilnehmende zu kritischem Feedback ermuntern (Pichler 2017)	28	Möglichkeit zur Klärung von Fragen während Sprint Review anbieten z.B. Chat
11	Teilnehmende die Möglichkeit zur Beteiligung ermöglichen (Pichler 2017)	29	Beiträge verständlich präsentieren
Nr.	Absicht	30	Ersteller eines Beitrags präsentiert und steuert (die Folien) selbst
12	Für die Notwendigkeit einer aktiven Beteiligung sensibilisieren	31	Abgleich von Inhalt und Präsentation eines Beitrags auf die Stakeholder
Nr.	Vorbereitung	32	Allgemeine Infos zum Projekt in einem Projektcockpit zusammenfassen
13	Agenda zum Ablauf erstellen und im Voraus veröffentlichen	33	Anpassung vom Detaillierungsgrad der Beiträge auf die Stakeholder (Wald 2020)
14	Beiträge im Voraus veröffentlichen	34	Anpassung des Detaillierungsgrad eines Beitrags auf das Ziel vom Beitrag
15	Themen welche die Teilnehmenden betreffen, im Voraus ankündigen z.B. Kamera einschalten (Motte 2021)	35	Einen detaillierten Beitrag so kurz wie möglich halten. Die Einleitung für alle verständlich halten
Nr.	Beteiligung Voraussetzung	36	Beiträge mit Bilder und Videos ausstatten
16	Erwartungen zur Beteiligung mit den Teilnehmenden klären	37	Zwischenberichte bei lange laufenden Aufgaben
17	Definition vom Sprint Review und Aufgabe innerhalb Scrum erklären		
18	Bereitschaft zur Beteiligung stimulieren	Nr.	Atmosphäre
19	Informationsveranstaltungen über das Produkt anbieten	38	Einschalten der Kamera immer freiwillig
		39	Unterschiedliche Standpunkte zulassen

Bild 2: Maßnahmen zur Beeinflussung der Stakeholderbeteiligung

6 Anwendung der Maßnahmen im Sprint Review

Zur Evaluation der Maßnahmen von Kapitel 5, wurden in einer zweiten deskriptiven Studie die in Bild 7 aufgeführten 15 Maßnahmen im Sprint Review der TruLaser Weld 5000 angewendet. Die Auswahl der Maßnahmen erfolgte subjektiv. Die Maßnahmen wurden über einen Zeitraum von fünf Monaten schrittweise eingeführt. Zum Vergleich dienten die Sprint Reviews über einen Zeitraum von elf Monaten ohne Maßnahmen davor. Mittels einer Videoanalyse, welche insgesamt 25 Stunden aufgenommene Videos umfasste, wurden die Sprint Reviews bezüglich der Stakeholderbeteiligung vor sowie während der neu eingeführten Maßnahmen analysiert.

Die Analyse bezieht sich auf dieselben 19 Stakeholder, welche bei der ersten deskriptiven Studie in Kapitel 4 teilgenommen haben. Zu jedem Sprint Review waren diese zur Teilnahme eingeladen. In Bild 3 ist die Teilnahme der Stakeholder in den Sprint Reviews dargestellt. Die Bandbreite beträgt im analysierten Zeitraum zwischen 8 und 14 Stakeholder je Sprint Review. Im Zeitraum vor sowie während den Maßnahmen nehmen im Durchschnitt jeweils 10,9 Stakeholder an einem Sprint Review teil.

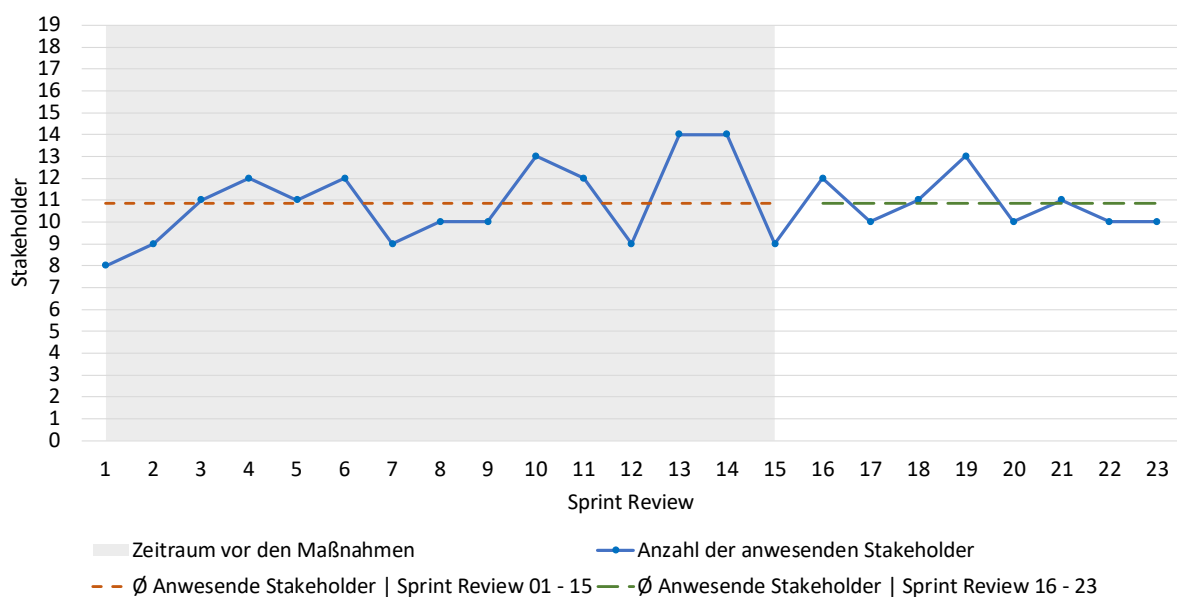


Bild 3: Anzahl der anwesenden Stakeholder in den Sprint Reviews

6.1 Beteiligung

In Bild 4 wird die Anzahl der teilnehmenden Stakeholder im Sprint Review mit mindestens einer Beteiligung dargestellt. Ziel ist es, die Varianz der Stakeholderbeteiligung im Sprint Review zu messen. Die Beteiligung der Stakeholder zeigte sich in den folgenden vier Arten:

- **Geplanter Beitrag:** Beitrag eines Stakeholders während des Sprint-Reviews. In der Regel geht die Initiative vom Product Owner aus, der den Stakeholder im Vorfeld motiviert, einen Beitrag zu leisten.
- **Ungeplanter Beitrag:** Spontaner Beitrag eines Stakeholders während des Sprint-Reviews. Neues Thema, das im Sprint Review nicht behandelt wurde. Initiative kommt vom Stakeholder.
- **Feedback:** Verbales Feedback während des Sprint Review. Dies sind meist Fragen, Hinweise oder Ergänzungen zu einem Beitrag.
- **E-Mail:** In der Regel von nicht anwesenden Stakeholdern, die sich die Aufzeichnung des Sprint Reviews im Nachhinein ansehen und per E-Mail Feedback geben.

Da sich die Anzahl der teilnehmenden Stakeholder in jedem Sprint Review unterscheidet, ist die Bezugsgröße in Prozent angegeben. 100% beziehen sich auf die Anzahl der jeweils am Sprint Review

teilnehmenden Stakeholder. Damit wird eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Sprint Reviews möglich.

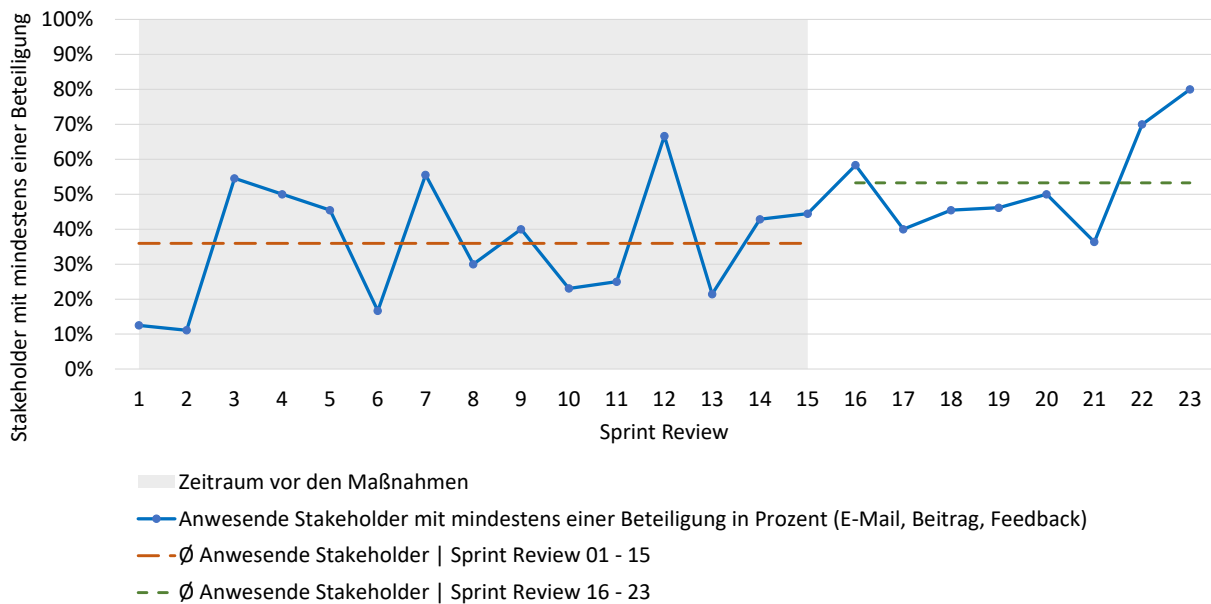


Bild 4: Anteil der Stakeholder mit mindestens einer Beteiligung im Sprint Review

Vor den Maßnahmen liegt der Mittelwert der sich beteiligenden Stakeholdern bei 36,0%. Mit den Maßnahmen bei 53,3%. Dies ist eine Steigerung um 48,0%.

6.2 Feedback

In Bild 5 wird die Feedback Sprechzeit der betrachteten 19 Stakeholder mit den restlichen Teilnehmenden im Sprint Review verglichen. Da die gesamte Feedback Sprechzeit in jedem Sprint Review unterschiedlich ist, wird diese auf jeweils 100% normiert. Damit sind die einzelnen Sprint Reviews miteinander vergleichbar. Die Feedback Sprechzeit ist die Dauer einer Wortmeldung während eines Sprint Reviews. Wortmeldungen sind Fragen, Hinweise oder Ergänzungen zu einem Beitrag.

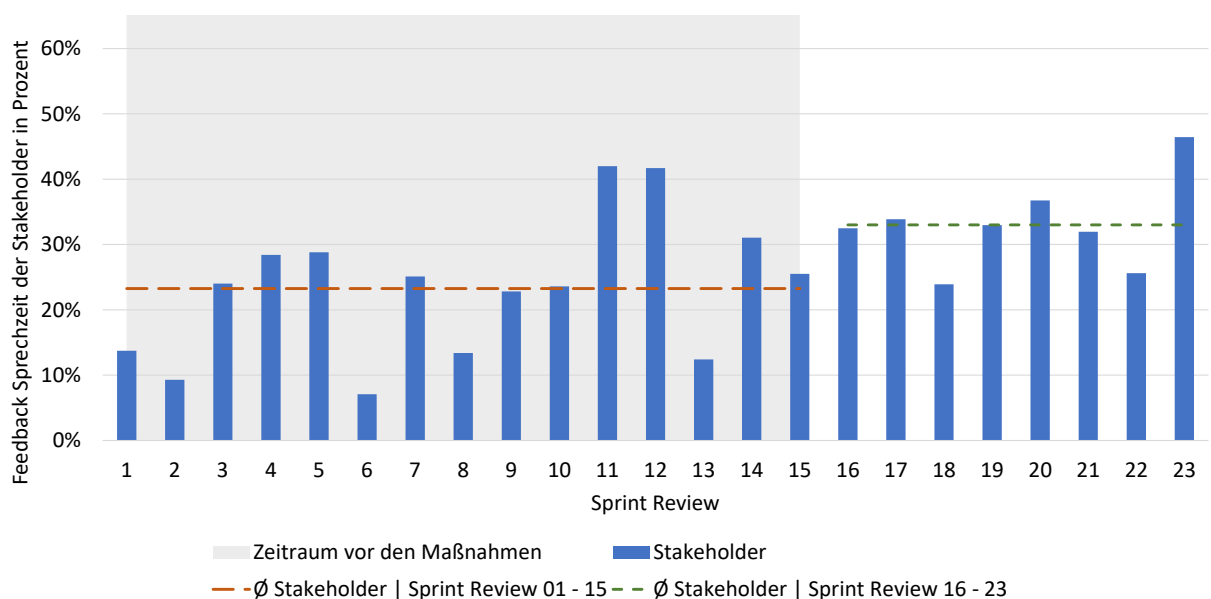


Bild 5: Anteil der Feedback Sprechzeit der Stakeholder im Sprint Review

Der Mittelwert der Feedback Sprechzeit der Stakeholder liegt vor den Maßnahmen bei 23,3%. Während den Maßnahmen ist der Wert auf 33,0% gestiegen. Dies entspricht einer Zunahme um 41,6%.

Bild 6 zeigt die prozentuale Verteilung der Feedback Sprechzeit der 19 Stakeholder über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die drei aktivsten Stakeholder haben einen Anteil von 72,5% der Feedback Sprechzeit. Die anderen Stakeholder haben einen geringen oder keinen Anteil. In einer weiteren Analyse wurden die Verhältnisse vor und während der Maßnahmen untersucht. Es wurden keine bemerkenswerten Veränderungen festgestellt.



Bild 6: Anteil Feedback Sprechzeit einzelner Stakeholder in Sprint Review 1 - 23

6.3 Nutzen und Aufwand der Maßnahmen

In der abschließenden Studie wurden die 15 Maßnahmen auf ihren Nutzen bewertet.

	Stakeholder 1	Stakeholder 2	Stakeholder 3	Stakeholder 4	Stakeholder 5	Stakeholder 6	Stakeholder 7	Stakeholder 8	Stakeholder 9	Stakeholder 10	Stakeholder 11	Ø
Interview	4	4	3	4	3	5	5	4	1	3	4	3,64
Selbstvorstellung Stakeholder	5	2	4	3	4	5	5	4	1	4	2	3,55
Agenda	4	5	5	4	5	5	4	5	3	2	4	4,18
Projektcockpit	5	4	3	4	4	4	5	4	4	5		4,20
Angepasster Inhalt der Beiträge	4	3	4	3	4	4	5	3	4	5	3	3,82
Ausblick auf den nächsten Sprint	5	4	5	4	2	5	5	3	1	5	4	3,91
Definition Sprint Review	4	3	3	4	2	5	5	4	2	1	3	3,27
Gruppierung von Beiträgen	4	4	5	4	5	5	5	3	3	5	4	4,27
Ankündigungen im Voraus	5	3	4	3		5	4	5	2	1	4	3,60
Aufforderung zur Beteiligung	4	3	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4,55
Eigene Beiträge von Stakeholdern	4	3	3	1	3	4	5	3	4	5	3	3,45
Steuerung von Beitrag durch Ersteller	5	2	3	2	1	4	5	2	2	3	4	3,00
Zeitslot um spontan Themen einzubringen	5	4	3	4	1	5	5	4	1	3	4	3,55
Eingeschaltene Kamera	3	2	3	3	4	4	5	2	1	2	1	2,73
Chat	4	2	4	3	3	4	5	5	3	5	3	3,73

1: Geringer Nutzen; 5: Hoher Nutzen (aus Sicht der Stakeholder)

Bild 7: Nutzen und Aufwand der Maßnahmen

Die beteiligten Stakeholder sollten die Maßnahmen von eins bis fünf bewerten. In Bild 7 sind die Ergebnisse dargestellt. Je höher der Wert beim Ergebnis, desto höher ist aus Sicht der Stakeholder der Nutzen für die Stakeholderbeteiligung. In der letzten Spalte ist der Durchschnittswert von den befragten Stakeholdern zu den jeweiligen Maßnahmen dargestellt. Der Aufwand für eine Maßnahme ist über die Reihenfolge dargestellt. Je höher eine Maßnahme in der Tabelle steht, desto größer ist der Aufwand für die Umsetzung. Dieser ist subjektiv bewertet.

Das Ergebnis zeigt, dass die Stakeholder den Nutzen einer Maßnahme unterschiedlich bewerten. Dadurch ergibt sich, dass für eine Steigerung der Stakeholderbeteiligung mehrere unterschiedliche Maßnahmen eingeführt werden sollten, um möglichst viele Stakeholder zu erreichen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In diesem Forschungspapier werden 39 Maßnahmen zur Steigerung der Stakeholderbeteiligung während des Sprint Reviews im Rahmen der agilen Produktentwicklung eines mechatronischen Systems vorgestellt. Anhand einer Studie wird nachgewiesen, dass diese Methoden bei gleichbleibender Anzahl an Stakeholdern zu einer Steigerung der Stakeholderbeteiligung führen. Die Beteiligung der Stakeholder in Bezug auf die Redezeit erhöhte sich um 41,6% und die Anzahl der aktiv teilnehmenden Stakeholder um 48,0%. Weiter wird veranschaulicht, dass für diese Steigerung mehrere Maßnahmen notwendig sind, da jeder Stakeholder unterschiedlich auf eine Maßnahme reagiert.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit legt den Fokus auf die quantitative Steigerung der Stakeholderbeteiligung im Sprint Review. Nicht betrachtet wird die qualitative Auswirkung auf das entstehende Produkt durch die Stakeholderbeteiligung im Allgemeinen sowie bei einer Steigerung. Dies ist in weiteren Studien zu beleuchten.

Eine weitere Möglichkeit um die Stakeholderbeteiligung zu steigern, ist die Gewinnung von neuen internen aber auch externen Stakeholdern, die zusätzlich am Sprint Review teilnehmen. Als Basis können die ersten beiden Schritte vom drei Stufen Modell des Stakeholdermanagement verwendet werden, welche in diesem Forschungspapier vorgestellt wurden. Darauf aufbauend, können die bestehenden Modelle analysiert und weiterentwickelt werden.

Das Ergebnis durch die im Sprint Review neu eingeführten Maßnahmen, bezieht sich auf die Forschungsumgebung der vorliegenden Arbeit. Durch einen Übertrag der Maßnahmen auf weitere Projekte in anderen Umgebungen kann geprüft werden, ob diese auch dort zu einer Steigerung der Stakeholderbeteiligung führen und damit allgemeingültig sind.

Generell erheben die in dieser Arbeit vorgestellten Maßnahmen zur Steigerung der Stakeholderbeteiligung in einem Sprint Review keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Durch weitere Forschung könnten zusätzliche Maßnahmen identifiziert werden.

Weiter können Maßnahmen durch eine isolierte Anwendung auf ihre individuelle Wirksamkeit untersucht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Stakeholder als eine homogene Gruppe betrachtet. In weiteren Analysen könnte diese Gruppe untergliedert werden nach z.B. Hierarchieebenen. Darauf basierend könnte der Effekt der neu eingeführten Maßnahmen auf diese unterschiedliche Personengruppe ausgewertet werden.

Literaturverzeichnis

- Albers et al. 2016 ALBERS, Albert ; BEHRENDT, Matthias ; KLINGLER, Simon ; MATROS, Kevin: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: LINDEMANN, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser, 2016, S. 541–569
- Albers et al. 2017 ALBERS, Albert ; BEHRENDT, Matthias ; KLINGLER, Simon ; REIß, Nicolas ; BURSAC, Nikola: *Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering*. In: *Design Science* 3 (2017)
- Albers et al. 2019 ALBERS, Albert ; HEIMICKE, Jonas ; SPADINGER, Markus ; REIß, Nicolas ; BREITSCHUH, Jan ; RICHTER, Thilo ; BURSAC, Nikola ; MARTHALER, Florian: *Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD - Agile Systems Design*. Karlsruhe, 2019
- Atzberger et al. 2020 ATZBERGER, Alexander ; NICKLAS, Simon. J. ; SCHROF, Julian ; WEISS, Stefan ; PAETZOLD, Kristin: *Agile Entwicklung physischer Produkte : Eine Studie zum aktuellen Stand in der industriellen Praxis*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2020
- Beck et al. 2001 BECK, Kent ; BEEDLE, Mike ; VAN BENNEKUM, Arie ; COCKBURN, Alistair ; CUNNINGHAM, Ward ; FOWLER, Martin ; GRENNING, James ; HIGHSMITH, Jim ; HUNT, Andrew ; JEFFRIES, Ron ; KERN, Jon ; MARICK, Brian ; MARTIN, Robert C. ; MELLOR, Steve ; SCHWABER, Ken ; SUTHERLAND, Jeff ; THOMAS, Dave: *The Agile Manifesto*. URL <https://agilemanifesto.org/principles.html> – Überprüfungsdatum 21.10.2022
- Blessing et al. 2009 BLESSING, Lucienne T. M. ; CHAKRABARTI, Amaresh: *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer, 2009
- Bögemann 2018 BÖGEMANN, Ingo: *Produktlebenszyklen werden immer kürzer, Ihre Entwicklungszeiten auch?* URL <https://www.modularmanagement.com/de/blog/produktlebenszyklen-kuerzer-entwicklungszeiten-geringer> – Überprüfungsdatum 13.10.2022
- Burkhard et al. 2015 BURKHARD, Roger ; GREIWE, Stephanie ; KROPP, Martin ; MATEESCU, Magdalena ; ZAHN, Carmen; VISCHI, Dario (Mitarb.): *Erfolgreiche Zusammenarbeit in agilen Teams : Ergebnisse einer Interview-Studie über Zusammenarbeit, Kommunikation und Koordination sowie den Einsatz von Tools in agilen Software Projekten in der Schweiz.*, 2015
- Clark et al. 2017 CLARK, Kim B. ; FUJIMOTO, Takahiro: *Automobilentwicklung mit System : Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA*. Frankfurt: Campus, 1992
- Dräther et al. 2019 DRÄTHER, Rolf ; KOSCHEK, Holger ; SAHLING, Carsten: *Scrum : kurz & gut*. 2. Aufl. Heidelberg: O'Reilly, 2019
- Ehrlenspiel et al. 2017 EHRENSPIEL, Klaus ; MEERKAMM, Harald: *Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Wien: Hanser, 2017
- Gloger 2016 GLOGER, Boris: *Scrum : Produkte zuverlässig und schnell entwickeln*. 5., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2016
- Heimicke et al. 2019 HEIMICKE, Jonas ; NIEVER, Manuel ; ZIMMERMANN, Valentin ; KLIPPERT, Monika ; MARTHALER, Florian ; ALBERS, Albert: Comparison of existing agile approaches

- in the context of mechatronic system development: potentials and limits in implementation. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*: Cambridge University Press, 2019 (1), S. 2199–2208
- Imming 2012
IMMING, Axel: Produktentwicklung : Innovation – Phrase oder Schaffung nachhaltiger Kundenzufriedenheit? In: KÜNZEL, Hansjörg (Hrsg.): *Erfolgsfaktor Kundenzufriedenheit*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012
- Miller et al. 2015
MILLER, David ; OLIVER, Mike: *Engaging Stakeholders for Project Success*. URL <https://www.pmi.org/learning/library/engaging-stakeholders-project-success-11199>. – Überprüfungsdatum 17.10.2022
- Motte 2021
MOTTE, Petra: *Online moderieren & virtuell gestalten : Der digitale Durchbruch für Ihren Erfolg!* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2021
- Nakata et al. 2010
NAKATA, Cheryl ; IM, Subin: *Spurring Cross-Functional Integration for Higher New Product Performance: A Group Effectiveness Perspective*. In: *Journal of Product Innovation Management* 27 (2010), Nr. 4, S. 554–571
- Nicklas et al. 2021
NICKLAS, Simon J. ; MICHALIDES, Marvin ; ATZBERGER, Alexander ; WEISS, Stefan ; PAETZOLD, Kristin: *Agile Entwicklung physischer Produkte 2021: Eine Studie zum aktuellen Stand in der industriellen Praxis während der COVID-19-Pandemie*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2021
- Nörr 2016
NÖRR, Monika: *Key Learnings aus dem Serial Entrepreneurship*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- Olausson et al. 2010
OLAUSSON, Daniel ; BERGGREN, Christian: *Managing uncertain, complex product development in high-tech firms: in search of controlled flexibility*. In: *R&D Management* 40 (2010), Nr. 4, S. 383–399
- Pichler 2008
PICHLER, Roman: *Scrum : Agiles Projektmanagement erfolgreich einsetzen*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt, 2008
- Pichler 2017
PICHLER, Roman: *Sprint review tips for product owners*. URL <https://www.romanpichler.com/blog/sprint-review-tips-for-product-owners/> – Überprüfungsdatum 08.03.2022
- Schwaber et al. 2020
SCHWABER, Ken ; SUTHERLAND, Jeff: *The Scrum Guide : The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*. URL <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf> – Überprüfungsdatum 19.02.2022
- Wald 2020
WALD, Marc: *Die Automatisierung des Abschlussprozesses – ein praxisbezogener Erfahrungsbericht*. In: *REthinking: Finance* (2020), Nr. 1, S. 25–31.
- Zimmermann et al. 2019
ZIMMERMANN, Valentin ; HEIMICKE, Jonas ; ALINK, Thomas ; DUFNER, Yasmin ; ALBERS, Albert: *Agile Development of Mechatronic Systems: Utopia or Reality - an Evaluation from Industrial Practice*, 2019

Projektspezifischer Einsatz agiler Methoden zur Entwicklung physischer Produkte

Project specific use of agile methods for the design of physical products

Julian Baschin¹, David Schneider¹, Volkan Kizgin¹, Thomas Vietor¹

¹Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik, Braunschweig
j.baschin@tu-braunschweig.de

Abstract (deutsch): Die Branche des Maschinenbaus steht vor der Herausforderung steigender Produktkomplexität. Es resultieren umfangreiche Projekte zur Entwicklung mechatronischer Systeme, die im Rahmen des Projektmanagements geplant werden müssen. Die hohe Dynamik am Markt erfordert eine flexible Anpassungsfähigkeit der Produkte. Agile Methoden adressieren diese Herausforderung. Allerdings unterscheiden sich die Vorgehensweisen bei agilen Methoden aufgrund ihres Ursprungs in der Softwareentwicklung von klassischen Entwicklungsstrukturen im Maschinenbau. Daher sollten agile Methoden vor ihrem Einsatz entsprechend der vorliegenden Entwicklungssituation ausgewählt und angepasst werden. Dies erfolgt in der Praxis aber selten, da agile Methoden in der Entwicklung des Maschinenbaus noch nicht etabliert sind. Ziel des Papers ist daher die Unterstützung des Projektmanagers bei der systematischen Auswahl und Anpassung agiler Methoden. Es wird eine Methodik vorgestellt, die eine projektspezifische Auswahl gängiger agiler Methode ermöglicht. Darauf aufbauend wird ein Maßnahmenkatalog zur Eignungsverbesserung agiler Methoden gezeigt. Die Methodik wird in einem industriellen Entwicklungsprojekt getestet.

Keywords (deutsch):

Agile Methoden, Hybrides Projektmanagement, Produktentwicklung

Abstract (english): The mechanical engineering industry is confronted with the challenge of increasing product complexity. This results in extensive projects for the development of mechatronic systems, which have to be planned and monitored within the context of project management. The high dynamic on the market requires a flexible adaptability of the products. Agile methods address this challenge. However, the procedures for agile methods differ from classic development structures in mechanical engineering, due to their origin in software development. Therefore, agile methods should be selected and adapted according to the existing development situation. In practice, this is rarely done, because agile methods are not yet established in mechanical engineering development. Therefore, the aim of this paper is to support the project manager in the systematic selection and adaptation of agile methods. A methodology is presented that enables a project-specific selection of established agile methods. Based on this, a catalog of measures for improving the suitability of agile methods is shown. The methodology is tested in an industrial development project.

Keywords (english):

Agile Methods, Hybrid Project Management, Product Development

1 Einleitung

Die Branche des Maschinen- und Anlagenbaus steht vor der Herausforderung steigender Produktkomplexität. Individuelle Kundenanforderungen und dynamische Märkte erfordern eine hohe Bandbreite an Funktionen in modernen Produkten. Dabei findet die Entwicklung häufig nicht mehr nur an zentralen Standorten, sondern mit Hilfe von lokal verteilten Entwicklungsteams statt, die unterschiedliche Engineering-Domänen wie Mechanik, Elektronik und Software umfassen. Es resultieren umfangreiche und stark verknüpfte Entwicklungsprozesse, die im Rahmen des Projektmanagements geplant und gesteuert werden müssen (Bavendiek et al. 2018). Die Prozesse sind dabei zumeist als langfristig geplante Phasen mit klar definierten Meilensteinen bzw. Freigaben definiert, um rechtzeitige Beschaffungen und Planungssicherheiten zu gewährleisten. Die hohe Dynamik am Markt – beispielsweise durch geänderte Gesetzesanforderungen oder veränderte Kundenwünsche – erfordert allerdings eine flexible Anpassbarkeit der Projektmanagement-Methoden (vgl. Hüsselmann et al. 2019). Agile Methoden adressieren diese Herausforderungen durch eine iterative und inkrementelle Vorgehensweise (Schwaber und Sutherland 2020). Jedoch sind bei agilen Methoden keine fest definierten Freigaben und langfristig geplanten Phasen vorgesehen. Auch die Organisationsstruktur, Projektgröße und Unterteilung der Entwicklungsteams in Unternehmen lässt eine direkte Kommunikation und selbstbestimmte Arbeitsweise, wie sie bei agilen Methoden gefordert wird, oft nur bedingt zu. Dementsprechend sollten agile Methoden vor ihrem Einsatz bedarfsgerecht ausgewählt und Maßnahmen zur Eignungsverbesserung (z.B. Anpassung der agilen Methode) ergriffen werden, um einerseits Planungssicherheit zu gewährleisten und andererseits eine flexible Reaktion auf unvorhersehbare Veränderungen zu ermöglichen (Baschin et al. 2020). Die Auswahl und Anpassung muss aufgrund der hohen Individualität der einzelnen Entwicklungsprojekte zielgerichtet und spezifisch erfolgen (Albers et al. 2019). Agile Methoden sind in der Entwicklung des Maschinen- und Anlagenbaus aufgrund anderer Rahmenbedingungen (z.B. feste Freigaben) als in der Softwareentwicklung allerdings noch nicht etabliert (Komus et al. 2020). Eine systematische Auswahl und Anpassung erfolgt in der Praxis daher selten, da oftmals nicht genügend Erfahrungswerte im Umgang mit agilen Methoden vorliegen. Ziel des vorliegenden Papers ist es daher, den Projektmanager bei der individuellen Auswahl agiler Methoden und Ergreifung von Maßnahmen zur Eignungsverbesserung agiler Methoden zu unterstützen, um diese in Produktentwicklungsprojekten anwenden zu können. Die dafür erarbeitete Methodik wird während eines laufenden Forschungsvorhabens anhand eines Entwicklungsprojekts aus der Industrie getestet, um die Anwendbarkeit und Funktionsweise kritisch zu überprüfen. Die Methodik, die Ergebnisse der Anwendung und geplante Folgearbeiten werden im vorliegenden Paper vorgestellt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Typisierung von Produktentwicklungsprojekten

Die Produktentwicklung selbst stellt kein angeschlossenes System dar, sondern interagiert mit internen und externen Einflüssen (Hales und Gooch 2004). Diese Einflüsse sind für jedes Produktentwicklungsprojekt sehr individuell (Albers et al. 2019) und prägen so die spezifischen Gegebenheiten eines Projektes, den sogenannten Entwicklungskontext (Gericke et al. 2013). Hales und Gooch (2004) ordnen ein Produktentwicklungsprojekt dabei in mehreren Ebenen in die Entwicklungsumgebung ein (Levels of Resolution). Die einzelnen Ebenen werden durch die Umgebung (Environment), den Markt (Market), das Unternehmen (Company), das Unternehmensmanagement (Management), das Produktentwicklungsprojekt (Project) sowie die Entwicklungsarbeiten (Design) gegliedert und weisen Beziehungen und Abhängigkeiten untereinander auf (Hales und Gooch 2004). Eine ähnliche Einteilung wird auch von Meißner et al. (2005) vorgeschlagen. Der Kontext wird dabei durch Einflüsse aus der Gesellschaft, dem Markt, dem Unternehmen, dem Entwicklungsauftrag sowie arbeitsorganisatorischen Aspekten (Team, Individuum, Ressourcen) geprägt (Meißner et al. 2005).

Auch Negele et al. (1997) beschreiben in ihrem ZOPH-Modell die Produktentwicklung als System und deren Umgebung. Das System der Produktentwicklung wird dabei in die Bereiche „Zielsystem“, „Handlungssystem“, „Prozesssystem“ und „Objektsystem“ unterteilt. Zudem werden auch die Wechselwirkungen innerhalb der Produktentwicklung abgebildet. Das ZOPH-System wird durch Browning et al. (2006) noch durch das „Tool-System“ erweitert, da in heutigen Produktentwicklungsprojekten moderne softwaregestützte Engineering-Tools (z.B. CAE/CAD) unabdinglich geworden sind (vgl. Browning und Negele 2006). Um die Gegebenheiten eines Entwicklungsprojektes weiter zu differenzieren, lassen sich die genannten Themenbereiche in mögliche Einflussfaktoren unterteilen, die gewissermaßen das Profil eines Entwicklungsprojektes charakterisieren. Um eine effektive Bearbeitung eines Projektes zu gewährleisten, müssen folglich die wesentlichsten Einflussfaktoren berücksichtigt werden (vgl. Gericke et al. 2013; Meißner et al. 2005). In der Literatur wird eine Vielzahl an Einflussfaktoren genannt, die im Zusammenhang mit der Produktentwicklung stehen. Bavendiek et al. beschreiben im PMC-Modell, welche Faktoren für eine effektive und kollaborative Zusammenarbeit berücksichtigt werden müssen (Bavendiek et al. 2018). Dabei werden neben ingenieurwissenschaftlichen Einflussfaktoren wie der Einsatz von Methoden und (Software)Tools auch arbeitswissenschaftliche Einflussfaktoren wie Kompetenzen der Mitarbeiter fokussiert. Negele et al. (1997) unterteilen die Bereiche des ZOPH-Modells jeweils in spezifische Einflussfaktoren, die aus der Praxis abgeleitet worden sind. Gericke et al. (2013) unterteilen die Bereiche Umgebung, Markt, Unternehmen, Management, Projekt und Personal in mehreren Levels (Detaillierungsstufen), sodass letztendlich 239 Einflussfaktoren identifiziert worden sind, die in Zusammenhang mit den genannten Bereichen stehen. Hales und Gooch (2004) haben eine Design Context Checklist aus ihren Levels of Resolution abgeleitet, die eine Hilfestellung zur Berücksichtigung wesentlicher Einflüsse in Produktentwicklungsprojekten geben soll. Darin werden 41 Einflussfaktoren beschrieben, deren Ausprägungen anhand von Leitfragen identifiziert werden können. 18 Einflussfaktoren, die zur Typisierung von Projekten und zur Ableitung von Maßnahmen zur Beherrschung der Projekte dienen, werden durch Hüsselmann et al. (2019) beschrieben. Maffin et al. (1997) beschreiben 37 Einflussfaktoren aus der Praxis und untersuchen, inwiefern diese zur Beschreibung einer unternehmensspezifischen Produktentwicklung geeignet sind. Eine Studie mit 58 Unternehmen hat hier ergeben, dass durch den hohen Grad der individuellen Struktur der Unternehmen die Eignung der beschriebenen Einflussfaktoren jeweils unterschiedlich hoch ist und daher im Einzelfall betrachtet werden muss. Meißner et al. (2005) ordnen den Bereichen Gesellschaft, Markt, Unternehmen, Entwicklungsauftrag, Ressourcen, Individuum und Team insgesamt 31 Einflussfaktoren zu, um den Einfluss auf den Produktentwicklungsprozess zu beschreiben. Wilmsen et al. (2019) haben in einer umfangreichen Literaturrecherche 946 Einflussfaktoren identifiziert, die zur Adaption von Produktentwicklungsprozessen verwendet werden. Klein (2016) nennt in seiner Dissertation zehn Einflussfaktoren, die er als Kontextkriterien bezeichnet und zur Auswahl von geeigneten agilen Techniken einsetzt. Darüber hinaus existieren übergeordnete Handlungsempfehlungen zur Einteilung von Projekten wie z.B. das Cynefin-Framework (Snowden und Boone 2007), das eine Einteilung von Projekten in die Kategorien „einfach“, „kompliziert“, „komplex“ und „chaotisch“ vornimmt, und die Stacey-Matrix (Stacey 1996), die die Unterscheidung von Projekten anhand der Klarheit der Anforderungen und der Technologie vorschlägt.

2.2 Agile Methoden in der Produktentwicklung

Die Werte und Prinzipien agiler Entwicklung basieren auf dem agilen Manifest, das von Vertretern aus der Softwareentwicklung verfasst worden ist. Demnach bilden die folgenden Werte die Grundlage für eine erfolgreiche Softwareentwicklung (Beck et al. 2001):

- „Individuen und Interaktionen mehr als Prozesse und Werkzeuge“
- „Funktionierende Software mehr als umfassende Dokumentation“
- „Zusammenarbeit mit dem Kunden mehr als Vertragsverhandlung“
- „Reagieren auf Veränderung mehr als das Befolgen eines Plans“

Dies bedeutet laut Beck et al. (2001) nicht, dass Prozessvorgaben, Dokumentationspflichten, Verhandlungen und Planungen vernachlässigt werden sollten. Allerdings stehen die Kommunikation, das Produkt, die Kundeneinbindung und die Flexibilität im Vordergrund. Aus den Werten lassen sich wiederum zwölf Prinzipien ableiten, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden sollten. Im Wesentlichen wird dabei beschrieben, dass die Kundeneinbindung –und Zufriedenheit, eine kommunikative, reflexive und selbstorientierte Zusammenarbeit im Team, die Erzeugung eines hochwertigen funktionierenden Produkts (hier Software) sowie eine inkrementelle (kleine Lieferumfänge) und iterative (Anforderungsänderungen willkommen) Arbeitsweise im Vordergrund stehen (Beck et al. 2001). Etablierte agile Methoden wie Scrum nutzen diese Prinzipien und bilden dadurch eine Projektstruktur, die eine flexible Anpassung des Produktes bei veränderlichen Anforderungen ermöglicht. Weitere bekannte und häufiger eingesetzte agile Methoden und Rahmenwerke sind u.a. Kanban, DevOps und Extreme Programming (Komus et al. 2020). Darüber hinaus existieren Kombinationen mehrerer agiler Methoden (z.B. Scrumban) oder skalierbare agile Methoden für größere Entwicklungsprojekte wie Nexus, das Scaled Agile Framework (SAFe), Large Scale Scrum (LeSS) oder Scrum of Scrums (SoS). Die genannten agilen Methoden unterscheiden sich zwar z.T. in ihrem Ablauf, ihrer Organisationsstruktur und ihren Rollenbeschreibungen, beruhen aber grundsätzlich auf der beschriebenen iterativen und inkrementellen Vorgehensweise sowie den Werten und Prinzipien des agilen Manifests.

2.3 Hybride Ansätze zur Entwicklung physischer Produkte

Sowohl klassische (z.B. Simultaneous Engineering) als auch agile Entwicklungsmethoden (z.B. Scrum) weisen z.T. ähnliche Merkmale auf (z.B. die Wichtigkeit von Anforderungen), die aber unterschiedlich gehandhabt werden. Gemäß Kusay-Merkle (2018) liegen die wesentlichen Unterschiede zwischen klassischem und agilen Entwickeln vor allem im allgemeinen Vorgehen (linear oder iterativ und inkrementell), im Umfang der initialen Planung, in der Klarheit der Anforderungen (bei agil dynamisch), in der Anpassungshäufigkeit bezüglich des Produkts (bei agil häufige Anpassungen), in den Lieferzyklen (bei agil kurze Lieferzyklen) sowie in der Einbindung der Stakeholder (z.B. Kunde, bei agil enger Kontakt). Kuster et al. (2019, S. 35f.) benennen ähnliche Merkmale, weisen aber zudem auf die Wichtigkeit der Mitarbeitenden hin. Sowohl die Erfahrung der Mitarbeitenden hinsichtlich Agilität, die Affinität zu agilen Methoden, die Größe des Projektteams als auch die örtliche Verteilung der Mitarbeitenden spielen demnach eine entscheidende Rolle zur Eignung klassischer oder agiler Methoden innerhalb eines Projekts. Ähnliche Argumente werden auch von Völl (2020) genannt, der bei klassischen Methoden eine ausgeprägte, hierarchische Struktur der Organisation, einen hohen Bürokratiegrad, eine starre IT-Infrastruktur sowie große Releases in weiten Zeitabständen nennt. Agile Methoden sind dagegen durch eine hohe Selbstorganisation mit einer Vertrauenskultur, schlanke, iterative und inkrementelle Prozesse, adaptive Technologien sowie kundenorientierte Releases geprägt (Völl 2020). Der wesentlichste Unterscheid zwischen klassischem und agilem Entwickeln ist demnach die flexible Anpassungsfähigkeit, die bei agilen Methoden durch vorgegebene Werte, Prinzipien (z.B. Selbstorganisation, starke Kundeneinbindung) und den Aufbau der Projektorganisation (z.B. flache Hierarchien, kleine Teams, iterative und inkrementelle Prozesse) stärker fokussiert wird (vgl. Kusay-Merkle 2018; Kuster et al. 2019; Völl 2020). Hybride Entwicklungsansätze kombinieren sowohl klassische als auch agile Methoden. Die Kombination soll die Vorteile beider Methoden verbinden, indem klar definierte Prozessstrukturen mit klassischen Elementen (z.B. Freigaben) und iterativen Elementen (z.B. Sprints) erzeugt werden. Daraus sollen sich mittel- bis langfristig planbare Prozesse ergeben, die trotzdem bei Bedarf eine flexible Anpassung der Entwicklungsdaten ermöglichen. Aufgrund der steigenden Bedeutung von agilen Strukturen in Produktentwicklungsprojekten des Maschinen- und Anlagenbaus existieren mittlerweile einige Ansätze für eine hybride Entwicklung. PRINCE2 ist beispielsweise eine umfangreiche Projektmanagement-Methode mit Hilfestellungen zur Prozessgestaltung und zum Methodeneinsatz in Projekten unterschiedlicher Größe aus unterschiedlichen Branchen. PRINCE2 Agile baut auf PRINCE2 auf und erweitert dies zusätzlich um die Integration agiler Ansätze (vgl. Kaiser und Simschek 2020). Das

Agile Systems Design des Karlsruher Instituts für Technologie ist ein Rahmenwerk, das situationsbedingt dabei unterstützen soll, geeignete Vorgehensweisen und Methoden für Produktentwicklungsprojekte auszuwählen. Es wird in mehreren Abstufungen sowohl zwischen der Planungsstabilität (hoch/klassisch, niedrig/agil) als auch dem Prozesslevel (Makro/Projektlevel, Mikro/Methodendurchführungslevel) unterschieden, um Handlungsempfehlungen zum Vorgehen im Projekt zu geben. Das Rahmenwerk basiert auf neun Grundprinzipien (z.B. „Der Mensch steht im Zentrum der Produktentstehung“), die bei der Anwendung beachtet werden sollen (Albers et al. 2019). In der Dissertation von Schneider (2015) steht eine agile Planung von Produktentstehungsprozessen im Vordergrund. Als Beispiel wird die Planung einer Motormontagelinie genannt. Gövert (2020) und Klein (2016) beschreiben in Ihren Arbeiten, wie spezifische agile Techniken (z.B. Backlogs, Review-Meetings) in den Entwicklungsprozess integriert werden können. In der Dissertation von Stelzmann (2011) wird das Systems Engineering Vorgehensmodell von Haberfellner adaptiert, indem der Problemlösungszyklus agil ausgeführt wird. Übergeordnete hybride Prozessmodelle mit wechselnden linear und agil ausgeführten Entwicklungsphasen sind u.a. das Water-Scrum-Fall-Modell als Weiterentwicklung des Wasserfallmodells sowie das Agile-Stage-Gate-Modell als Ergänzung zum Stage-Gate-Prozess (Cooper 2016).

3 Beitrag der Arbeit und Ableitung von Forschungsfragen

Die Übersicht zum Stand der Wissenschaft und Technik zeigt, dass einige Ansätze für eine hybride Entwicklung im Maschinen- und Anlagenbau existieren. Allerdings sind die Ansätze häufig generisch aufgebaut und als Orientierungsrahmen zu verstehen (z.B. Hybrid-Stage-Gate). Dies ermöglicht eine grundlegende Strukturierung einer Entwicklung auf strategischer Ebene, bezieht aber nicht vollumfänglich die individuellen Ausprägungen einzelner Entwicklungsprojekte ein. Daher werden nicht genügend Informationen für eine projektspezifische Auswahl und Anpassung geeigneter agiler Methoden geliefert. Andere Ansätze fokussieren den Einsatz agiler Techniken (z.B. Taskboard) auf operativer Ebene zur Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten (z.B. Gövert). Bei diesen Ansätzen wird zwar detailliert beschrieben, wie agile Techniken eingesetzt werden können. Es wird allerdings nicht die grundlegende Struktur des Projekts berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es umfangreiche generische Beschreibungen und Projektmanagement-Methoden wie PRINCE2 Agile. Hierbei wird zwar die Durchführung von Projekten unterstützt. Die Anwendung setzt allerdings umfangreiche Umstrukturierungen und Schulungen voraus. Der Fokus der vorliegenden Arbeit besteht deshalb darin, eine Methodik zu entwickeln, die den Projektleiter ohne erheblichen Aufwand und ohne erhebliches Vorwissen bezüglich agiler Methoden bei der Projektplanung unterstützt. Es soll die projektspezifische Auswahl und Anpassung einer geeigneten agilen Methode methodisch begleitet werden, um Entwicklungsprojekte hybrid auszuführen. Zur Erreichung des Ziels ergeben sich somit untenstehende Forschungsfragen.

- Mit welchen Einflussfaktoren kann der Entwicklungskontext beschrieben werden, um die Eignung gängiger agiler Methoden zu bestimmen?
- Wie können agile Methoden in Abhängigkeit des Entwicklungskontextes projektspezifisch ausgewählt werden?
- Wie können agile Methoden in Abhängigkeit des Entwicklungskontextes projektspezifisch angepasst werden bzw. welche Maßnahmen können ergriffen werden, um die Eignung einer agilen Methode zu erhöhen?

Die Arbeit wird im Rahmen des Forschungsvorhabens RePASE angefertigt. Im RePASE-Projekt werden u.a. Anpassungs- und Einführungsstrategien für Systems Engineering Methoden in Unternehmen erarbeitet. Die folgend beschriebene Anpassungsstrategie zur Adaption agiler Methoden soll dabei einen Beitrag leisten, Veränderungen in den Unternehmen (z.B. durch Einführung neuer Methoden und Tools) bedarfsgerecht, iterativ, inkrementell und reflexiv zu unterstützen.

4 Methodik zur bedarfsgerechten Auswahl und Anpassung agiler Methoden

4.1 Kontextanalyse – Ermittlung eines Projektprofils

Als Basis zur Beschreibung des Projektkontextes wird das um das System „Tool“ erweiterte ZOPH-Modell zu Grunde gelegt (Negele 1997; Browning 2006). Die wesentlichen Einflussfaktoren, die sich für eine Beschreibung von Produktentwicklungsprojekten im Maschinen- und Anlagenbau eignen, wurden auf Grundlage der Ergebnisse des KAMiiSo-Projektes und aus der Literatur zusammengetragen. Anschließend wurden die Einflussfaktoren mit den Anforderungen zum Einsatz von agilen Methoden abgeglichen, gefiltert, ausgewählt und den Themenbereichen des erweiterten ZOPH-Modells zugeordnet. Wie in Kapitel 2 beschrieben, existiert in der Literatur eine Vielzahl an Faktoren, die als Einflussgeber für die Produktentwicklung genannt werden. Die Einflussfaktoren werden dabei auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden und in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet. Entscheidend für die vorliegende Arbeit sind Einflussfaktoren, die eine direkte Auswirkung auf das Geschehen von Produktentwicklungsprojekten haben. Das abgeschlossene Forschungsprojekt KAMiiSo gibt hierfür Anhaltspunkte, welche Faktoren bei der Zusammenarbeit zwischen Entwicklungsteams in Projekten des Maschinen- und Anlagenbaus berücksichtigt werden sollten. Hierbei hat sich herausgestellt, dass arbeitsorganisatorische Gegebenheiten wie die örtliche Verteilung von Entwicklungsteams, Teamgrößen, die Interdisziplinarität der Teams oder das Wissen im Umgang mit neuen Methoden und Tools eine wesentliche Rolle in der Entwicklung spielen, da diese die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den Entwicklern und Entwicklerinnen beeinflussen. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht hat sich herausgestellt, dass vor allem die Komplexität der Entwicklungsarbeiten (Neuheitsgrad der Entwicklung, Produkt-/Entwicklungsumfang, Anforderungen, Beteiligung der Engineering-Domänen, Simultanität der Arbeitsschritte, Datenverarbeitung –und Verwaltung usw.) einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklungsprojekte hat, da diese den Entwicklungsprozess und die zugehörigen Entwicklungsaktivitäten prägen. Um festlegen zu können, ob eine agile Methode und wenn ja, welche agile Methode für ein zu planendes Projekt geeignet ist, muss darüber hinaus berücksichtigt werden, welche Anforderungen an den Einsatz von agilen Methoden zu definieren sind. Beispielsweise kann ein Projekt mit über hundert Projektbeteiligten nicht mittels Scrum durchgeführt werden, da bei Scrum nur eine geringe Anzahl an Projektmitarbeitern vorgesehen ist. Dementsprechend müssen andere agile Methoden eingesetzt oder Scrum angepasst bzw. skaliert werden (z.B. Scrum of Scrums). Die Anforderungen an den Einsatz einer agilen Methode bestimmen daher maßgeblich die mögliche und sinnvolle Anwendung im Entwicklungsprojekt. Anhand der zwölf Prinzipien aus dem agilen Manifest (Beck et al. 2001) lassen sich die wesentlichsten Anforderungen für den Einsatz von agilen Methoden ableiten (z.B. kleine Teamgrößen, möglichst keine örtliche Verteilung der Teams, wenig Dokumentationsaufwand usw.). Diese dienen als Richtwerte zur Beurteilung und Filterung der identifizierten Einflussfaktoren. Die letztlich 21 ausgewählten Einflussfaktoren sowie deren Zuordnung zu den Themenfeldern des erweiterten ZOPH-Modells sind in Tabelle 1 dargestellt. Dies soll später als Entscheidungsgrundlage zur Auswahl einer geeigneten agilen Methode dienen.

Tabelle 1: Identifizierte Einflussfaktoren

Zielvorgaben	Kundeneinbindung, Dokumentationspflichten, Prozessvorgaben, Zeit-Qualität-Kosten, Kritikalität
Organisation	Anzahl Projektmitarbeiter gesamt, Teamgrößen, Lokale Verteilung der Teams, Teamzusammensetzung, Know-how agile Methoden
Produkt	Technische Anforderungen, Art der Entwicklung , Produktumfang -und Komplexität, Interdisziplinarität und Separabilität
Tools	Kommunikationstools, Projektmanagementtools, Datenverwaltungssysteme
Prozess	Prozessstandard/Referenz, Parallelität von Arbeitsschritten, Prozessroutine, Strategische Prozessplanung

4.2 Auswahl einer geeigneten agilen Methode

Gemäß Kapitel 4.1 sind den fünf übergeordneten Themenfeldern „Zielvorgaben“, „Organisation“, „Produkt“, „Tools“ und „Prozess“ die 21 ausgewählten Einflussfaktoren zugeordnet. Zur Abschätzung der Ausprägungen der genannten Einflussfaktoren wird für jeden Einflussfaktor eine Leitfrage mit drei vorgegebenen Antwortmöglichkeiten formuliert. Durch die Beantwortung der Leitfragen wird für jeden Einflussfaktor festgelegt, welche Beschaffenheit für das Entwicklungsprojekt in diesem Bereich vorliegt. Dadurch ergibt sich nach und nach ein Gesamtprofil für das zu planende Projekt. Dem Themenfeld „Organisation“ ist zum Beispiel der Einflussfaktor „Anzahl Projektmitarbeiter gesamt“ zugeordnet. Bei diesem Einflussfaktor wird abgefragt, wie viele Mitarbeiter insgesamt im vorliegenden Entwicklungsprojekt beteiligt sind. Daraus ergeben sich die gestaffelten Antwortmöglichkeiten „≤ 10“, „10-100“ und „> 100“. Zur Ausprägung einiger Einflussfaktoren kann womöglich vor Beginn eines Projektes keine sichere Auskunft gegeben werden. In diesem Fall sollte dennoch eine grobe Abschätzung stattfinden, um eine Auswahl einer geeigneten agilen Methode zu ermöglichen. Beispielsweise kann eine Zieldefinition mit etablierten Methoden (z.B. SMART, Anforderungsanalyse usw.) durchgeführt werden, um die Projektziele, die Anforderungen an das Projekt und erwartete Ergebnisse zu spezifizieren. Die daraus erhaltenen Ergebnisse können Anhaltspunkte zur Beantwortung der Leitfragen liefern. Gegebenenfalls können auch Erfahrungswerte aus vergleichbaren abgeschlossenen Projekten herangezogen werden, um eine Unterscheidung der Einflussfaktoren zu erreichen. Nach der Beantwortung der Fragen werden die Einflussfaktoren/Antwortmöglichkeiten mit 16 agilen Methoden gegenübergestellt, die sich grundsätzlich auch für eine Entwicklung physischer Produkte (z.B. mechatronische System) eignen. Für jede Antwortmöglichkeit wird festgelegt, welche Methode für die jeweilige Ausprägung geeignet ist und welche nicht eingesetzt werden sollte.

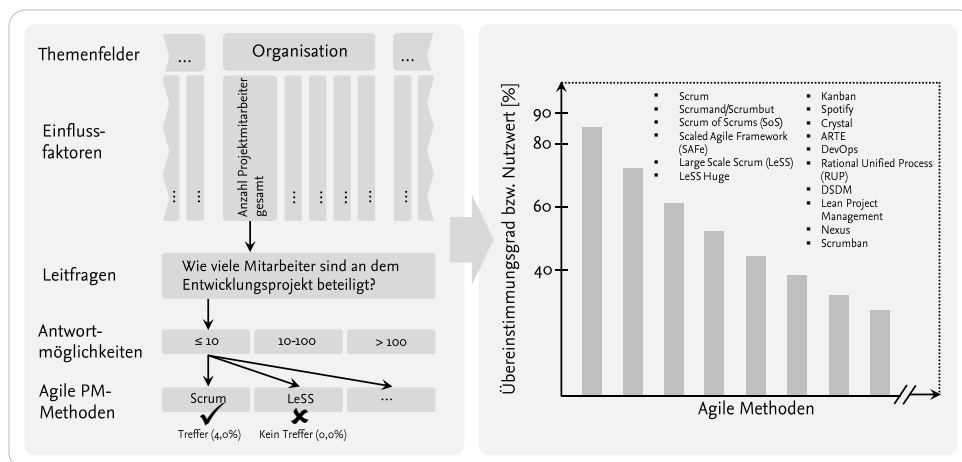


Bild 1: Prinzip zur Auswahl einer agilen Methode

Um eine Vergleichbarkeit bei der Eignung der agilen Methoden zu erzielen, muss der Übereinstimmungsgrad anhand der Projektsituation (Projektkontext) bestimmt werden. Hierfür wird eine angepasste Nutzwertanalyse durchgeführt, durch die mit Hilfe von Gewichtungen der Themenfelder und Teilgewichtungen der Einflussfaktoren ein prozentualer Übereinstimmungsgrad (Nutzwert) berechnet wird. Ist eine der 16 aufgeführten agilen Methoden für die jeweilige ausgewählte Antwortmöglichkeit geeignet (Treffer), wird dies notiert und der Teilwert berechnet. Ist die Methode dagegen nicht geeignet (kein Treffer), ist der Teilwert gleich null. Es kann vom Anwender immer nur eine Antwort pro Leitfrage ausgewählt werden. Die agilen Methoden können dagegen auch für mehrere Ausprägungen/Antwortmöglichkeiten geeignet sein. Beispielsweise sind bei Nexus sowohl Fachteams als auch interdisziplinäre Teams vorgesehen (Integrationsteams). Dadurch existieren mehreren zutreffende Antwortmöglichkeiten bei der Frage nach der Teamzusammensetzung. Nachdem alle Fragen beantwortet worden sind, werden die Teilwerte aufsummiert. Dabei werden alle

fünf Themenfelder gleich gewichtet, d.h. jedes Themenfeld mit 0,2 (20%). Ebenso werden die Einflussfaktoren innerhalb der Themenfelder gleich gewichtet (z.B. 0,25 bzw. 25% bei vier Einflussfaktoren usw.). Damit ergibt sich für jede agile Methode ein Übereinstimmungsgrad zwischen 0 und 100%. Die gleichmäßige Gewichtung soll eine ausgeglichene Betrachtung der gegebenen Einflüsse auf das Projekt gewährleisten. Beispielhaft wird das Vorgehen anhand der agilen Methoden Scrum und Large Scale Scrum (LeSS) in Bild 1 (links) erläutert. Bei einem Projekt, das höchstens 10 Projektmitglieder umfasst, müssen keine umfangreichen Skalierungsmethoden wie Large Scale Scrum eingesetzt werden. Die ursprüngliche Form von Scrum eignet sich dagegen für die kalkulierte Anzahl an Projektmitgliedern. Da das Themenfeld „Organisation“ in fünf Einflussfaktoren untergliedert ist, ergibt sich eine Teilgewichtung von 0,2 (20%). Für den genannten Treffer ergibt sich somit ein Teilwert von 4,0% ($0,2 \times 0,2$). Durch die Beantwortung der weiteren Leitfragen ergibt sich letztlich der gesamte Übereinstimmungsgrad bzw. Nutzwert für jede der 16 agilen Methoden. Durch das Bilden eines Rankings kann eine der bestgeeignetsten Methoden ausgewählt werden (s. Bild 1 rechts). Im Zweifelsfall ist dies nicht immer die Methode mit dem höchsten Übereinstimmungsgrad, da z.B. über bestimmte agile Methode schon Erfahrungswerte vorliegen. Es bleibt die Frage, wie hoch der Übereinstimmungsgrad der Methode mindestens sein sollte, damit überhaupt eine ausreichende Eignung vorliegt. Da es darüber aktuell keine verlässliche Studie gibt, wird ein minimaler Übereinstimmungsgrad von 40 – 60% vorgeschlagen, der lediglich als Richtwert dient und vom Einzelfall abhängig ist. Liegt der Übereinstimmungsgrad unterhalb dieses Bereiches sollte lieber auf ein klassisches Projektmanagement zurückgegriffen werden, da ansonsten eine zu hohe Anpassung und Veränderung der agilen Methoden notwendig wäre, um geeignet für die vorhandene Projektsituation zu sein. Es muss erwähnt werden, dass die angepasste Nutzwertanalyse einen Durchschnittswert über alle Einflussfaktoren liefert. Ist die Einhaltung einiger Einflussfaktoren von besonderer Bedeutung, sollte die Gewichtung der Einflussfaktoren individuell angepasst werden.

4.3 Anpassung der agilen Methode mittels eines Anpassungskatalogs

Anhand der Antworten aus der Umfrage und der Zuordnungen der ausgewählten agilen Methode können die Projektprofile für die initiale Projektsituation und für die Methode für jede Leitfrage aufgezeichnet werden. So entstehen zwei Profile, die mehr oder weniger voneinander abweichen. Liegen die Profile übereinander, stimmt die Eignung der Methode bei diesen Leitfragen mit den Projektgegebenheiten überein. In diesen Fällen muss keine Anpassung der Methode vorgenommen werden. Entstehen Diskrepanzen bei einigen Leitfragen, ist die Methode an diesen Stellen zunächst nicht vollständig geeignet. Hier sollte vorrangig darauf geachtet werden, bei welchen Leitfragen bzw. Einflussfaktoren die Abweichungen am größten sind. Da die Antwortmöglichkeiten jeweils „stufenförmig“ aufgebaut sind (z.B. Antwort 1: Anforderungen eindeutig, Antwort 2: Anforderungen teilweise unklar, Antwort 3: Anforderungen unklar), liegt dann eine größtmögliche Abweichung vor, wenn Antwort 1 gewählt wurde, aber die Methode nur für Antwort 3 geeignet ist (oder umgekehrt). Z.B. wird beim Einsatz einer agilen Methode in der Regel eine kontinuierliche Einbindung des Kunden gefordert. Ist dies im Projekt ursprünglich nicht vorgesehen, kann die Empfehlung der Methode übernommen werden (falls sinnvoll) oder es können Anpassungsmaßnahmen ausgewählt werden (z.B. Einbindung des Kunden nur bei ausgewählten Sprint Reviews). Die Bildung der Profile und Varianten der Übereinstimmung sind in Bild 2 (oben) dargestellt. Um anhand der Übereinstimmung systematisch Maßnahmen zur Eignungsverbesserung der agilen Methode durchzuführen, ist ein Anpassungskatalog erarbeitet worden, der auf der Logik der Themengebiete und Einflussfaktoren aufbaut (s. Kapitel 4.1) und unterschiedliche Anpassungsmaßnahmen je Einflussfaktor vorschlägt. So kann durch den Abgleich der Profile entschieden werden, welche Maßnahmen für welche Einflussfaktoren ergriffen werden können, um die Eignung der zuvor ausgewählten agilen Methode zu erhöhen. Dabei existieren sowohl Maßnahmen zur Anpassung der agilen Methode selbst (z.B. Verlängerung der Iterationszyklen) als auch Maßnahmen zur Veränderung der Projektsituation (wenn möglich, z.B. Schulung der Mitarbeitenden, Ausbildung von Scrum Mastern). Diese können vom Projektleiter ausgewählt werden, um die agile Methode entsprechend anzupassen bzw. um die Projektgegebenheiten auszurichten.

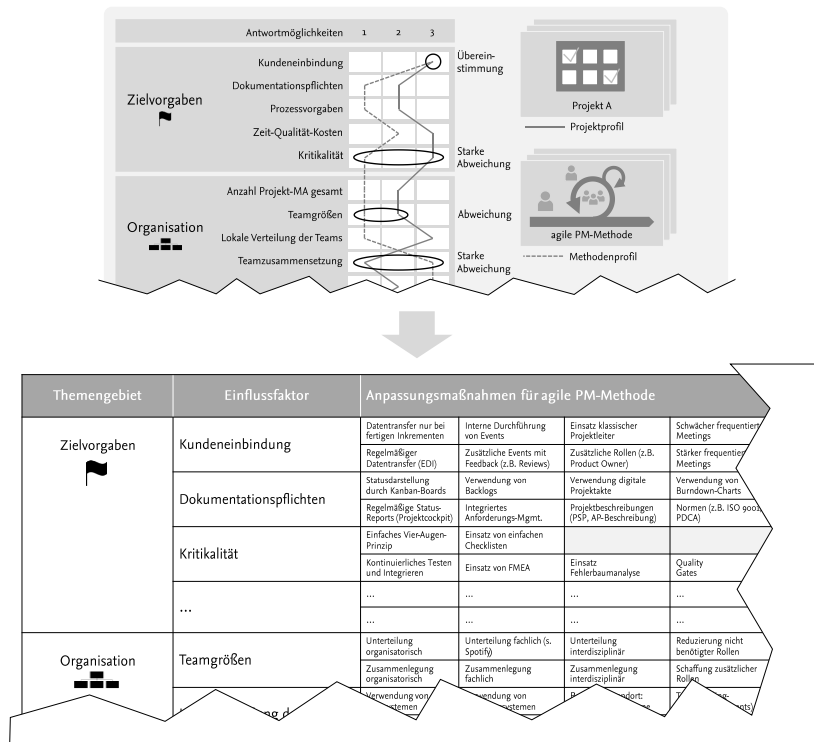


Bild 2: Vergleich Projektprofil – Methodenprofil (oben) und Anpassungskatalog für agile Methoden (unten)

Beispielsweise ist bei (nicht skalierten) agilen Methoden nicht vorgesehen, in lokal verteilten Teams zu arbeiten, weil dadurch die Kommunikation erschwert wird. Durch zusätzliche Maßnahmen wie die Einführung von modernen Webkonferenzsystemen mit integrierten Chatfunktionen usw. kann die Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten aber dennoch erheblich unterstützt werden. Die Anpassungsmaßnahmen sind allgemeingültig beschrieben und demnach zur Anpassung aller betrachteten agilen Methoden geeignet. Es ist festzuhalten, dass jede Veränderung bzw. Anpassung einer agilen Methode den Charakter und die Struktur der Methode verändert, wodurch ein gewisses Maß an Flexibilität eingebüßt wird. Daher sollten agile Methoden auch nur bei einer grundsätzlichen Projekteignung eingesetzt werden (s. Kapitel 4.2). Ein reduzierter Auszug aus dem Anpassungskatalog für agile Methoden ist in Bild 2 (unten) abgebildet.

5 Anwendungsbeispiel – Entwicklung eines Kettenquerförderers

Im Zuge des Forschungsvorhabens wird ein Teilprojekt mit einem Entwickler und Hersteller komplexer Holzbearbeitungsanlagen zur Optimierung der Entwicklungsprozesse durchgeführt. Die Holzbearbeitungsanlagen bestehen im Wesentlichen aus mehreren Kernmaschinen zur Bearbeitung von Holzlamellen, die in unterschiedlichen Anwendungsgebieten zum Einsatz kommen (z.B. Hausbau). Das Spektrum an Funktionalitäten der Kernmaschinen ist dabei sehr umfangreich (z.B. Sägen, Keilverzinkung usw.). Die einzelnen Kernmaschinen sind mit Querförderern verbunden, die die Holzlamellen zu den Kernmaschinen transportieren und selbst unterschiedliche Funktionen beinhalten können (z.B. Lagerung, Wenden, Aussortieren qualitativ unzureichender Lamellen). Das Layout der Gesamtanlage ergibt sich somit im Wesentlichen (zusätzlich Sicherheitstechnik usw.) aus den Kundenanforderungen hinsichtlich der notwendigen Funktionen der Kernmaschinen und Querförderer sowie der räumlichen Gegebenheiten beim Kunden. Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung der Anlagen besteht darin, dass das Unternehmen historisch stark gewachsen ist und mehrere örtlich getrennte Entwicklungsstandorte beinhaltet, die sich auf bestimmte Kernmaschinen und Querförderer spezialisiert haben. Es gilt mittel- bis langfristig die Entwicklungsprozesse zu harmonisieren, indem gemeinsame Prozessvorgaben, Toollandschaften und modularisierte

Baugruppen geschaffen werden. Dadurch soll die Effektivität der Entwicklung nachhaltig erhöht werden. Im vorliegenden Teilprojekt wird ein Leitprozess zur teilexternen Entwicklung neu definiert. Zur Erprobung des Prozesses soll ein Teilewender eines Querförderers in Kooperation zwischen dem Hauptentwicklungsstandort und einem Dienstleister entwickelt werden. Dafür soll geprüft werden, ob agile Methoden in den Prozess integriert werden können und wenn ja, welche Anpassungen dafür notwendig sind. Zur Unterstützung wird die vorgestellte Methodik zur Auswahl und Anpassung agiler Methoden verwendet. Die Auswertung der Umfrage hat ergeben, dass sich die agilen Methoden Crystal (Yellow), ARTE und RUP (je 51,3%) sowie Scrum und Kanban (je 49,7%) am besten für das geplante Projekt eignen. Da bei einigen Mitarbeitern bereits Erfahrungswerte zu Scrum vorliegen, soll Scrum verwendet und an die Projektgegebenheiten adaptiert werden.

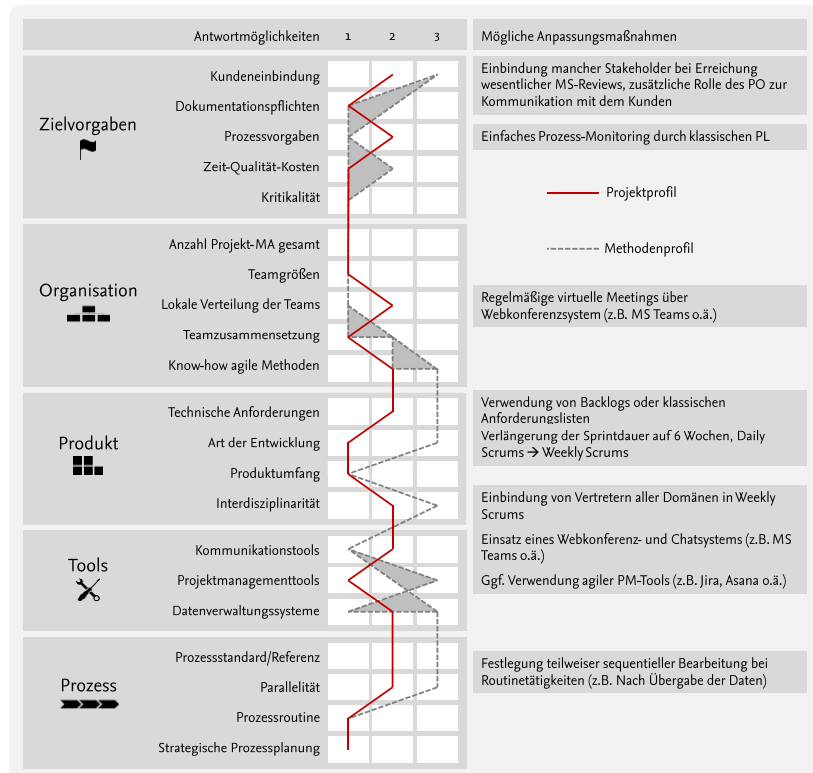


Bild 3: Projektprofil und Anpassungsmaßnahmen für die Entwicklung eines Querförderers

Die wesentlichste Diskrepanz zwischen Scrum und den Projektgegebenheiten ist die „Art der Entwicklung“. Während agile Methoden vor allem bei innovativen Neuentwicklungen geeignet sind, bei denen die Anforderungen zu Beginn noch sehr unklar sind, wird im vorliegenden Projekt zunächst eine Variantenkonstruktion auf bestehenden Referenzen angestrebt. Die Längen der Sprintzyklen und die Abstände der Daily Scrums können daher etwas höher gewählt werden (größere Arbeitsinkremente), ohne den iterativen Charakter vollständig aufzugeben (z.B. 6-Wochen-Sprints und wöchentliche Abstimmrunden). Darüber hinaus ist vorgesehen, die Rollen des Product Owners (Aufteilung in Bereiche Kundenanforderungen und Product Management) und des Scrum Masters (eher klassischer Projektleiter) anzupassen. Diese und weitere Anpassungsmöglichkeiten sind in Bild 3 dargestellt.

6 Zusammenfassung und Ausblick auf Folgearbeiten

Im vorliegenden Paper ist eine Methodik zur projektabhängigen Auswahl und Anpassung agiler Methoden vorgestellt worden. Mittels einer Abfrage wird festgelegt, ob grundsätzlich eine Eignung zum agilen Entwickeln für ein Projekt vorliegt und wenn ja, welche agilen Methoden für den Einsatz im Projekt geeignet sind. Darauf aufbauend kann anhand des Projektprofils und eines Anpassungskatalogs

eine bedarfsgerechte Anpassung der agilen Methode erfolgen. Die Methodik ist im Rahmen eines Entwicklungsprojektes aus der Industrie erprobt worden. Es hat sich herausgestellt, dass die Anwendbarkeit der Methodik gegeben ist. Allerdings wird kein Anspruch auf Vollständigkeit der berücksichtigten Projekteinflüsse erhoben. Zudem müssen zukünftig mehrere Entwicklungsprojekte unterschiedlicher Branchen mit der Methodik geplant, durchgeführt und mit vorherigen Ergebnissen verglichen werden, um die Wirksamkeit der Methodik zu bestätigen. Darüber hinaus ist geplant, den Prozess der angepassten agilen Methoden mit Modellierungssprachen (z.B. UML, BPMN) abzubilden. Dies lässt eine effektivere Adaption der Prozesse durch Veränderung der Notationen zu. Außerdem können die Prozessmodelle gerade bei wenig Erfahrung mit agilen Methoden als Anschauungsmodelle zur Durchführung dienen und so die agilen Methoden schneller etablieren. Zudem können die Modelle in Verbindung mit Model-Based Systems Engineering (z.B. UML) verwendet werden, um Prozess- und Produktdaten (z.B. Anforderungen) miteinander zu verknüpfen.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen 02J19B140) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Literatur

- Albers et al. 2019 ALBERS, Albert; HEIMICKE, Jonas; SPADINGER, Markus et al.: A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD – Agile Systems Design, Band 84. In: *Proceedings of the 29th CIRP Design Conference*. Póvoa de Varzim: Elsevier, 2019, S. 1015-1022.
- Baschin et al. 2020 BASCHIN, Julian; HUTH, Tobias; VIETOR, Thomas: An Approach for Systematic Planning of Project Management Methods and Project Processes in Product Development. In: *Proceedings of the IEEM 2020*. Singapur: IEEE Xplore, 2020, S. 1037-1041.
- Bavendiek et al. 2018 BAVENDIEK, Ann-Kathrin; HUTH, Tobias; LINKERMANN, David et al.: Collaborative Design: Linking Methods, Communication Tools and Competencies to Processes, Band 92. In: *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. Dubrovnik: Cambridge University Press, 2018, S. 149-160.
- Beck et al. 2001 BECK, Kent; BEEDLE, Mike; BENNEKUM, Arie van et al.: *Manifest für Agile Softwareentwicklung*. URL: <https://agilemanifesto.org/iso/de/manifesto.html> [Stand: 19.01.2022]
- Browning et al. 2006 BROWNING, Tyson R.; FRICKE, Ernst; NEGELE, Herbert: Key concepts in modeling product development processes”, Published online in: *Systems Engineering - The Journal of the International Council on Systems Engineering*, pp. 104-128, 2006.
- Cooper 2016 COOPER, Robert G.: Agile–Stage-Gate Hybrids, In: *Research-Technology Management*, Vol. 59, Issue 1, S. 21-29, Industrial Research Institute (Hrsg.), Taylor and Francis Verlag. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/08956308.2016.1117317>
- Gericket et al. 2013 GERICKE, Kilian; MEIßNER, Moritz; PAETZOLD, Kristin: Understanding the Context of Product Development”, in: *Proceedings of 19th International Conference on Engineering Design, ICED 2013*, Seoul: Cambridge University Press, pp. 191-200.
- Gövert 2020 GÖVERT, Kristin: *Implementierung von agiler Entwicklung in den mechatronischen Produktentstehungsprozess*, Technische Universität München, Department of Mechanical Engineering, Dissertation, 2020.

- Hales und Gooch 2004 HALES, Crispin; GOOCH, Shayne: *Managing Engineering Design*. London, Great Britain: Springer Verlag, 2004, Second Edition, pp. 23-39.
- Hüsselmann et al. 2019 HÜSSELMANN, Claus; DÖNGES, Sandra; KARPF, Stefan: *Zielgerichtete Adaption des Projektmanagements*. Technische Hochschule Mittelhessen, Fachbereich 14 Wirtschaftsingenieurwesen, WI-[Report] Nr. 007, 2019.
- Kaiser und Simscek 2020 KAISER, Fabian; SIMSCHEK, Roman: *Prince2 Agile. Die Erfolgsmethode einfach erklärt*. 1. Aufl., Online: C.H.BECK oHG Verlag, 2020.
- Klein 2016 KLEIN, Thorsten P.: *Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau*. Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Dissertation, 2016.
- Komus et al. 2020 KOMUS, Ayelt; KUBERG, Moritz et al.: *Ergebnisbericht: Status Quo (Scaled) Agile 2019/20. 4. Internationale Studie zu Nutzen und Erfolgsfaktoren (skalierter) agiler Ansätze*. Hochschule Koblenz, BPM-Labor, Studie, 2020.
- Kusay-Merkle 2018 KUSAY-MERKLE, Ursula: *Agiles Projektmanagement im Berufsalltag. Für mittlere und kleine Projekte*. Berlin: Springer Verlag, 2018, S. 20.
- Kuster et al. 2019 KUSTER, Jürg; BACHMANN, Christian; HUBER, Eugen et al.: *Handbuch Projektmanagement. Agil-Klassisch-Hybrid*. 4. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2019.
- Maffin et al. 1997 MAFFIN, David; THWAITES, Alfred; ALDERMAN, Neil; BRAIDEN, Paul; HILLS, Bill: *Managing the Product Development Process: Combining Best Practice with Company and Project Contexts*, *Journal of Engineering Design*, Vol. 9, No. 1, Journals Oxford Ltd, 1997, S. 53-74 ff.
- Meißner et al. 2005 MEIßNER, Moritz; GERICKE, Kilian; GRIES, B. et. al.: *Eine adaptive Produktentwicklungsmethodik als Beitrag zur Prozessgestaltung in der Produktentwicklung*, in: *Proc. of 16th Symposium "Design for X" 2005*, Neukirchen, pp. 67-76.
- Negele et al. 1997 NEGELE, Herbert; FRICKE, Ernst; IGENBERGS, Eduard: *ZOPH – A Systemic Approach to the Modeling of Product Development Systems*, in: *Proceedings of 7th International Symposium, INCOSE 1997*, Los Angeles, CA: Wiley Online Library, pp. 266-273.
- Schneider 2015 SCHNEIDER, Stephan: *Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess am Beispiel der Motorenproduktion*, Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme, Dissertation, 2015
- Schwaber et al. 2020 SCHWABER, Ken; SUTHERLAND, Jeff: *Der Scrum Guide. Der gültige Leitfaden für Scrum: Die Spielregeln*. 2020. Verfügbar unter: <https://www.scrum.org/resources/scrum-guide> [Stand: 10/2022]
- Snowden und Boone 2007 SNOWDEN, David J.; BOONE, Mary E.: *A Leader's Framework for Decision Making*, veröffentlicht in *Harvard business review*, pp. 68-76, 2007.
- Stelzmann 2011 STELZMANN, Ernst S.: *Agile Systems Engineering*. Technische Universität Graz, Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, 2011.
- Stacey 1996 STACEY, Ralph D.: *Complexity and Creativity in Organizations*. San Francisco, CA: Berrett Koehler Publishers, 1996.
- Völl 2020 VÖLL, Wolfgang: *Hybrid-agiles Projekt-Management*. In: *Controlling & Management Review*, Online Ausgabe 5, 2020. Springer Professional Verlag, 2020.
- Wilmsen et al. 2019 WILMSEN, Miriam; DÜHR, Katharina; ALBERS, Albert: *A context-model for adapting design processes and methods*, in: *Proceedings of 29th CIRP Design Conference, CIRP Design 2019*, Póvoa de Varzim: Elsevier, pp. 428-433.

Schlüsselindikatoren für die nachhaltige Produktentwicklung von Fahrzeuginnenräumen

Key Indicators for Sustainable Product Development of Vehicle Interiors

Julia Gritzbach¹, Florian Reichelt¹, Wolfram Remlinger¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland

julia.gritzbach@iktd.uni-stuttgart.de
florian.reichelt@iktd.uni-stuttgart.de
wolfram.remlinger@iktd.uni-stuttgart.de
thomas.maier@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Die Forderungen, Nachhaltigkeit in der Automobilindustrie zu verankern, steigen. Dies führt vermehrt zu Handlungsbedarfen bei der Integration von Nachhaltigkeitsaspekten bereits in den frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung. Insbesondere die Mehrdeutigkeit von „Nachhaltigkeit“ sowie die notwendige Berücksichtigung aller relevanten Aspekte in der Produktentwicklung stellt die OEMs aktuell vor Herausforderungen. Gerade Fahrzeuginnenräume weisen durch ihren direkten Kontakt zu den nutzenden Personen eine zentrale Rolle für die Darstellung und Etablierung vom Markenimage auf. Daher ist die Identifikation relevanter Schlüsselindikatoren (KPIs), die bei der Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen erforderlich sind, um im Sinne einer möglichst umfassenden Nachhaltigkeit (sozial, ökologisch und ökonomisch) fundierte Entscheidungen während des Produktentwicklungsprozesses treffen zu können, notwendig. Ziel dieses Beitrags ist es daher einerseits bestehende KPIs hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Sinne einer umfassenden Nachhaltigkeit zu untersuchen. Andererseits wird eine Methode zur Identifikation relevanter KPIs für die nachhaltige Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen entwickelt.

Keywords (deutsch):

Nachhaltigkeit, Fahrzeuginnenräume, Schlüsselindikatoren

Abstract (english): There are increasing demands to integrate sustainability into the automotive industry. This leads to a growing necessity for integration of sustainability aspects already in the early phases of vehicle development. In particular, the manifold meaning of "sustainability" and the necessary consideration of all relevant aspects in product development currently challenge OEMs. Therefore, the identification of relevant key performance indicators (KPIs), which are required in the development of vehicle interiors in order to be able to make decisions during the product development process in terms of a comprehensive sustainability (social, ecological and economic), is necessary. Vehicle interiors in particular play a central role in the representation and establishment of the brand image due to the direct contact with the users. The aim of this contribution is therefore to investigate the applicability of existing KPIs for comprehensive sustainability. On the other hand, a method for the identification of relevant KPIs for the sustainable design of vehicle interiors is developed.

Keywords (english):

Sustainability, Vehicle Interiors, Key Performance Indicators

1 Einleitung

Nachhaltigkeit in Produkte zu implementieren, ist aktuell eine Herausforderung für viele Branchen. Auch in der Automobilindustrie haben die Anforderungen, Umweltauswirkungen in der Entwicklung einzubeziehen, Einzug gehalten. So werden in der Fahrzeugentwicklung die Handlungsbedarfe zur Gestaltung eines möglichst nachhaltigen Produkts immer relevanter. Insbesondere die facettenreiche Bedeutung von „Nachhaltigkeit“ sowie die notwendige Berücksichtigung aller relevanter Aspekte in der Produktentwicklung stellt eine Herausforderung dar. Nur Produkte, deren Auswirkungen in allen Nachhaltigkeitsdimensionen (sozial, ökologisch und ökonomisch) betrachtet werden, können glaubwürdig als nachhaltig kommuniziert und verkauft werden (Hetterich 2013). Ein Großteil der Auswirkungen eines Produktes, wie z. B. die Umweltbelastung, wird während der Entwicklungsphase festgelegt (McAloone und Bey 2011). Gerade Fahrzeuginnenräume weisen durch ihren direkten Kontakt zu den nutzenden Personen einige Besonderheiten auf, beispielsweise kann eine Nachhaltigkeitsstrategie über das Fahrzeuginnenraumdesign vermittelt werden. Diese Besonderheiten sollten bei Entscheidungen zwischen unterschiedlichen Interieur-Designs berücksichtigt werden. Allerdings fehlen Ansätze in Wissenschaft und Praxis, um die Erfassung und Steuerung von Nachhaltigkeitsaspekten für Fahrzeuginnenräume operationalisieren zu können. Eine zentrale Basis für Entscheidungen während der Produktentwicklung stellen Schlüsselindikatoren dar. Im Verlauf der Produktentwicklung werden verschiedene Designentscheidungen getroffen. Für diese existieren Indikatoren, die eine direkte Rekursion und somit Einflussnahme ermöglichen (Reichelt et al. 2022). Hetterich (2013) hat bereits methodische Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Produktentwicklung hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit unterstützt werden kann. Er verweist unter anderem auf das Problem, dass soziale Nachhaltigkeitsindikatoren sich bisher überwiegend auf Staaten oder auch Unternehmen beziehen, wohingegen speziell produkt- und prozessbezogene Indikatoren fehlen.

Ziel dieses Beitrags ist einerseits die Identifikation relevanter Schlüsselindikatoren, die bei der Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen erforderlich sind, um im Sinne einer möglichst umfassenden Nachhaltigkeit fundierte Entscheidungen während des Produktentwicklungsprozesses treffen zu können. Andererseits wird eine Methode vorgestellt, welche eine gezielte Unterstützung für Entwickler*innen und Entscheider*innen bei der Identifikation dieser relevanten Schlüsselindikatoren bereitstellt.

2 Herausforderungen nachhaltiger Schlüsselindikatoren für die Produktentwicklung

Zur Identifikation relevanter Schlüsselindikatoren für die Fahrzeuginnenraumentwicklung wurde zuerst eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Diese umfasste neben einem grundlegenden Verständnis über den Nachhaltigkeits-Begriff eine zielgerichtete Recherche zu Schlüsselindikatoren in der Produktentwicklung sowie zu bisherigen Ansätzen nachhaltiger Schlüsselindikatoren.

Im speziellen Kontext der Fahrzeuginnenraumentwicklung, insbesondere bzgl. Designentscheidungen in den frühen Phasen konnten keine adäquaten Schlüsselindikatoren in der Literatur identifiziert werden. Daher wurde ein Workshop mit Experten*innen der Fahrzeuginnenraumentwicklung durchgeführt. Innerhalb diesem wurden allgemeine Schlüsselindikatoren für Designentscheidungen bei der Innenraumentwicklung identifiziert und die Integration von nachhaltigen Schlüsselindikatoren diskutiert. Durch dieses Vorgehen konnten ein klarer Forschungs- und Handlungsbedarf festgestellt werden.

2.1 Nachhaltigkeit

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ bzw. „nachhaltig“ besitzt verschiedene Bedeutungen. In der öffentlichen Diskussion in Deutschland ist der Begriffe meist mit dem Thema Umwelt- und Klimaschutz verbunden (Schneekloth et al. 2022). International hat sich die Differenzierung nach drei Dimensionen der Nachhaltigkeit durchgesetzt. Die Aufteilung, die neben der ökologischen Nachhaltigkeit, auch ökonomische

Nachhaltigkeit sowie soziale Nachhaltigkeit beinhalten, ist der Ausgangspunkt vieler Nachhaltigkeitsstrategien bzw. -konzepte auf staatlicher und betrieblicher Ebene (Hauff 2014). Auch in diesem Beitrag wird „Nachhaltigkeit“ in diesem mehrdimensionalen Verständnis verwendet:

- Die ökologische Nachhaltigkeit beinhaltet den Schutz und Erhalt der Regenerationsfähigkeit der natürlichen Lebensgrundlagen.
- Das Ziel der ökonomischen Nachhaltigkeit ist ein ausgewogenes und dauerhaft mögliches Wirtschaften, das nicht einseitig oder sogar nur auf Kosten der nachfolgenden Generationen betrieben werden kann.
- Soziale Nachhaltigkeit, im Sinne einer fairen Verteilung von Nutzen und Lasten, mit der gesellschaftliche Spannungen und Konflikte vermieden werden können, ist jedoch ebenso wichtig, um die zukünftige ökologische, ökonomische und soziale Stabilität einer Gesellschaft zu gewährleisten.

Die dritte Dimension, die soziale Nachhaltigkeit, erfährt zunehmend mehr Aufmerksamkeit, wurde jedoch bisher noch weniger diskutiert bzw. inhaltlich ausgestaltet, wie die beiden anderen Nachhaltigkeitsdimensionen (Hauff 2014).

Kleine (2009) hat das integrierende Nachhaltigkeitsdreieck zur Operationalisierung von Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt. Es handelt sich dabei um ein Dreiecksdiagramm basierend auf dem Gibbs'schen Dreieck. Diese Darstellungsmethode zur Zusammensetzung von ternären Gemischen, lässt sich weitestgehend auf die drei Nachhaltigkeitsdimensionen übertragen. So wird, wie in Bild 1 (links) dargestellt, ein Kontinuum der drei Dimensionen geschaffen, in welchem sämtliche Abstufungen der Dimensionen Ökologie (x), der Ökonomie (y) und des Sozialen (z) mit verschiedenen Formeln darstellbar sind (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenhänge im integrierenden Nachhaltigkeitsdreieck

Ökologie (x)	Ökonomie (y)	Soziales (z)
$x = \frac{x}{x + y + z}$	$y = \frac{y}{x + y + z}$	$z = \frac{z}{x + y + z}$

Die Zusammenführung der drei Dimensionen im Dreieck, entspricht der zunehmenden Anforderung nach Integration (Hauff 2014). Um die Anwendbarkeit des Dreiecks zu gewährleisten, hat Kleine (2009) die in Bild 1 (rechts) dargestellten Felder eingeführt.

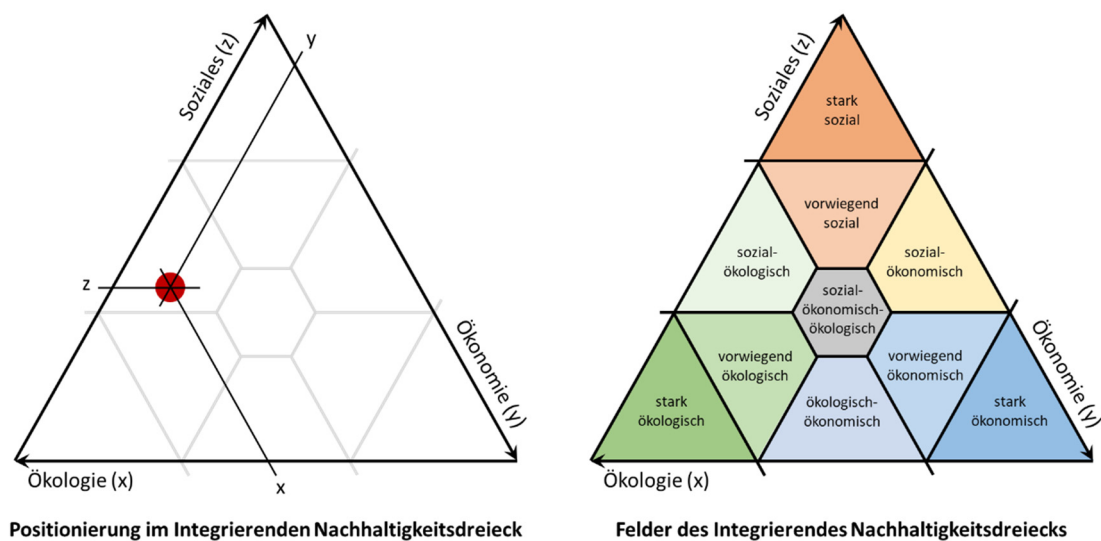


Bild 1: Integrierendes Nachhaltigkeitsdreieck nach Kleine (2009)

Der Detaillierungsgrad bildet dabei einen Kompromiss zwischen den Anforderungen einer größtmöglichen Zusammenführung und einer analytischen Differenzierung nach den drei Nachhaltigkeitsdimensionen. In den Ecken der „starken Zuordnung“, wird das Feld überwiegend von einer einzigen Dimension bestimmt, die anderen beiden Dimensionen haben in diesem eine geringe Bedeutung. In den Bereichen der „vorwiegenden Zuordnung“ überwiegt eine Dimension, die anderen beiden Dimensionen sind ebenfalls beeinflusst. In Anlehnung an das Schnittmengenmodell werden die Felder zwischen den Ecken und im Zentrum verwendet, in diesen dominieren zwei Dimensionen bzw. sind alle drei Dimensionen zu etwa gleichen Teilen betroffen. Die Schnittmengenkategorien sind das sozial-ökologische, sozial-ökonomische, ökologisch-ökonomische und sozial-ökologisch-ökonomische Feld. Die Systematisierung erfolgt zunächst durch die primäre Zuordnung anhand des unmittelbaren Erklärungsbeitrags und anschließend die sekundäre Zuordnung bezüglich indirekter und mittelbarer Auswirkungen, wodurch laut Hauff (2014) eine objektive Zuordnung ermöglicht werden soll.

2.2 Nachhaltige Schlüsselindikatoren für die Produktentwicklung

Für die Ausrichtung und Steuerung von Unternehmenszielen und -strategien werden als Hilfsmittel für entsprechende Entscheidungen Schlüsselindikatoren sog. Key Performance Indicators (KPIs) erhoben und berücksichtigt (Neely et al. 2000; Taylor und Ahmed-Kristensen 2018). Speziell in Bezug auf Geschäftsprozesse (vorwiegend bei Business-Cases) existiert eine Vielzahl an etablierten KPI-Sammlungen. Prinzipiell können KPIs in „leading“ und „lagging“ KPIs unterteilt werden (Kaplan und Norton 1996): Dabei messen „leading“ KPIs die Performanz von Prozessen und können somit direkt zur Steuerung von Prozessen verwendet werden, wohingegen „lagging“ KPIs den Erfolg von Prozessen (meist das resultierende Produkt) messen. Ein direkter Übertrag etablierter Business-KPIs auf die Produktentwicklung stellt sich schwierig dar. Die quantitative Messung von KPIs für die Entscheidungsfindung lässt sich durch die vorherrschende Dynamik im Produktentwicklungsprozess schwierig durchführen (Vajna 2005; Bender und Marion 2016; Taylor und Ahmed-Kristensen 2016). Daher werden meist „lagging“ KPIs verwendet (vgl. Taylor und Ahmed-Kristensen 2018; Reichelt et al. 2022). Eine Messung dieser KPIs ist erst in der Produktnutzung möglich, sodass eine Anwendung der Ergebnisse nicht im Verlauf der Produktentwicklung umgesetzt werden kann (Bender und Marion 2016; Ebel et al. 2021), sondern vielmehr für die Ausrichtung / Strategie eines nachfolgenden Projekts Anwendung finden.

Speziell in den frühen Entwicklungsphasen führt dieser Missstand zu weiteren Herausforderungen: Einerseits werden in den frühen Phasen die wesentlichen Entscheidungen zur Produktcharakteristik (Braess und Seiffert 2007; Widmann et al. 2021), dem Produktdesign (VDI 2424; Reichelt et al. 2022) sowie der Umweltauswirkungen auf die weiteren Phasen des Produktlebenszyklus (McAloone und Bey 2011) festgelegt. Eine Erfassung von Schlüsselindikatoren zur Entscheidungsfindung ist hier besonders notwendig. Andererseits sind die frühen Phasen jedoch durch unklare Anforderungen und offene Lösungsräume charakterisiert. Letztlich ist nur eine grobe Abschätzung von produktbezogenen KPIs möglich (Bender und Marion 2016). Zusammenfassend besteht somit die wesentliche Herausforderung allgemeiner KPIs in den frühen Phasen darin, dass einerseits die relevanten, produktbezogenen KPIs nicht in einer entwicklungsbezogenen Entscheidung verfügbar sind. Andererseits existieren prozessbezogene KPIs, welche jedoch schwer messbar sind und auf die Produktgestaltung keinen Einfluss haben.

In den frühen Phasen wird entschieden, welche Materialien und Herstellungsverfahren für die Produktion eines Produkts verwendet werden und wie das Produkt genutzt und entsorgt werden soll. Deshalb ist es wichtig, dass Nachhaltigkeitsaspekte so früh wie möglich in den verschiedenen Designentscheidungen des Produktentwicklungsprozesses integriert werden.

Jedes Produkt und sein gesamter Lebenszyklus, von der Beschaffung der Rohstoffe bis zur Entsorgung des Endprodukts, hat Auswirkungen auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit. In jeder Phase des Lebenszyklus kann das Produkt sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Umwelt, die Wirtschaft und die Gesellschaft haben. Ein Produkt, das energieeffizient ist und aus nachhaltigen Materialien hergestellt wird, hat beispielsweise eine geringere Auswirkung auf die Umwelt als ein weniger

energieeffizientes Produkt. Wird dieses jedoch auf eine Art und Weise produziert, die nicht den Menschenrechten entspricht, erfüllt es nicht den Prinzipien sozialer Nachhaltigkeit. Daher ist es wichtig, den gesamten Lebenszyklus eines Produkts zu berücksichtigen, um unerwünschte Auswirkungen zu minimieren und positiv assoziierte zu maximieren. Um die Auswirkungen eines Produkts in allen Zyklusphasen zu minimieren, ist ein spezifischer Designansatz, das Ecodesign, entstanden. Im Sinne des Ecodesigns haben Rodrigues et al. (2016) eine Sammlung von 787 KPIs für die Produktentwicklung vorgestellt, die auf einer dreistufigen systematischen Literaturrecherche basiert. Die Indikatoren sind sowohl in die verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen also auch in verschiedene Produktentwicklungsphasen klassifiziert. Es zeigt sich hierbei eine Asymmetrie in der Anzahl der für jede Nachhaltigkeitsdimension vorgeschlagenen KPIs, wobei wirtschaftliche Indikatoren dominieren, siehe Bild 2. Diese Asymmetrie verschärft sich im hier fokussierten Bereich der frühen Phasen der Produktentwicklung umso deutlicher.

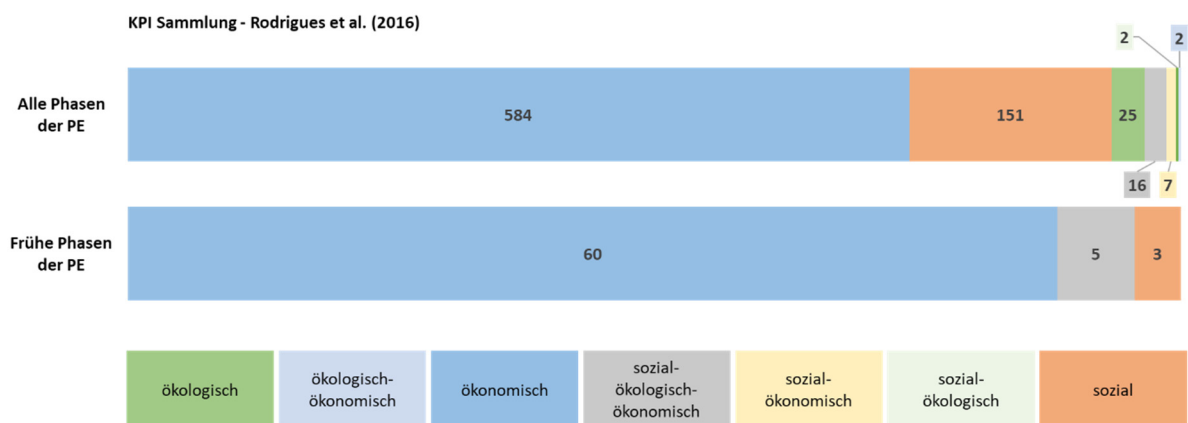


Bild 2: Aufteilung der von Rodrigues et al. (2016) identifizierten KPIs für die Produktentwicklung (PE).

2.3 Expertenworkshop zu Schlüsselindikatoren für die nachhaltige Fahrzeuginnenraumentwicklung

Im Verlauf der Literaturrecherche wurde deutlich, dass im Allgemeinen nur eine geringe Anzahl an relevanten KPIs für Entscheidungen in der Produktentwicklung existieren. Sowohl hinsichtlich der frühen Phasen als auch zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten, insbesondere bei der hier fokussierten Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen, existieren derzeit keine Ansätze oder KPIs nachhaltige Aspekte zu implementieren. Daher wurde ein Workshop mit Expert*innen aus dem Bereich der Fahrzeuginnenraumentwicklung konzipiert. Ziel dieses Workshops war es aus der Entwicklungspraxis heraus einerseits relevante KPIs für die Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen zu identifizieren. Andererseits sollte die Integration von nachhaltigen KPIs in bestehende Sets an Entscheidungsfaktoren diskutiert werden.

Der Workshop wurde im Dezember 2022 mit insgesamt neun Teilnehmer*innen durchgeführt. Zwei Teilnehmerinnen waren weiblich (11 %); der Altersdurchschnitt lag bei 33,6 Jahren (SD: 7,9 Jahre). Alle Expert*innen weisen mehrjährige Erfahrungen (M: 7,5 Jahre; max. 26 Jahre) in der Konzeptentwicklung (als wesentlichen Teil der frühen Phasen) von Fahrzeugen, bzw. Fahrzeuginnenräumen auf.

Zur Sammlung allgemeiner KPIs für Designentscheidungen in der frühen Interior-Entwicklung sollten zuerst KPIs berücksichtigt werden, die bereits Anwendung finden. Als Coverstory sollten sich die Expert*innen in eine Entscheidungssituation versetzen, in welcher zwischen mehreren Interior-Konzepten entschieden wird. Die für diese Entscheidung relevanten KPIs wurden zuerst mittels Brainwriting gesammelt und anschließend in der Gruppe diskutiert. Mittels Cardsorting wurden Cluster aus zusammenhängenden KPIs gebildet. Diese Cluster wurden anschließend entsprechend der Wichtigkeit für die Designentscheidung bewertet. Als Resultat dieses ersten Workshop-Abschnitts konnten neun Clus-

ter und 32 KPIs identifiziert werden. Die für Designentscheidungen relevanten KPI-Cluster sind: *Designstrategie, technischer Machbarkeit, Designqualität, Kundenorientierung, Nutzerzentrierung, Kosten, Ergonomie, Produktqualität* und *Gesetzgebung*.

Von den genannten KPIs stellen 14 der 32 (44 %) strategische Indikatoren dar. Diese dienen primär zur Überprüfung, ob die vorgeschlagenen Strategien Berücksichtigung finden. Diese Überprüfung ist zentraler Bestandteil der frühen Phasen. Des Weiteren zeigte sich, dass eine Priorisierung von KPIs ohne konkreten Projektkontext und -fokus, bzw. entsprechende strategische Vorgaben für das zu entwickelnde Produkt nicht möglich ist. Erst durch klare Vorgaben, welche die Ausrichtung des Produktes und somit die Rahmenbedingungen für das Projekt bestimmen, kann eine Gewichtung der relevanten Schlüsselfaktoren vorgenommen werden.

Für die allgemeine Sammlung entscheidungsrelevanter KPIs wurde der Begriff der Nachhaltigkeit bewusst nicht berücksichtigt. Im zweiten Schritt des Workshops wurde das bestehende Set an allgemeinen KPIs für die Interior-Entwicklung um spezifische KPIs für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten erweitert. Den Expert*innen wurde dafür zuerst die Aufgabe gestellt, wie aus den vorherrschenden Diskussionen zur nachhaltigen Produktgestaltung Anforderungen an das Produkt bzw. die Produktstrategie gestellt werden können. Im Anschluss an dieses Brainwriting wurde in der Gruppe diskutiert, inwieweit diese Anforderungen in KPIs formuliert, bzw. wie bestehende KPIs für die Erreichung dieser Anforderungen verwendet oder angepasst werden könnten.

Es hat sich gezeigt, dass die Integration der gesammelten Nachhaltigkeitsanforderungen in das bereits erstellte Set nicht umgesetzt werden konnte. Es entstanden Schwierigkeiten, die KPIs bzgl. der Nachhaltigkeitsanforderungen zu formulieren. Insgesamt war zu beobachten, dass Nachhaltigkeit zu implementieren, als komplexes Thema wahrgenommen wird. Wohingegen die KPIs für die Fahrzeuginnenraumentwicklung im Allgemeinen zu sammeln, als lösbares Problem aufgefasst wurde. Weiterhin wurden vorrangig prozessbezogene KPIs genannt. Beispielsweise wurde „Soziale Verantwortung in der Produktion“ genannt; also die Verantwortung des Unternehmens gegenüber den Arbeiter*innen in der Produktion, hinsichtlich Arbeitsbedingungen, Löhne und Arbeitszeiten. Diese sind, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, für produktbezogene Designentscheidungen nicht verwendbar, da die Auswirkungen nicht durch das Produkt selbst beeinflusst werden.

2.4 Forschungs- und Handlungsbedarfe

Auf Basis der Ergebnisse aus der Literaturrecherche ergab sich ein deutlicher Forschungs- und Handlungsbedarf bei der Implementierung nachhaltiger Schlüsselindikatoren in die Produktentwicklung. Für die frühen Phasen existieren erste Ansätze, wie prinzipiell KPIs für Designentscheidungen eingesetzt werden können (vgl. Reichelt et al. 2022). Allerdings berücksichtigen diese keine ganzheitlich nachhaltige Produktstrategie. Existierende Nachhaltigkeitsindikatoren beziehen sich entweder überwiegend auf Staaten oder Unternehmen (vgl. Hetterich 2013) oder aber stellen keine ganzheitliche Implementierung der Nachhaltigkeitsdimensionen dar (vgl. Rodrigues et al. 2016).

In diesem Beitrag wird die Innenraumentwicklung, bzw. Entscheidungen zum Interior-Design in der frühen Phase fokussiert betrachtet. Fahrzeuginnenräume stellen durch die direkte und permanente Interaktion mit den Insassen eine besondere Schnittstelle zwischen der unternehmensseitigen Nachhaltigkeitsstrategie und der vom Kunden wahrgenommenen Nachhaltigkeit des Produktes dar. Diese Interaktion ist bezeichnend, um ein Markenimage zu etablieren.

Für die Berücksichtigung dieser Strategien mittels KPIs in der frühen Entwicklungsphase von ganzheitlichen Fahrzeuginnenräumen existieren in der Literatur keine Ansätze. Daher wurde ein Expertenworkshop durchgeführt. Hierbei zeigte sich eine Analogie zu der durchgeführten Literaturrecherche: die Identifikation und Formulierung allgemeiner KPIs für die Designentscheidungen in den frühen Phasen der Innenraumentwicklung ist möglich. Die zielgerichtete Integration von nachhaltigkeitsbezogenen KPIs stellt jedoch eine Herausforderung dar, die mit bekannten Methoden, Modellen und Wissensständen derzeit nicht adäquat gelöst werden kann.

Es zeichnet sich ein Bedarf an einem methodischen Vorgehen zur systematischen Identifikation und Formulierung von KPIs, welche eine ganzheitlich nachhaltige Produktstrategie abdecken, ab.

3 Methode zur Identifizierung nachhaltiger KPIs für die Innenraumentwicklung

Basierend auf den Handlungsbedarfen wurde eine Methode zur Implementierung des Nachhaltigkeitskonzepts entwickelt. Der Entwicklung sowie der exemplarischen Anwendung der Methode liegen die Ergebnisse aus dem Expertenworkshop zu Grunde. Folglich entspricht die Entwicklung der Methode dem von Blessing und Chakrabarti (2009) beschriebenen formativen Entwicklung.

3.1 Methodenbeschreibung

Es konnte beobachtet werden, dass als Aufgabe geringen Schwierigkeitsgrads empfunden wird, allgemeine (nicht spezifisch mit Nachhaltigkeit verbundene) wichtige KPIs für die Fahrzeuginnenraumentwicklung zu ermitteln. Daher nutzt die nachfolgend vorgestellte Methode, dargestellt in Bild 3, bekannte allgemeine KPIs, um die mehrdimensionale Nachhaltigkeit im Produktentwicklungsprozess zu implementieren. Die bereits etablierten KPIs dienen als Ausgangspunkt, um nachhaltigkeitspezifische relevante KPIs für die Fahrzeuginnenraumentwicklung zu identifizieren.

Im ersten Schritt der Methode ist die Identifikation der *Ausgangssituation* notwendig. Diese bildet ein bereits bekannter relevanter KPI für eine beliebige Designentscheidung. Um das Vorgehen der Methode zu verdeutlichen, wird nachfolgend ein beispielhafter KPI aus dem Bereich der Ergonomie verwendet. Die „Erfüllung der ergonomischen Grundanforderungen“ misst die spezifische Anforderungserfüllung, die sicherstellt, dass ein Produkt oder eine Umgebung für den menschlichen Gebrauch passend entwickelt ist. Konkret bezieht sich dies auf z. B. Maße im Fahrzeuginnenraum oder das Anzeigen- und Bedienkonzept.

Im zweiten Schritt der Methode erfolgt eine *Klassifizierung* der bereits etablierten KPIs in Anlehnung an die Systematisierung von Kleine (2013). KPIs beziehen sich auf bestimmte Produkt- oder Prozesseigenschaften, somit stehen sie auch mit den Auswirkungen der jeweiligen gemessenen Produkt- bzw. Prozesseigenschaft auf die Umwelt in Verbindung. Die Klassifizierung erfolgt durch eine Auswirkungsabschätzung der gemessenen Produkt- oder Prozesseigenschaft. Wie diese Klassifizierung umgesetzt werden kann, wird im Folgenden erläutert. Um die Auswirkungsabschätzung möglichst einfach zu gestalten, wird eine Fokussierung auf die von den Auswirkungen betroffenen Subjekte bzw. Objekte vorgeschlagen. Zur Klassifizierung hinsichtlich der Nachhaltigkeitsdimensionen dient also die Frage „Auf wen oder was hat die gemessene Produkt-/Prozesseigenschaft Auswirkungen?“. Die Möglichkeiten hierbei sind:

- Ökologische Auswirkungen können naturwissenschaftlich beobachtet und beschrieben werden. Betroffen sind von ökologischen Auswirkungen Ökosysteme.
- Die Auswirkungen in der ökonomischen Dimension betreffen die Wirtschaft. Wirtschaft umfasst die Gesamtheit aller wirtschaftlichen Einrichtungen, wie z.B. Unternehmen, private und öffentliche Haushalte, und wirtschaftliche Handlungen, wie die Produktion und den Handel von Gütern.
- Um die Auswirkungen der sozialen Dimension zu bestimmen, wird auf die Soziologie zurückgegriffen. In der Soziologie werden verschiedene Analyseebenen verwendet, um soziale Phänomene zu untersuchen. Davon können folgende potentiell beeinflusste Subjekte abgeleitet werden: Individuum, Gruppe, Organisation bis Gesellschaft – damit verbunden ihre jeweiligen Wechselwirkungen.

Der Detaillierungsgrad der betroffenen Subjekte / Objekte ist so gering wie möglich gewählt. Alle Auswirkungen können durch Auswirkungen auf ein Ökosystem, die Wirtschaft und / oder Individuen bzw. ihre Wechselwirkungen erfasst werden. Wie in der Systematisierung von Kleine (2013) erfolgt zunächst die Zuordnung nach primären Auswirkungen und anschließend nach sekundären Auswirkungen. Die Visualisierung dieses Prozesses und das Ergebnis der Klassifizierung kann im integrierenden Nachhaltigkeitsdreieck erfolgen.

Für den Beispiel-KPI „Erfüllung der ergonomischen Grundanforderungen“ bedeutet dies die folgende Klassifizierung: Ob die ergonomischen Grundbedürfnisse im Fahrzeug erfüllt sind oder nicht, hat primär einen Einfluss auf die nutzende Person (Individuum). Das Fahrzeug kann sicher, präzise und komfortabel genutzt werden oder nicht. Sekundär kann die ergonomische Auslegung ein Kaufkriterium darstellen, das sich auf den Absatz (Wirtschaft) auswirkt. Die Auslegung der Bedienung kann Einfluss auf die Benutzung des Fahrzeuges haben, was z.B. weniger Emissionen (Ökosystem) mit sich bringen kann. Der KPI wird daher dem vorwiegend sozialen Feld zugeordnet.

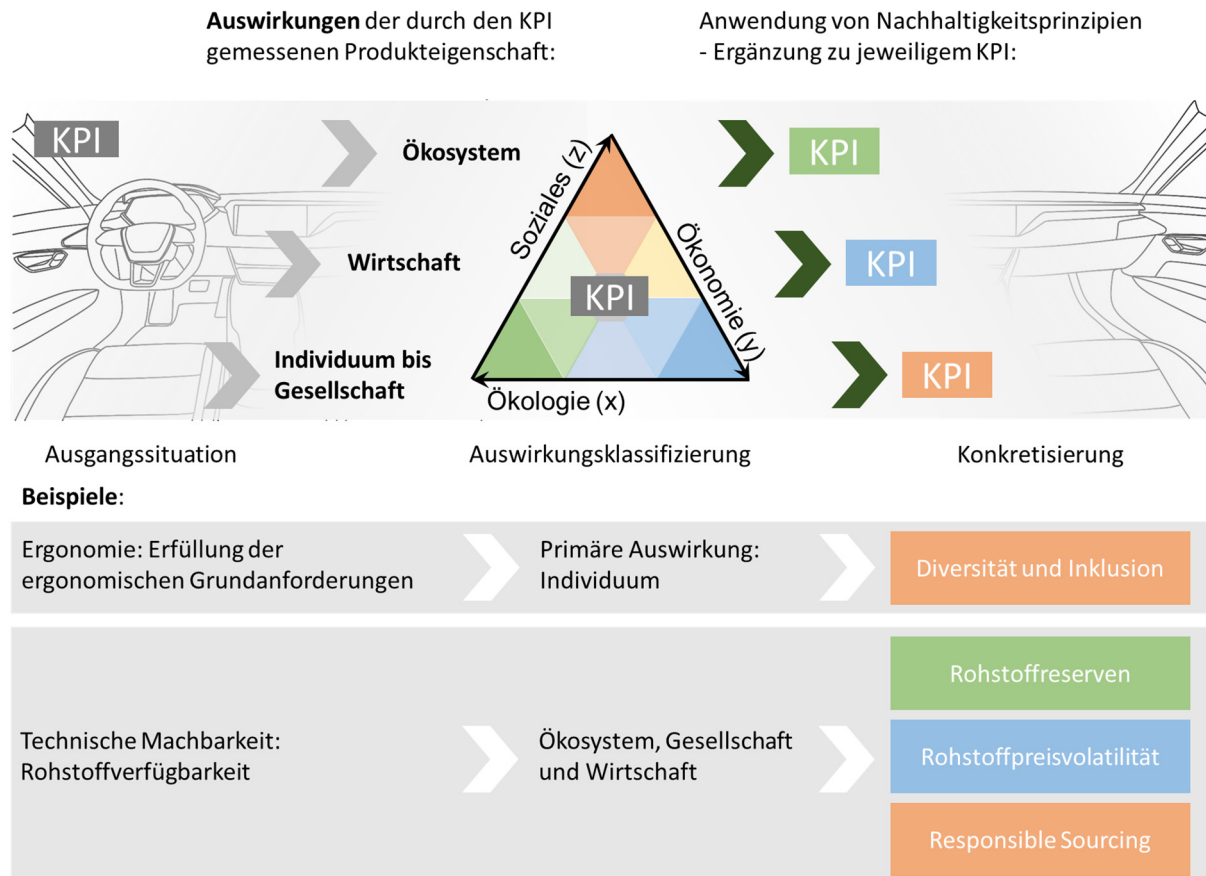


Bild 3: Methode zur Identifikation relevanter KPIs im Sinne der Nachhaltigkeit

Im dritten Schritt der Methode kann die durch die Klassifizierung gewonnene Übersicht weiter genutzt werden, indem die jeweiligen Auswirkungen hinsichtlich der Prinzipien der Nachhaltigkeit betrachtet werden. Im Zuge dieser *Konkretisierung* können für die Erreichung des gewünschten Zielzustands zusätzliche KPIs formuliert werden. Die anzuwendenden Prinzipien der Nachhaltigkeit können beispielsweise durch eine Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen verankert sein.

Bezogen auf die Wahl der ergonomischen Auslegung eines Fahrzeugs, lässt sich feststellen, dass diese die Nutzung des Fahrzeugs für bestimmte Personen ermöglicht, für andere Personengruppen jedoch nicht. Soziale Nachhaltigkeit umzusetzen, kann somit bedeuten, einen KPI für Diversität und Inklusion einzuführen. Somit ist beispielsweise eine gezielte Wahl eines Designs möglich, das die Berücksichtigung der Individualität und unterschiedliche körperliche Fähigkeiten von Personen unterstützt (z.B. verstellbare Lenkräder und Sitzpositionen) oder eines Designs, das das Fahrzeug für Personen mit eingeschränkter Mobilität zugänglich macht (z.B. durch erhöhte Einstiegshöhen oder rollstuhlgerechte Umbaumöglichkeiten).

3.2 Anwendungsbeispiel und Ableitung eines Sets an Schlüsselindikatoren für eine nachhaltige Fahrzeuginnenraumentwicklung

Im durchgeführten Expertenworkshop wurde, wie bereits erläutert, eine Sammlung an KPIs für die Fahrzeuginnenraumentwicklung erstellt und basierend auf den zusammengetragenen KPIs Überkategorien gebildet. Diese Sammlung wurde mittels KPIs aus der Literaturrecherche ergänzt und optimiert, z.B. durch die Entfernung von Duplikaten. Daraus ergaben sich in Summe 36 relevante KPIs (Ausgangssituation) die den neun Clustern zugeordnet sind. Dargestellt ist die Auswirkungsklassifizierung der gesammelten KPIs anhand ihrer Überkategorien im integrierenden Nachhaltigkeitsdreieck in Bild 4.

Insgesamt zeigt sich, dass die identifizierten KPIs für den Fahrzeuginnenraum und die damit verbundenen Produktentwicklungsentscheidungen sich vor allem auf die ökonomische und sozial-ökonomische Dimension beziehen. Die unter dem Cluster *Technische Machbarkeit* zusammengefassten KPIs können auch primäre ökologische Auswirkungen haben. Die gesammelten KPIs betreffen zudem überwiegend die Nutzungsphase.

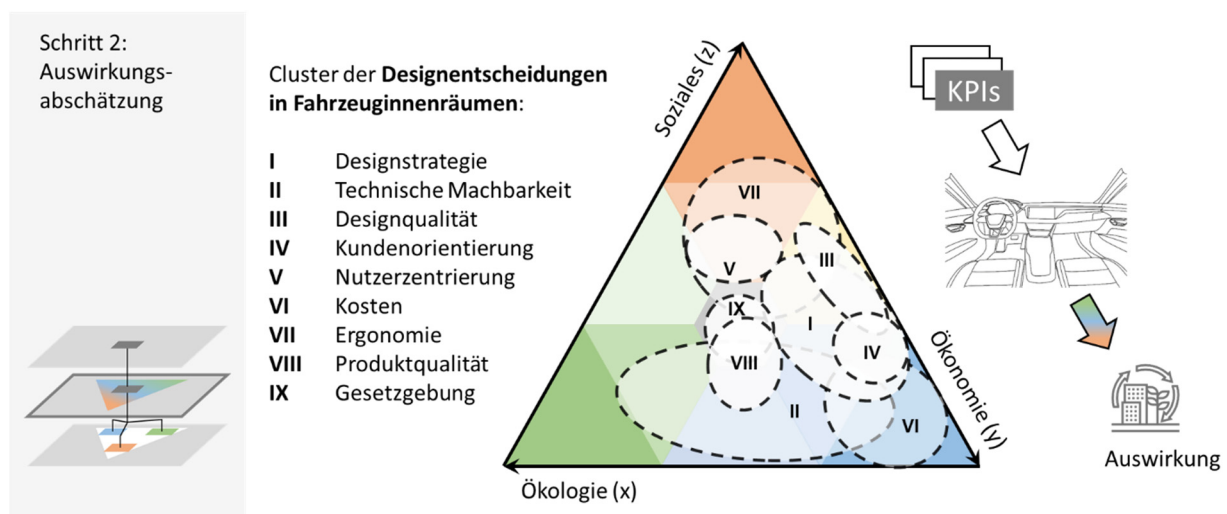


Bild 4: Klassifizierung der KPIs wichtiger Entscheidungsbereiche in der Fahrzeuginnenraumentwicklung

Die identifizierten wichtigen Entscheidungsbereiche der Fahrzeuginnenraumentwicklung werden im Folgenden mit der vorgestellten Methode beleuchtet und mögliche Anknüpfungspunkte der Nachhaltigkeitsprinzipien an die verschiedenen Bereiche vorgestellt. Dazu wird jeweils die *Ausgangssituation* erläutert, anschließend die *Klassifizierung* beschrieben und Beispiele genannt, wie im jeweiligen Entscheidungsbereich Nachhaltigkeit integriert und *konkretisiert* werden kann.

Zur **Designstrategie (I)** wurden im Workshop KPIs, wie die „wahrnehmbare Abgrenzung zum Vorgängerfahrzeug“, die „Erfüllung der Designvorgaben der Marke“ und die „Erfüllung strategischer Anforderungen“ genannt. Eine Designstrategie verknüpft das Design von Produkten mit den Unternehmensstrategien bzw. -zielen. Dies legt bereits nahe, dass eine primäre Auswirkung der von den KPIs gemessenen Produkteigenschaften in diesem Cluster ökonomische Aspekte (das Unternehmen) betrifft. Außerdem geht es um die Wahrnehmung des Designs, was eine Auswirkung auf den Menschen impliziert. Die meisten Designstrategie-KPIs können den ökonomischen Feldern (stark/vorwiegend) und dem sozial-ökonomischen Feld zugeordnet werden. Soll die Nachhaltigkeitsstrategie des Unternehmens durch den Fahrzeuginnenraum vermittelt werden, könnte ein KPI „Grad der wahrnehmbaren Nachhaltigkeit“ eingeführt werden. Die wahrnehmbare Nachhaltigkeit kann z.B. durch eine gezielte Materialgestaltung erreicht werden (vgl. Bobka et al. 2022).

Das Cluster **Technische Machbarkeit (II)** beinhaltet KPIs von der „Rohstoffverfügbarkeit“, über die „Herstellbarkeit“ bis zur „Gewichtsabschätzung“. Auf die Umweltauswirkungen von den Produkteigenschaften, wie z.B. des Werkstoffs, des Gewichts oder der Demontage gerechten Auslegung, kann das

Prinzip der Ökoeffizienz angewendet werden. Die Ökoeffizienz deckt das Feld ökologisch-ökonomisch ab (Hauff 2014). Es handelt sich dabei um ein Konzept, das sich auf die Verwendung von Ressourcen in einer Weise konzentriert, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch nachhaltig ist. Dies kann beispielsweise durch die Einführung von technologischen Innovationen, die Verwendung von erneuerbaren Ressourcen oder die Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit umgesetzt werden.

Die **Designqualität (III)** mit dem KPI „ästhetische Gesamterscheinung“, ist nicht nur ein Kaufkriterium, sondern betrifft vor allem die menschliche Wahrnehmung (das Individuum). Ein Design, das weniger schnell veraltet, kann die Notwendigkeit eines Austauschs reduzieren (Kraus 2007; VDI 2424). Somit können durch die Wahl des passenden, wahrnehmbaren Designalters Menschen zu einer längeren Nutzung eines Produktes animiert werden.

Weitere Designentscheidungen im Fahrzeuginnenraum betreffen die **Kundenorientierung (IV)**. KPIs wie die „Erfüllung der Zielgruppen-Anforderungen“ werden als vorwiegend ökonomisch eingestuft. Primär geht es um den Verkauf des Fahrzeugs, sekundär sind auch Auswirkungen auf soziale und ökologische Aspekte möglich, da Kunden zunehmend nachhaltige Produkte fordern (Hetterich 2013; Bobka et al. 2022). Die Studie von Bobka et al. (2022) zeigt, dass es notwendig ist, nachhaltige Materialien mit einem zielgruppen-spezifischen und hochwertigen Design zu kombinieren.

Im Expertenworkshop wurden eine Unterteilung von Kunden- und **Nutzerzentrierung (V)** erarbeitet, da Kund*innen und Nutzer*innen nicht immer dieselben Personen sind. Die Unterteilung wurde auch für die weitere Bearbeitung beibehalten, da nutzerzentrierte Entscheidungen auf die Nutzung fokussiert sind und primär weniger auf den Verkauf. Die primären Auswirkungen betreffen eher das Individuum. Es kann also auch hier vor allem betrachtet werden, wie die Fahrzeugnutzer*innen durch den Innenraum beeinflusst werden. Es könnte auf verschiedenen Ebenen zu nachhaltigerem Verhalten beigetragen werden, beispielsweise durch ein Innenraumkonzept, das für bestimmte Mobilitätskonzepte (Car-Sharing) optimiert ist und zur Nutzung dieser beiträgt.

Die KPIs die dem Bereich **Kosten (VI)** zugeordnet werden, sind stark ökonomisch. Bei den in der Sammlung enthaltenen KPIs wurde für dieses Cluster keine Notwendigkeit zur Ableitung neuer KPIs identifiziert.

Das gebildete Cluster der **Ergonomie (VII)** ist ähnlich zum Bereich der Nutzerzentrierung. Es wäre möglich die Bereiche zusammenzufassen, da die ergonomische Auslegung in jedem Fall nutzerzentriert ist und so einen Teilbereich der nutzerzentrierten Produktentwicklung darstellt. Um die Auseinandersetzung mit der Nutzbarkeit des Fahrzeuginnenraumes hervorzuheben, wird der Bereich dennoch abgegrenzt betrachtet. Die Einordnung und eine mögliche Berücksichtigung durch einen Indikator ist bereits im vorherigen Abschnitt 3.1. erläutert.

Die **Produktqualität (VIII)** kann in allen Dimensionen primäre Auswirkungen haben. KPIs, die Aspekte der Produktqualität messen, sind deshalb überwiegend im Zentrum des integrierenden Nachhaltigkeitsdreiecks angeordnet. Eine hochwertige Produktqualität kann zu einer erhöhten Produktlebensdauer führen, den Ressourcenverbrauch und den ökologischen Fußabdruck minimieren.

Die **Gesetzgebung (IX)** spielt ebenfalls eine Rolle für die Fahrzeuginnenraumentwicklung. Die „Erfüllung gesetzlicher Vorgaben“ ist ein Indikator, der nicht vernachlässigt werden darf, denn ohne die Einhaltung ist ein Vertrieb bzw. die Benutzung des Fahrzeugs nicht möglich. Die Berücksichtigung der Gesetzgebung regelt Auswirkungen in allen Dimensionen. Gesetze zur Produktsicherheit, die die Sicherheit des Fahrzeuginnenraums während seiner Nutzungsdauer beeinflussen, beziehen sich auf die Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit des Menschen. Hier bedarf es keiner Ableitung eines weiteren KPIs, da die notwendigen Vorgaben vom Gesetzgeber stammen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um die nachhaltige Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen umzusetzen, ist es wichtig, bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung die Prinzipien der Nachhaltigkeit in Designentscheidungen einfließen zu lassen. Spezifische KPIs für die Fahrzeuginnenraumentwicklung fehlen jedoch. Die durchge-

fürte Literaturrecherche hat gezeigt, dass es notwendig ist, relevante KPIs spezifisch für den Fahrzeuginnenraum zu entwickeln. Im durchgeführten Expertenworkshop war es möglich eine umfassende allgemeine KPI Sammlung zu erstellen, die die unterschiedlichsten Bereiche der Fahrzeuginnenraumentwicklung abdeckt, wohingegen es nicht möglich war, nachhaltigkeitspezifische KPIs zu identifizieren. Daher erfolgte die Methodenentwicklung zur Identifizierung nachhaltigkeitspezifischer KPIs. Die Methode umfasst drei Schritte. Im ersten Schritt werden relevante KPIs für die Fahrzeuginnenraumentwicklung gesammelt, im zweiten Schritt erfolgt eine Auswirkungsklassifizierung in Anlehnung an das integrierende Nachhaltigkeitsdreieck von Kleine (2013) und darauf folgend abschließend die Ableitung der nachhaltigkeitspezifischen KPIs.

Als Anwendungsbeispiel der entwickelten Methode werden die verschiedenen Bereiche der Fahrzeuginnenraumentwicklung systematisch betrachtet und erste KPIs zur nachhaltigen Entwicklung von Fahrzeuginnenräumen abgeleitet. Bezüglich der Entscheidungen im Fahrzeuginnenraum, bzw. den dafür verwendeten KPIs, hat sich gezeigt, dass viele Designentscheidungen die nutzenden Personen betreffen. Durch die Visualisierung im integrierenden Nachhaltigkeitsdreieck wird deutlich, dass stark ökologische, sozial-ökologische und stark soziale Auswirkungen bisher wenig Berücksichtigung finden. Im Sinne einer umfassend nachhaltigen Produktentwicklung sollten speziell in diesen Bereichen zusätzliche KPIs integriert werden. Die methodische Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Bereichen der Fahrzeuginnenraumentwicklung hat deutlich gemacht, dass in der Fahrzeuginnenraumentwicklung die Besonderheit der Möglichkeit zur Integration von Nachhaltigkeit über den Kontakt und Einfluss auf die Insassen des Fahrzeugs besteht.

Die mittels der Methode identifizierten Schlüsselfaktoren stellen eine erste spezifische Sammlung an KPIs für die nachhaltige Fahrzeuginnenraumentwicklung dar. Insbesondere durch die während der beispielhaften Methodenentwicklung abgeleiteten Konkretisierungen der neun Cluster existiert eine Grundlage für die weitere Entwicklung nachhaltiger KPIs für Designentscheidungen in den frühen Phasen der Fahrzeuginnenraumentwicklung. Ausgehend von diesem ersten Entwurf muss jeweils ein entsprechend der Rahmenbedingungen und Nachhaltigkeitsstrategie gewichtetes projekt- und produkt-spezifisches Set an KPIs entwickelt werden.

Im nächsten Schritt wird eine Evaluation der Methode durchgeführt, um diese sukzessive für das spezifische Anwendungsgebiet der Fahrzeuginnenraumentwicklung in den frühen Phasen zu optimieren. Eine mögliche Weiterentwicklung der Methode könnte dabei die Konkretisierung der Klassifizierung durch den Einsatz eines Fragenkatalogs darstellen. Sodass die Einordnung der KPIs in die entsprechende Kategorie erleichtert werden kann. Damit kann eine Operationalisierung der Methode in den Entwicklungsalltag ermöglicht werden.

Literatur

- Bender und Marion, 2016 BENDER, Beate ; MARION, Steven: *Dimensions of Product Development Success*. In: *DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference* (2016), S. 1455–1464.
- Blessing und Chakrabart, 2009 BLESSING, Lucienne T.M. ; CHAKRABARTI, Amaresh: *DRM, a Design Research Methodology*. London : Springer London, 2009.
- Bobka et al. 2022 BOBKA, Karin ; KERN, Mira ; KLUGE, Niklas ; RIESTER, Yvonne ; STEGMÜLLER, Sebastian: *Material Matters: Internationale Nutzerstudie über Materialanforderungen und die Wahrnehmung von Nachhaltigkeit im Fahrzeuginnenraum*. Stuttgart: Fraunhofer-Publica, 2022.
- Braess und Seiffert 2007 BRAESS, Hans-Hermann; SEIFFERT, Ulrich : *Automobildesign und Technik : Formgebung, Funktionalität, Technik*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2007.
- Hauff 2014 HAUFF, Michael von: *Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung*. 2. Aufl. Berlin, München, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2014.

- Hetterich 2013 HETTERICH, Jörg: *Integration von ökologischer Nachhaltigkeit als Kundenbedürfnis. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung von Fahrzeuginnenraumkomponenten*. Leuphana Universität Lüneburg, Institut für Produkt- und Prozessinnovation, Dissertation, 2013.
- Kaplan und Norton, 1996 KAPLAN, Robert S. ; NORTON, David P.: *Linking the Balanced Scorecard to Strategy*. In: *California Management Review* 39 (1996), Nr. 1, S. 53–79.
- Kleine 2009 KLEINE, Alexandro: *Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie. Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren*. Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2009.
- Kraus 2007 KRAUS, Wolfgang: *Grundsätzliche Aspekte des Automobildesigns* In: BRAESS, Hans-Hermann; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Automobildesign und Technik : Formgebung, Funktionalität, Technik*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2007.
- McAloone und Bey 2009 MCALOONE, Tim; BEY, Niki: *Environmental improvement through product development: A guide*. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2009.
- Neely et al. 2000 NEELY, Andy ; MILLS, John ; PLATTS, Ken ; RICHARDS, Huw ; GREGORY, Mike ; BOURNE, Mike ; KENNERLEY, Mike: *Performance measurement system design: developing and testing a process-based approach*. In: *International Journal of Operations and Production Management* 20 (2000), Nr. 10, S. 1119–1145.
- Reichelt et al. 2022 REICHELT, Florian ; HOLDER, Daniel ; BOSCH, Paulina ; MAIER, Thomas: *How to support the appropriate method selection in design-technology-convergence?* In: *Human Factors in Management and Leadership : AHFE International* (2022), S. 68-78.
- Rodrigues et al. 2016 RODRIGUES, Vinícius P.; PIGOSSO, Daniela C.A.; MCALOONE, Tim C.: *Process-related key performance indicators for measuring sustainability performance of ecodesign implementation into product development*. In: *Journal of Cleaner Production* 139 (2016), S. 416–428.
- Schneekloth et al. 2022 SCHNEEKLOTH, Ulrich; RYSINA, Anna; WOLFERT, Sabine; LANGNESS, Anja; GÖRTZ, Regina von: *Jugend und Nachhaltigkeit: Was die Next Generation mit Nachhaltigkeit verbindet und wie sie sich engagiert*. Gütersloh: Bertelsmann Stiftung, 2022.
- Taylor & Ahmed-Kristensen 2016 TAYLOR, Thomas Paul ; AHMED-KRISTENSEN, Saeema: *GLOBAL PRODUCT DEVELOPMENT: KPI SELECTION SUPPORT*. In: *DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference* (2016), S. 1615–1624.
- Taylor & Ahmed-Kristensen, 2018 TAYLOR, Thomas Paul ; AHMED-KRISTENSEN, Saeema: *Decision support and performance measurement for global product development : A practical guide for industry*. [Kbh.] : Industriens Fond, 2018.
- Vajna, 2005 VAJNA, Sándor: *Workflow for design*. In: CLARKSON, John; ECKERT, Claudia (Hrsg.): *Design process improvement : A review of current practice*. London : Springer, 2005, S. 366–385.
- VDI 2424 VDI-Richtlinie 2424. Juli 2021. *VDI 2424 - Industriedesign - Nutzerzentrierte Gestaltung im Produktentwicklungsprozess*.
- Widmann et al., 2021 WIDMANN, Ulrich ; WEISSINGER, Jürgen ; BREITLING, Thomas ; HACKENBERG, Ulrich ; WUNDRAM, Kai ; GOß, Stefan: *Produktentstehungsprozess*. In: PISCHINGER, Stefan; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 1271–1382.

Herausforderungen bei der Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Produktentwicklung von Unternehmen

Challenges in integration of sustainability requirements into product development of companies

Barbara Gröbe-Boxdorfer^{1,2}, Werner Engeln¹

¹Hochschule Pforzheim, Fakultät Maschinenbau

²Technische Universität Dresden, Professur für Technisches Design

Barbara.groebe@hs-pforzheim.de

Abstract (deutsch):

Klimawandel und Ressourcenknappheit werden in Zukunft auch die Unternehmen vor große Herausforderungen stellen. Dabei nimmt die Produktentwicklung in einem Unternehmen für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen eine zentrale Rolle ein. Dieser Beitrag befasst sich mit der Frage, wie Personen in Unternehmen aktuell die Potenziale zur Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Unternehmen und in die Produktentwicklung einschätzen und wo ihrer Meinung nach die Probleme bei der Umsetzung von Nachhaltigkeitsanforderungen in der Produktentwicklung eines Unternehmens bestehen.

Es wird ein Überblick über die Ergebnisse einer qualitativen empirischen Untersuchung in Form einer Expertenbefragung mit Industrievertretern unterschiedlicher Branchen gegeben. Dabei zeigt sich, dass eine differenzierte Betrachtungsweise des Themas unbedingt weiter erforderlich ist, parallel vorangetrieben durch eine frühe Einführung des Themas in Bildungs- und Ausbildungsprogramme. Ein Ausblick auf die weitere Forschung schließt den Beitrag ab.

Stichworte: Produktentwicklung, Nachhaltigkeit, Komplexität, Kontextfaktoren

Abstract (english):

Climate change and scarcity of resources will play an increasingly important role for companies in the future. In this context, product development in a company plays a central role in achieving sustainability goals. This paper addresses the question of how people in companies currently assess the potential for integrating sustainability requirements into companies and product development, where they think the problems lie in implementing sustainability requirements in a company's product development.

An overview is given of the results of a qualitative empirical study in the form of an expert survey with industry representatives from various sectors. It is shown that a differentiated approach to the topic is absolutely necessary further, driven in parallel by an early introduction of the topic in education and training programs. The article concludes with an outlook on further research.

Keywords: product development, sustainability, complexity, contextual factors

1 Einleitung

Seit dem Fünften Sachstandsbericht (AR5) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gibt es stärkere Belege für beobachtete Veränderungen von Wetterextremen und insbesondere für deren Zuordnung zum Einfluss des Menschen (IPCC, 2021, S. 7). Menschliches Handeln, beispielsweise die Rodung der Regenwälder, industrielle Produktion und der übermäßige Rohstoffverbrauch führen zu Klimaveränderungen, die wiederum Auswirkungen auf die menschliche Gesellschaft haben (IPCC, 2022a). Allein der Industriesektor war 2018 für insgesamt etwa 35% der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich (Lamb et al., 2021). Die CO₂-Emissionen aus der Industrie werden laut Projektionen des Weltklimarates im Jahr 2050 circa 50–90 % geringer sein als noch 2010 (IPCC, 2018). Diese Minderungen könnten unter anderen durch Kombinationen von neuen und bestehenden Technologien und Methoden erzielt werden, zum Beispiel Elektrifizierung, nachhaltige biobasierte Rohstoffe und Produktersatz (IPCC, 2018). Bei der Umsetzung stehen jedoch häufig wirtschaftliche, finanzielle und menschliche Ansprüche im Weg. Dabei besteht in der Wissenschaft und Politik inzwischen weitgehende Einigkeit darüber, dass die erforderlichen gesellschaftlichen Transformationen zur Eingrenzung der Klimaerwärmung nicht ohne einen Wandel der gegenwärtigen Produktions- und Konsummuster sowie der existierenden Planungs- und Entscheidungsprozesse möglich sein werden (Grunwald & Kopfmüller, 2022, S. 139-140). Die Produktentwicklung in Unternehmen nimmt in Bezug auf ökologische Nachhaltigkeitsentwicklungen eine wichtige Rolle ein, denn hier wird täglich u. a. über neue Produkte, Materialeinsatz, Herstellverfahren, Recyclingfähigkeit, Reparierbarkeit von Produkten aber auch deren Energieverbrauch während der Nutzung entschieden. Festlegungen, die hier getroffen werden, haben einen großen Einfluss auf die nachgelagerten Entwicklungsphasen und das Produktverhalten während der Nutzung (Albers et al., 2017; Bender & Gericke, 2021; Engeln, 2020). Gleichzeitig zeigt ein Blick in die Unternehmen, wie groß die Herausforderungen in Bezug auf die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen immer noch sind (Samantray & Sahu, 2021). Dieses Paper befasst sich daher mit der Frage, wie Personen in Unternehmen aktuell die Potenziale zur Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Produktentwicklung einschätzen und worin ihrer Meinung nach die Probleme bei der Umsetzung von Nachhaltigkeitsanforderungen in der Produktentwicklung eines Unternehmens bestehen. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse einer qualitativen empirischen Untersuchung. Ziel der Untersuchung war es, anhand der Einschätzung unterschiedlichster Personen, die in unterschiedlichsten Beziehungen zu produzierenden Unternehmen stehen, Anhaltspunkte herauszufinden, für die Schwierigkeiten des Eingangs von Nachhaltigkeitszielen in die tägliche Arbeit der Unternehmen. Dabei war von besonderem Interesse, wie hierzu die Einflussmöglichkeiten der Produktentwicklung gesehen werden, ohne dass diese explizit abgefragt wurden. Die Ergebnisse dieser Studie dienen als Basis für eine größere Studie, die speziell die Produktentwicklung betrachten soll und die in diesem Jahr durchgeführt wird. Zuletzt wird ein Ausblick gegeben, welche weiteren Forschungsschritte geplant sind.

2 Stand der Forschung

Die Analyse bisheriger Forschungsarbeiten aus den letzten Jahren zeigt, dass ein großer Teil der Veröffentlichungen sich auf die Entwicklung und Untersuchung konkreter Werkzeuge und Methoden zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Unternehmen fokussiert (Bovea & Pérez-Belis, 2012; Byggeth et al., 2007; Tischner & Moser, 2015). Gleichzeitig bezieht sich der andere Teil der Veröffentlichungen auf die Identifikation der Treiber und Barrieren bei der Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Unternehmen. Dabei stehen insbesondere Unsicherheiten, Komplexität, mangelndes Wissen und weitere Faktoren bei der Anwendung konkreter Werkzeuge und Methoden im Rahmen der täglichen Entscheidungsfindungsprozesse im Weg (Poulikidou et al., 2014; Rossi et al., 2016). Weitere Treiber und Barrieren sind in Tabelle 1 dargestellt, jedoch ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Auch neuere Untersuchungen zeigen, dass trotz der großen Anzahl an verfügbaren

Methoden und Werkzeugen die Nachhaltigkeitsanforderungen bis heute noch schwer ihren Weg in die Unternehmen und den konkreten Produktentwicklungsprozess finden (Samantray & Sahu, 2021; Scholz et al., 2018). Die vorliegende Untersuchung geht von der Annahme aus, dass Methoden allein und eine reine Identifikation der Hindernisse noch nicht zu ihrer Überwindung führt, sondern vielmehr eine genaue Untersuchung der Bezüge nachhaltigkeitsrelevanter Faktoren zueinander im Zusammenhang mit spezifischen Unternehmens- und Personenkontexten sinnvoll wäre.

Treiber	Barrieren
<p>Entwicklungsprozess</p> <ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigung im Entwicklungsplan (Johansson 2002) - Integration in bestehenden Produktentwicklungsprozess (Johansson 2002) - Einführung von Umweltkontrollpunkten und Meilensteinen (Johansson 2002; Boks 2006) - Unternehmensspezifische Umweltgestaltungs-Prinzipien, -Normen (Johansson 2002; Boks 2006) - Durchführung im funktionsübergreifenden Team (Johansson 2002) - Verwendung unterstützender Werkzeuge (Johansson 2002; Boks 2006) <p>Lieferanten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Enge Lieferantenbeziehung (Johansson 2002) <p>Management</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anforderung aus dem Management (Johansson 2002; Bey et al. 2013) - Umweltziele Teil der Unternehmensstrategie (Johansson 2002; Pujari 2003) - Umweltziele Teil der Technologiestrategie (Johansson 2002; Boks 2006) - Umweltziele in allen Geschäftsaktivitäten (Boks 2006) - Einführung produktorientierter Umweltmanagementsysteme (Tukker 2001) <p>Wissen & Motivation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Personal ausbilden und schulen (Johansson 2002) - Einsatz eines Umweltexperten (Johansson 2002; Pujari 2003) - Best-Practice Beispiele (Johansson 2002) - Neues Mindset im Bezug auf Umweltthemen (Johansson 2002) - Ermunterung der Mitarbeiter (Johansson 2002) <p>Wettbewerb</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vermeidung schlechter Presse (Bey et al. 2013) - Wettbewerbsvorteil (Bey et al. 2013) - Marketingkommunikation (Tukker 2001) <p>Gesetzgebung (Bey et al. 2013)</p> <p>Kunden</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kundenanforderungen (Johansson 2002; Bey et al. 2013) - starke Kundenorientierung (Johansson 2002) - Schulung der Kunden in Umweltfragen (Johansson 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mangelnde Zusammenarbeit zwischen den Bereichen (Boks 2006; Tischner & Moser 2015) - Mangel an Material- und Komponentenalternativen (Bey et al. 2013) - Mangel an Ressourcen (Bey et al. 2013; Ramirez et al. 2014) - Mangel an geeigneter Infrastruktur (Boks 2006) <ul style="list-style-type: none"> - Barrieren in der Zusammenarbeit mit Lieferanten (Ramirez et al. 2014) <ul style="list-style-type: none"> - Mangelnde Unterstützung durch das Management (Boks 2006) - Trägheit des Systems (Ramirez et al. 2014; Tischner & Moser 2015) - träges Verhalten Einzelner (Ramirez et al. 2014; Tischner & Moser 2015) - Diskrepanz zwischen Befürwortern und Ausführenden (Boks 2006) <ul style="list-style-type: none"> - fehlende Information (Bey et al. 2013) - Expertenwissen notwendig (Bey et al. 2013) <ul style="list-style-type: none"> - fehlende Kundenanforderungen (Bey et al. 2013) - Kunden zahlen Mehrpreis nicht (Ramirez et al. 2014)

Tabelle 1: Treiber und Barrieren bei der Einführung von Nachhaltigkeitsthemen

3 Methodisches Vorgehen der durchgeführten Untersuchung

Für die Datenerhebung wurde die Methode des teilstandardisierten Experteninterviews anhand eines Interviewleitfadens gewählt. Diese Methode ist gut geeignet, wenn es um die Erfassung von Deutungen, Handlungsmotiven und Einstellungen der Befragten selbst geht (Hopf, 2019). In den Interviews wurden offene Fragen zu den individuellen Erfahrungen, Einschätzungen und aktuellen Arbeitskontexten der Befragten im Zusammenhang mit Nachhaltigkeitsaspekten im unternehmerischen und privaten Umfeld gestellt, die frei moderiert und diskutiert wurden. Der Interview-Leitfaden wurde bewusst kurzgehalten und je nach Gesprächsverlauf flexibel in Reihenfolge und Gewichtung der Fragen gehandhabt (siehe Tabelle 2).

Das Interviewsampling sah eine bewusste Kombination variationsreicher Fälle vor. Für die Auswahl der Interviewten war entscheidend, dass sie aus verschiedenen Branchen kamen, in verschiedenen Positionen im Unternehmen tätig waren und möglichst unterschiedlichen Alters waren, um Denkweisen und Auffassungen verschiedener Generationen mit aufzunehmen. Unter den Befragten waren fünf Personen aus der Geschäftsführung, zwei aus dem Projektmanagement, eine aus dem Vertrieb, eine aus dem Marketing, eine aus der Produktion, eine aus einer Unternehmensberatung, sowie zwei Studierende aus den Studiengängen Produktentwicklung und International Fashion Retail. Als Befragungsteilnehmende mit spezifischen Einblicken können der externe Berater sowie die beiden Studierenden mit Praxiserfahrung angesehen werden. Bewusst wurde kein Schwerpunkt auf Personen gelegt, die selbst in der Entwicklungsorganisation eines Unternehmens arbeiten. Dieser spezifische Personenkreis wird in der für dieses Jahr geplanten Untersuchung genauer betrachtet. Der jeweilige Ausbildungshintergrund der Befragungsteilnehmenden ist in Abbildung 1 ersichtlich.

1. Nachhaltigkeit im privaten persönlichen Kontext
Was bedeutet für Sie Nachhaltigkeit?
Welche Berührungspunkte haben Sie im privaten Umfeld zur ökologischen Nachhaltigkeit?
Durch welche Faktoren wurde Ihre Einstellung / Ihr Verhalten geprägt?
Machen Sie sich Sorgen um die Zukunft?
2. Nachhaltigkeit im unternehmerischen Kontext
Wo werden Sie in ihrem beruflichen Kontext mit Nachhaltigkeit konfrontiert?
Wer trägt Nachhaltigkeitsaspekte und -anforderungen in das Unternehmen?
Welche Faktoren könnten Ihrer Meinung nach Unternehmen und Mitarbeiter dazu bewegen, die ökologische Nachhaltigkeit als Leitbild zu übernehmen?
Was sind Herausforderungen für unternehmerisches nachhaltiges Handeln?
Wo sind mögliche Ansatzpunkte zur Integration von Nachhaltigkeit im Unternehmen / am Produkt?
Ist Nachhaltigkeit eine Kundenanforderung?
Ist Nachhaltigkeit ein Gesprächsthema im Unternehmensalltag?

Tabelle 2: Interview-Leitfaden

In Anbetracht der Schwierigkeit, Daten von Organisationen zu erheben, wurden die Befragten über Kontakte im Umfeld des Autor:innen-Teams rekrutiert. Insgesamt wurden 13 Interviews mit Expert:innen aus Unternehmen in Baden-Württemberg geführt. Unter den Befragten waren drei Frauen und zehn Männer. Die Teilnehmenden waren zwischen 22 und 76 Jahre alt, das Durchschnittsalter betrug 41 Jahre (Standardabweichung $SD = 15,4$).

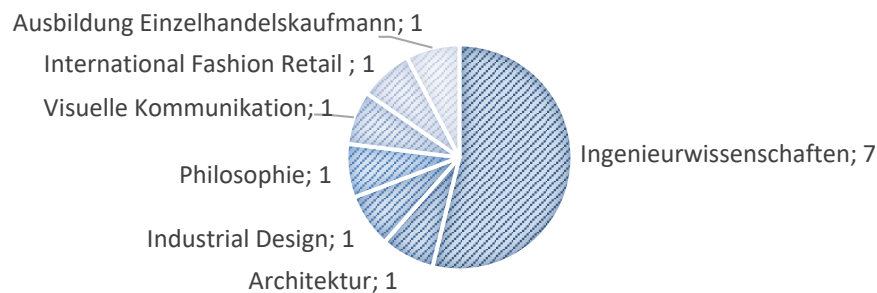


Abbildung 1: Ausbildung der Befragungsteilnehmer

Die befragten Personen waren zum Befragungszeitpunkt in Unternehmen unterschiedlicher Größe beschäftigt, vom Kleinunternehmen mit acht Beschäftigten bis hin zum Großunternehmen mit mehr als 150.000 Beschäftigten. Zu den untersuchten Branchen gehörten: Maschinen- und Anlagenbau, Ingenieursdienstleistung, Unternehmensberatung, Automobilbranche, Handel für Haushaltsartikel, Hersteller handgeführter Elektrowerkzeuge, Hersteller von Arbeitsplatzeinrichtungen, Hersteller von Büroausstattung, Hersteller von Mess- und Prüfgeräten. Die Interviews wurden im Zeitraum von März bis August 2021 online mit der Software „Zoom“ durchgeführt und aufgezeichnet. Sie dauerten durchschnittlich ca. 60 Minuten. Anschließend wurden die Aufzeichnungen mit der Software „MAXQDA“ transkribiert und ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an die Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2022). In einem ersten Schritt wurden aus dem in den Interviews generierten Text Hauptkategorien anhand der Forschungsfrage und des Leitfadens gebildet. Anschließend wurden anhand des Materials weitere Subkategorien gebildet. Um die Qualität des Codierprozesses zu sichern, wurden die transkribierten Interviews jeweils von zwei Personen getrennt codiert und anschließend gemeinsam diskutiert. Hierbei unterstützte ein studentisches Forschungsteam aus dem Masterstudiengang Produktentwicklung der Hochschule Pforzheim.

Die Darstellung der Ergebnisse folgt in ihrer Grundstruktur der Gruppierung von Kontextfaktoren der Produktentwicklung in Anlehnung an Hales & Gooch (2004) (siehe Abbildung 2). Eine ausführliche Detaillierung der Kontextfaktoren ist in der VDI Richtlinie 2221, Blatt 2 (2019) in Anlehnung an Bender & Gericke (2016) zu finden.

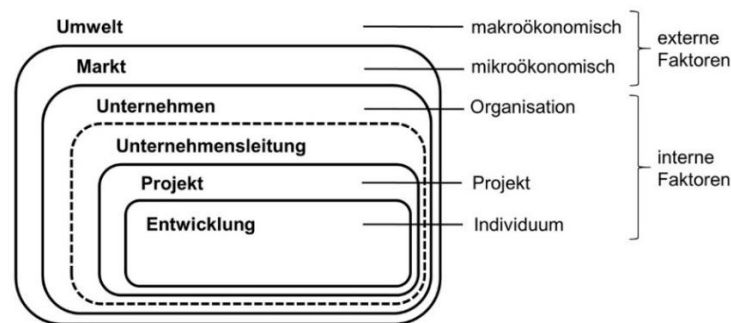


Abbildung 2: Kontextfaktoren der Produktentwicklung (nach Hales & Gooch, 2004)

Für die Auswertung der Interviews stand der berufliche Kontext der Befragten im Vordergrund. Private Bezüge wurden dort hergestellt, wo sie zur Erklärung und Unterstreichung der unternehmerischen Zusammenhänge und Kontexte eine Rolle spielten. Beispielsweise bei dem Thema Denkweisen unterschiedlicher Generationen oder der Rolle der Befragungsteilnehmenden als Endkunden und Endkundinnen im privaten Umfeld.

4 Ergebnisse

Als ambivalente Herausforderungen bei der Integration der ökologischen Nachhaltigkeit in die Produktentwicklung von Unternehmen wurden nachfolgende Faktoren identifiziert:

4.1 Makro- und Mikroökonomische externe Faktoren

4.1.1 Der Gesetzgeber

Alle Expert:innen sehen das Thema Nachhaltigkeit als sehr wichtig an und sehen Handlungsbedarf. Der Gesetzgeber spielt laut neun von 13 Befragten dabei eine wichtige Rolle. Die Expert:innen sehen ihn in der Verantwortung, sowohl die Unternehmen als auch die Endkund:innen zum nachhaltigen Handeln zu zwingen (P12, P08, P04, P07, P13). Neun Befragte sehen jedoch die Art und Weise, wie der Gesetzgeber seine Vorgaben macht, als problematisch an. Die Bürokratie sei zu hoch, die Unternehmen fühlten sich gegängelt und kontrolliert (P03). So bestehe die Einsicht, dass ein Umdenken stattfinden müsse, aber nicht, wenn daraus Rechtsansprüche und Bestrafungen abgeleitet werden könnten. Dies führe zur Gegenreaktionen und Ablehnung bei den Entscheidungspersonen (P03, P04, P07). Die Unternehmen schreckten vor der „Bürokratiewelle“ (P03) zurück. Eine Politik hinsichtlich Nachhaltigkeit müsse wirtschaftlich und sozial verträglich gemacht werden und der Staat könne nicht alles auf einmal fordern (P07, P04). Der Politik fehle es für größere Zusammenhänge an nötigem Sachverstand (P04, P08), was wiederum dazu führe, dass die Unternehmen insbesondere im Forschungs- und Entwicklungsbereich von der Politik in nicht-nachhaltige Richtungen gedrängt würden (bspw. reine Konzentration auf Elektromobilität, trotz ungelöstem Batterieentsorgungsproblem) (P04, P06). Gleichzeitig stelle die deutsche Gesetzgebung eine Hürde im internationalen Wettbewerb dar und setze die Unternehmen unter Druck, was dazu führen könne, dass die Unternehmen abwanderten, in Länder mit weniger strengen Vorgaben (P11, P07). Gleichzeitig wird gefordert, die Politik sollte sich für die Erarbeitung von allgemeingültigen Grundlagentabellen mit Daten zur Nachhaltigkeit ähnlich einer DIN-Norm einsetzen (P04). Weitere Nennungen, die seitens der Befragungsteilnehmenden jedoch nicht vertieft diskutiert wurden, sind: der Einfluss der Verbände wie des VDMA, der ein

nachhaltiges unternehmerisches Handeln fordere (P01), andere Industriezweige, die als Impulsgeber dienen könnten (P06, P02) und die Entwicklung neuer Technologien (P06, P09).

4.1.2 Die Kunden und Kundinnen

Bei den Kunden bietet sich ein ambivalentes Bild. Von den zehn Unternehmensangehörigen (Studierende und externe Beratung ausgenommen) nennen vier Nachhaltigkeit als direkte Kundenanforderung (P02, P04, P05, P10), bei den anderen sechs (P01, P02, P07, P08, P11, P12) stellen Nachhaltigkeitsaspekte keine Kundenanforderung dar. Zwei Befragungsteilnehmende betonen, eine Umstellung des Produktes oder der Produktion käme in Frage, aber dazu müsse die Zielgruppe diese Anforderung auch stellen (P01, P02). Niemand stelle um auf Nachhaltigkeit, wenn kein wirtschaftliches Interesse dahinter stünde (P02). Bei den Investitionsgüterherstellern forderten die Auftraggebenden die Nachhaltigkeit aber teils indirekt in Form von u. a. weniger Energiekosten, effizienteren Prozessen, weniger Ausfällen der Anlage und Langlebigkeit (P01, P02, P10). In anderen Unternehmen findet der Begriff Nachhaltigkeit seitens der Auftraggebenden bislang keinerlei Erwähnung (P07). Auch, dass eine Entscheidung zwischen zwei Lieferanten getroffen würde, weil der eine nachhaltiger arbeite als der andere, sei noch nie vorgekommen (P07). Bei bestimmten Produkten stünden für die Endkunden andere Aspekte wie das Gewicht, die Performance, die Verfügbarkeit der Ersatzteile und die Langlebigkeit im Vordergrund. Die Auftraggebenden seien auch nicht bereit, die Mehrkosten für beispielsweise ein Biomaterial, zu bezahlen (P05, P10, P04). Am Produktlebensende würden die Geräte und Maschinen teilweise entweder eingeschmolzen (P01) oder zur Weiterverwendung in Niedriglohnländer verkauft (P01, P02). Ein Unternehmen nehme die Maschinen auch zurück und kümmere sich selbst um eine umweltfreundliche Entsorgung der enthaltenen Umweltgifte (P07).

Im Bereich der Konsumgüter sieht das Bild etwas anders aus: Hier forderten die Endkunden aktiv beispielsweise weniger und ökologischeren Verpackungsmüll und die Vermeidung von gesundheitsschädlichen Stoffen im Produkt (P08). Teilweise würden von den Handelsunternehmen Nachhaltigkeitsreports eingefordert. Konträr dazu stünde wiederum die Forderung der Verbraucher nach kostenlosen Rücksendungen (P08).

Als Endkunden im privaten Kontext sehen sich die Befragten häufig mit komplexen Kaufentscheidungsprozessen konfrontiert (P02, P05). So sei beispielsweise eine objektive Bewertung der Produkte schwierig und zeitaufwendig (P02, P03, P13). Es sei eine aufwendige Informationssuche im Internet notwendig (P02, P05, P07, P08, P09, P13). Teilweise kapituliere man aber auch angesichts der Verwirrung durch Siegel und Zertifikate, ohne dass klar sei, was dahinterstecke (P03, P02). Und es falle angesichts der Angebotsfülle auf dem Markt auch schwer, der Verführung nicht zu erliegen und ständig Neues zu kaufen (P11, P13, P09). Und da seien nachhaltigere Produkte einfach zu teuer (P13, P11). Die Produktnutzungsphase selbst findet in den Interviews von den Befragten keinerlei Erwähnung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kundinnen und Kunden in einer verantwortungsvollen Position stehen und durchaus die Nachhaltigkeit in Unternehmen anstoßen könnten, sowohl im Industriekontext als Auftraggebende, als auch im privaten Kontext als Endverbraucher, davon aber derzeit noch zu wenig Gebrauch machen.

4.1.3 Der Wettbewerb

Die Mehrheit der befragten Unternehmen nutzen Nachhaltigkeit nicht aktiv als Wettbewerbsfaktor bzw. Marketinginstrument. Der Wettbewerber könne aber teilweise als Ideengeber fungieren (P08). Auch sei ein nachhaltiges Unternehmen als Arbeitgeber für junge Menschen attraktiv (P01, P04, P05, P10). Um sich als Bester im Markt zu positionieren, sei es aber auch wichtig in Sachen Nachhaltigkeit voraus zu gehen (P06). Gleichzeitig befinde man sich in einem preissensitiven Markt, müsse international wettbewerbsfähig bleiben, und der Standort Deutschland sei vergleichsweise teuer (P07, P10, P11). Da blieben kaum Ressourcen für große Umweltaktivitäten (P11).

4.2 Interne Faktoren

4.2.1 Die Organisation

Unternehmenskultur / Unternehmensstrategie

Über alle Interviews hinweg fällt auf, dass keine der befragten Personen zu Beginn des Gesprächs nach der zugrundeliegenden Definition von Nachhaltigkeit fragte. Die Befragten beziehen ihre Antworten bis auf eine einzige Ausnahme sofort auf den ökologischen Aspekt der Nachhaltigkeit. Auch gibt es keine Erwähnungen wie Nachhaltigkeit in den jeweiligen Unternehmen verstanden oder definiert würde. Bei einigen Unternehmen sei das Thema Nachhaltigkeit auch noch kein Bestandteil des Unternehmensalltags (P02, P10, P12). In anderen wiederum würde vereinzelt im Rahmen der Beschaffung von Büroutensilien (P02) oder beim Mittagessen (P05, P08, P11) über dieses Thema gesprochen. Direkt auf Unternehmensthemen oder die Produkte bezögen sich die Gespräche aber nicht (P02, P05, P08, P11).

Geschäftsführung und Mitarbeitende

Noch vor der Geschäftsführung mit fünf Nennungen (P06, P07, P03, P01, P11) werden die Mitarbeitenden mit neun Nennungen als Impulsgebende von Nachhaltigkeitsaspekten im Unternehmen gesehen (P01, P02, P04, P05, P06, P09, P10, P11, P12). Dabei spiele aber das Bewusstsein, wo man selbst Einfluss habe und auch wie man in seiner Organisation wahrgenommen würde eine Rolle für das Einbringen neuer Ideen (P06). Es sei entscheidend, wo das Management die Ziele stärker nachverfolge und überprüfe (P06). Einige Befragungsteilnehmende sehen den Einfluss der Mitarbeiter durch fehlende Kommunikationswege als nicht gegeben im Unternehmen (P05, P12). Hier wäre es laut der Interviewteilnehmenden sinnvoll, wenn das Thema sowohl von der Geschäftsführung getrieben, als auch parallel von den Mitarbeitenden in unterschiedlichen Ebenen mitgetragen und unterstützt werden würde (P06, P04, P02, P13). Es werden auch negative Erfahrungen im Zusammenhang mit Eigeninitiative bei vorhergehenden Arbeitgebern erwähnt, die zu großer Frustration geführt hätten (P02, P09). Mitarbeitende würden insbesondere dann aktiv, wenn der Einsatz auch belohnt und nicht eine zusätzliche Belastung im Tagesgeschäft wäre (P06, P09, P10). Die Befragungsteilnehmenden sehen aber auch bei vielen Geschäftsführenden eine hohe Eigenmotivation und persönliche Überzeugung, Nachhaltigkeitsthemen voranzutreiben (P06, P11, P09). Nachhaltigkeit gehöre zur „Grundeinrichtung“ in einem Unternehmen, müsse aber zur Betriebswirtschaft passen (P01, P06, P11). Ein weiterer Punkt ist die wahrgenommene Lagerbildung innerhalb der Geschäftsführung (P03). Diese trete insbesondere bei Einflussnahme seitens des Gesetzgebers auf (P03). Diese Lagerbildung zeigt sich auch in den Interviews bei der Frage, wodurch Einstellungen und privates Handeln geprägt würden. Hier käme der Faktor Generationen ins Spiel. Dabei seien in dem einen Lager, das der Nachhaltigkeit zugewandt sei, nicht unbedingt nur Jüngere und im gegenteiligen Lager nicht nur Ältere. Aber von der tendenziellen Verteilung seien im ersten Lager mehr die jüngeren Führungspersonen (P03). Nach Einschätzung der Person aus der Unternehmensberatung sei in Hochschulen und Unternehmen zu beobachten, dass die Jungen vorrangig die Treiber seien.

Zulieferer

Drei der Interviewteilnehmenden geben an lokale Zulieferer einzusetzen, die die Produkte zu fairen Löhnen und unter guten Bedingungen fertigten (P07, P11, P05). Bei allen drei Unternehmen handelt es sich um inhabergeführte Familienunternehmen, bei denen der Standort Deutschland Priorität hat. Die Unternehmensform und -größe spielen in den Aussagen der Befragten eine Rolle. An dieser Stelle wird jedoch nicht weiter darauf eingegangen, da es sich um einen nicht veränderbaren Faktor handelt.

4.2.2 Das Projekt

Die Produktentwicklung

Die Produktentwicklung wird mit neun Nennungen als wichtigster Einflussbereich zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten in Unternehmen genannt. So hätten Entscheidungen in der Produktentwicklung Einfluss auf die Definition der Produkthanforderungen (P10, P12), die Fertigung (P06, P02), die Produktvielfalt (P10), die Verpackungskonzepte (P10), die Materialauswahl und Zusammensetzung (P10, P02, P08, P10), die Konstruktion, Bauart und Zerlegbarkeit (P01, P06, P08, P12). Eine entsprechende Konstruktion führe in der Fertigung zu weniger Produktionsabfällen (P06, P10), auch könnten je nach Verfahren Energie, Wasser, Druckluft eingespart werden (P01, P10, P06, P02). Ein langjährig bestehendes Unternehmen brauche Zeit, die Prozesse umzustellen, da es feste Roadmaps über mehrere Jahre gebe, die sich nicht von heute auf morgen verändern ließen (P10).

Nur von einem einzigen Interviewteilnehmenden wird das Thema Werkzeuge im Entwicklungsprozess angesprochen und besteht der konkrete Versuch, eigene Werkzeuge zu etablieren, und Tabellen aufzubauen, um gezielt Entscheidungen in der frühen Phase der Entwicklung treffen zu können (P04). Hierbei sei es entscheidend, Ökologie und Ökonomie parallel voranzutreiben (P04). Es wird die große Problematik der mangelnden Messbarkeit und des Fehlens allgemein akzeptierter Grundlagen und Zielwerte in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte thematisiert (P02, P06, P04). „Es gibt ja auch keine [...] richtigen Rechenmodelle, wo man sagt, mach das, dann ist es gut. Mach so, dann ist es nicht gut. Das ist ja immer so ein Abwägen. Der eine meint, vom Hören und Sagen würde ich es so einschätzen, der andere sagt eher so. Es ist ja nichts konkret.“ (P02:26) Auch Programme, die mittelständische Unternehmen sinnvoll nutzen könnten, seien nicht bekannt (P04). Nur im größten befragten Unternehmen gibt es hinsichtlich CO₂-Ausstoß und Abfall klare Ziele am Produkt und in der Fertigung. Seitens der Befragten werden im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit am Produkt die Begriffe „Langlebigkeit“ (P05), „Robustheit“ (P05, P11), „lange Laufzeit“ (P02, P05, P07) und „Qualität“ (P05) nahezu gleichgesetzt mit dem Begriff Nachhaltigkeit. Die Nachhaltigkeit ergebe sich zufällig, ohne dass sie marketingseitig vermarktet würde und ohne dass sie im Unternehmen intern bewusst unter diesem Begriff kommuniziert würde (P02, P07). Man gehe eigentlich den Weg zu sagen: Das Produkt soll qualitativ hochwertig sein und man wolle lokale Zulieferer im Boot. Und aus diesen Anforderungen ergebe sich der positive Aspekt auf die Nachhaltigkeit (P07). Weitere erwähnte Aspekte in diesem Zusammenhang sind eine mehrjährige Ersatzteilegarantie (P05, P11), ein langlebiger austauschbarer Akku (P05) und ein Produktdesign, das keiner Mode unterworfen sei (P05, P11). In diesem Zusammenhang steht eine Äußerung zu Konsumprodukten: „Wenn heute an einem Fernseher etwas kaputt ist... kein Mensch bringt den mehr zur Reparatur, weil die teurer ist, unter Umständen wie ein neuer Apparat.“ (P07:20) Hier wird die Problematik des Themas deutlich. Wenn die Kundinnen und Kunden bezahlen sollen und die Kosten in keinem Verhältnis mehr zu dem ursprünglichen Kaufpreis stehen, führt das die Nachhaltigkeit ad absurdum.

Ziel- und Anforderungskonflikte

Im Zusammenhang mit der Produktentwicklung werden Ziel- und Anforderungskonflikte indirekt thematisiert. So stehe zunächst für die Produktentwickler:innen die Funktion an erster Stelle (P01), und in der Produktion das effiziente Produzieren (P10). Zusätzliche Kosten und Gewinneinbußen werden seitens der Befragungsteilnehmenden mehrfach als Zielkonflikte thematisiert (P04, P07, P09, P10, P11). Die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen koste Geld, welches die Auftraggebenden und Kunden nicht bereit seien zu bezahlen (P05, P10, P11). Gleichzeitig seien hohe Anfangsinvestitionen und ein zeitweiser Verzicht auf den Maximalprofit für eine gute Wende notwendig, weshalb häufig nichts passiere (P04, P11, P07, P09). Es zeigt sich ein deutlich wahrgenommener Konflikt zwischen Profit und Nachhaltigkeit. So stünde Wirtschaftlichkeit im Gegensatz zu ökologischem Handeln im industriellen Umfeld (P10). Auch Einsparungspotenziale stünden im Konflikt zueinander. Würde mehr Energie gespart, würde beispielsweise mehr Wasser verbraucht (P06). Dabei gebe es keine offizielle Prioritätenliste, welches Ziel wichtiger sei als das andere (P06). Es fällt auf, dass einige Befragten keine Potenziale zur Verbesserung am Produkt sehen

(P12, P02, P07), aber einiges in der Infrastruktur des Unternehmens machen. So gebe es in den Unternehmen Solarpanels auf den Dächern, Blumenwiesen auf dem Gelände und verbrauchsarme LED Lampen (P01, P06, P12). Das Produkt selbst aber sei durch seine Anforderungen limitiert, beispielsweise in Form von Festigkeitsanforderungen an das Material. Den Befragungsteilnehmenden fällt es hier sichtlich schwer, weitere Verbesserungspotenziale zu nennen. Die Aktivitäten beziehen sich eher auf Verbrauchsmaterialien wie etwa qualitativ hochwertigere Werbeartikel (P02), umweltfreundliches Druckerpapier (P06) und der Verzicht auf Pappkaffeebecher (P06) sowie Kunststoffverpackungen (P12, P10, P08).

Koordination von Nachhaltigkeitsthemen

Da es häufig an nötigem Wissen und Kapazität fehle, Nachhaltigkeitsthemen zu bearbeiten (P12), hätten zwei Unternehmen bereits Nachhaltigkeitsteams installiert (P05, P06). Dabei variieren die eingesetzten Ressourcen sehr stark, von zehn Mitarbeitenden von insgesamt 2.700 Mitarbeitern bis zu einem Teamleiter mit drei Mitarbeitenden in einer Abteilung (P05, P06). Teilweise würden in den größeren Unternehmen auch Energiekoordinierende und Nachhaltigkeitsbeauftragte eingesetzt, die sich hauptsächlich um Ressourceneinsparung von Wasser und Energie kümmern (P06).

4.2.3 Das Individuum

Generationen

In der vorliegenden Untersuchung zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Alter der Befragungsteilnehmenden (der Generationszuordnung) und den Aussagen zum privaten Handeln und im Unternehmenskontext. Interviewte der Generation X (in der Untersuchung 43-54 Jahre alt), darunter drei Personen aus der Geschäftsführung, zeigen zwar Verständnis für die jüngere Generation, möchten aber selbst nicht mehr auf liebgegewonnene Gewohnheiten zugunsten der Nachhaltigkeit verzichten. Man mache sich viele Gedanken, sehe auch Anregungen bei Mitarbeitenden und im privaten Kontext und stoße auch teilweise Entwicklungen im Unternehmen an, aber hier stünden vorrangig Kosteneinsparungen oder direkte Kundenanforderungen im Vordergrund.

Die Befragungsteilnehmenden der Generation X sind der Ansicht, dass jüngere Kolleginnen und Kollegen viel mehr Input und Wissen zu Nachhaltigkeitsthemen über Medien und Influencer hätten, als sie selbst. Jüngere Mitarbeitende seien motiviert und brächten auch entsprechende Fähigkeiten mit. Darin waren sich die Vertreter der unterschiedlicher Generationen einig (P01, P02, P03, P04, P05, P08, P10, P13). Jüngere Teilnehmende in den Interviews sehen das Thema aber auch teilweise in der Geschäftsführung und empfinden die Verantwortung persönlich als zu groß (P02, P13), andere wiederum wollen das Thema selbst voran treiben (P02, P04, P05).

Bewusstsein und Wissensaufbau

Mehr als die Hälfte der Befragten sehen das Thema Bewusstmachung (sieben Nennungen) und Wissensaufbau (acht Nennungen) als Haupteinflussmöglichkeiten für die Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten im Unternehmen. So müsse mehr in den Unternehmen darüber gesprochen werden, und es brauche gegenseitige Anreize (P02, P10). Eine Sensibilisierung der Mitarbeitenden sei wichtig (P08). Gleichzeitig müsse die Führungskraft aber auch authentisch und empathisch sein, individuell auf die Einzelnen eingehen und sich das Commitment der Mitarbeitenden erarbeiten (P06, P09). Wichtig sei es auch, auferlegte Ziele besser zu erklären, statt sie nur zu fordern (P06, P09, P12, P13). Anreize und Bonussysteme für Verbesserungen könnten den persönlichen Einsatz für Nachhaltigkeitsthemen erhöhen (P09, P06). Auch brauche jeder Bereich ein anderes spezifisches Weiterbildungsprogramm und Schulungen (P01, P13). Ein Unternehmen führe bereits Workshops zur Ressourceneinsparung in der Produktion durch (P06). Das Mindset der Mitarbeitenden im Unternehmen variere in Abhängigkeit des Bildungsstands und der Ausbildung (P05, P06, P13). Auch sei es wichtig, dass sich die Menschen am Arbeitsplatz wohlfühlten. Nur dann kümmerten sie sich auch noch um Themen wie die Ökologie (P02, P05). Dieser Faktor wird auch im privaten Kontext in Form

von Wohlstand genannt (P02, P05). Auch sei es notwendig, Nachhaltigkeitsthemen frühzeitig in Schul- und Ausbildungssysteme zu integrieren (P03).

5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegende qualitative Untersuchung zeigt, dass sehr viele individuelle Faktoren seitens der Personen und des Unternehmens eine Rolle spielen. Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse beschreiben:

- Das Thema Nachhaltigkeit wird über alle Interviews hinweg als extrem komplex und mit gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Prozessen verwoben beschrieben und führt dadurch häufig zu Überforderung und einem „Nichthandeln“.
- In den Unternehmen mangelt es an einem konkreten Verständnis darüber, was sie in ihrem spezifischen Kontext und an ihren Produkten unter Nachhaltigkeit verstehen wollen. Hier muss sich die Unternehmensleitung im Commitment mit den Mitarbeitenden Gedanken machen und eigene Definitionen festlegen, die für sie Gültigkeit haben sollen und die sie auch nach außen kommunizieren.
- Es fehlen konkrete allgemeingültige Zahlenwerke, um Nachhaltigkeitsanforderungen in Form von Zielwerten in den eigenen Entwicklungsprozess zu integrieren und damit messbar zu machen.
- Nachhaltigkeit wird noch immer als „Add-On“ und nicht als notwendige Selbstverständlichkeit angesehen.
- Eine ganze Reihe von Ziel- und Anforderungskonflikten behindern die Umsetzung von Nachhaltigkeitsanforderungen in der Produktentwicklung: so stehen aus Sicht der Befragten u. a. Kostenfaktoren, Material- und Qualitätsanforderungen im Gegensatz zur Nachhaltigkeit.
- Die Gesetzgebung stellt einen wichtigen Faktor bei der Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen in die Unternehmen dar. Noch wichtiger ist allerdings, wie die Maßnahmen konkret aussehen und umgesetzt werden sollen. Viele Dinge müssen spezifisch in Abhängigkeit von beispielsweise Unternehmensart und -größe, Produktart sowie Lieferantketten in den Unternehmen umgesetzt werden. Ein Gießkannenprinzip ist hier nicht sinnvoll und führt zu Ablehnung und im schlimmsten Fall zur Abwanderung der Unternehmen ins Ausland. Der Gesetzgeber muss hier Vorgaben machen, die sozial und wirtschaftlich verträglich sind. Es müssen allgemeingültige klare Zielwerte u. a. in Form von CO₂-Ausstoß und Umweltverträglichkeit von Materialien definiert werden.
- Nachhaltigkeitsaktivitäten in den Unternehmen beziehen sich aktuell noch vorrangig u. a. auf die Infrastruktur und Verbrauchsmaterialien. Die Produkte selbst und ihre Nutzungsphase beim Endkunden stehen noch nicht im Fokus der Nachhaltigkeitsbetrachtung. Es werden hier zu viele Produktlimitationen und wenig Nachhaltigkeitspotenziale gesehen. Hier ist dringend eine frühzeitige Aus- und Weiterbildung erforderlich.
- Die Untersuchung zeigt, dass das Thema Nachhaltigkeit in den Generationen unterschiedlich ausgeprägt ist. Junge Menschen treiben das Thema Nachhaltigkeit stärker voran, verfügen über ein entsprechendes Mindset und setzen sich auch privat mit aufwendigen Kaufentscheidungsprozessen auseinander. Gleichzeitig ist diese Generation aber noch nicht in den Führungsetagen der Unternehmen vertreten und hat wenig Einfluss auf die Entscheidungen. Führungspersonen der älteren Generation sehen aber die Notwendigkeit zu handeln (noch) nicht als dringlich an. Hier besteht ein positiver Optimismus, man werde zur gegebenen Zeit noch geeignete Lösungen finden.

6 Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass unbedingt eine differenzierte Betrachtungsweise des Themas ökologische Nachhaltigkeit erforderlich ist, um konkrete Handlungsvorschläge für die Produktentwicklung

erarbeiten zu können. Nachhaltigkeitsbezogene Unternehmensaktivitäten beziehen sich noch immer nur teilweise auf die Produkte selbst und selten bis gar nicht auf den gesamten Produktlebensweg. In einer aktuell laufenden Untersuchung werden daher konkret am Produktentwicklungsprozess beteiligte Personen der Fachdisziplinen Technik und Design befragt, um spezifischere Einblicke in die täglichen Handlungs- und Entscheidungsprozesse in der Produktentwicklung zu erhalten und daraus konkretere Empfehlungen ableiten zu können.

Literaturverzeichnis

- Aghelie 2017 AGHELIE, Amir: *Exploring drivers and barriers to sustainability green business practices within small medium sized enterprises: primary findings*. In: International Journal of Business and Economic Development 5 (2017), Nr. 1, S. 41-48.
- Albers et al. 2017 ALBERS, A., RAPP, S., BIRK, C. & BURSAC, N.: *Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. In BINZ, H.; BERTSCHE, B.; BAUER, W.; SPATH, D. & ROTH, D. (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017*. Stuttgart: IRB Mediendienstleistungen, 2017.
- Bender und Gericke 2016 BENDER, Beate; GERICKE, Kilian: *Entwicklungsprozess*. In: LINDEMANN, Ulrich (Hrsg.) *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser, 2016.
- Bey 2013 BEY, Niki; HAUSCHILD, Michael & McALOONE, Tim: *Drivers and barriers for implementation of environmental strategies in manufacturing companies*. In: CIRP Annals 62 (2013), Nr. 1, S.43-46.
- Boks 2006 BOKS, Casper: *The soft side of ecodesign*. In: Journal of Cleaner Production, 14 (2006), S. 1346-1356.
- Bovea und Pérez-Belis 2012 BOVEA, M. D.; PÉREZ-BELIS, V.: A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. In: Journal of Cleaner Production 20 (2012), S. 61-71.
- Byggeth et al. 2007 BYGGHET, Sophie; BROMANN, Göran & ROBÈRT, Karl-Henrik: *A method for sustainable product development based on a modular system of guiding questions*. In: Journal of Cleaner Production 15 (2007), S. 1-11.
- Engeln, 2020 ENGELN, Werner: *Methoden der Produktentwicklung. Technische Produkte kundenorientiert entwickeln*. Essen: Vulkan Verlag, 2020.
- Grunwald & Kopfmüller 2022 GRUNWALD, Armin & KOPFMÜLLER, Jürgen: *Nachhaltigkeit*. Frankfurt: Campus Verlag, 2022.
- Hales und Gooch 2004 HALES, Crispin & GOOCH, Shayne: *Managing Engineering Design*. London: Springer, 2004.
- Hopf 2019 HOPF, Christel: *Qualitative Interviews – ein Überblick*. In: FLICK, Uwe; VON KARDORFF, Ernst; STEINKE, Ines (Hrsg.) *Qualitative Forschung*. Reinbek: Rowohlt, 2019.
- IPCC 2018 IPCC: *1,5 °C Globale Erwärmung. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger*. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn: 2018.
- IPCC 2021 IPCC: *Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung*. In: *Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen*. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn: 2021.

- IPCC 2022a IPCC: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- Johansson 2002 JOHANSSON, Glenn: *Success factors for integration of ecodesign in product development. A review of state of the art*. In: *Environmental Management and Health* 13 (2002), Nr. 1, S. 98-107.
- Lamb et al. 2021 LAMB, W. F., WIEDMANN, T., PONGRATZ, J., ANDREW, R., CRIPPA, M. et al.: *A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018*. *Environmental Research Letters*, 16 (7) (2021), S. 1-31.
- Mayring 2022 MAYRING, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. 3. Neuausg. Weinheim: Julius Beltz, 2022.
- Poulikidou et al. 2014 POULIKIDOU, Sofia; BJÖRKLUND, Anna & TYSKENG, Sara: *Empirical study on integration of environmental aspects into product development: processes, requirements and the use of tools in vehicle manufacturing companies in Sweden*. *Journal of Cleaner Production* 81, (2014), S. 34-45.
- Pujari 2014 PUJARI, Devashish; PEATTIE, Ken & WRIGHT, Gillian: *Organizational antecedents of environmental responsiveness in industrial new product development*. In: *Industrial Marketing Management* 33 (2004), S. 381-391.
- Ramirez et al. 2014 RAMIREZ, Edward; GONZALEZ, Ricardo & MOREIRA, Gerardo: *Barriers and bridges to the adoption of environmentally- sustainable offerings*. In: *Industrial Marketing Management* 43, (2014), S. 16-24.
- Rossi et al. 2016 ROSSI, Marta; GERMANI, Michele & ZAMAGNI, Alessandra: *Review of eco-design methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies*. In: *Journal of Cleaner Production* 129 (2016), S. 361-371.
- Samantray et al. 2021 SAMANTRAY, Bibhuti Bushan & SAHU, Asutosh: *Assessment of sustainable product development tools and methods*. In: *Dogo Rangsang Research Journal* 8 (2021), Nr.14, S. 421-428.
- Scholz et al. 2018 SCHOLZ, Ulrich; PASTOORS, Sven; BECKER, Joachim; HOFMANN, Daniela & VAN DUN, Rob (Hrsg.): *Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung. Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte*. Berlin: Springer, 2018.
- Tukker 2001 TUKKER, Arnold; EDER, Peter; CHARTER, Martin; HAAG, Erick; VERCALSTEREN, An; WIEDMANN, Thomas: *Eco-design: The state of Implementation in Europe*. In: *The Journal of Sustainable Product Design* 1 (2001), S.147-161.
- Tischner und Moser 2015 TISCHNER, Ursula & MOSER, Heidrun: *Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung*. Überarbeit. Neuausgabe der 2000 erschienenen Publikation „Was ist EcoDesign?“, Umweltbundesamt, 2015.
- VDI 2221 Blatt 2:2019-11 Norm VDI 2221, Blatt 2:2019-11. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Gestaltung individueller Entwicklungsprozesse*. Berlin: Beuth, 2019.

Operationalisierung von „Design for Circularity“ in der industriellen Produktentwicklung

Operationalisation of "Design for Circularity" in industrial product development

Annika Pruhs, Anina Kusch, Prof. Dr. Tobias Viere, Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky

Hochschule Pforzheim, Institut für Industrial Ecology, Pforzheim
www.hs-pforzheim.de/inec

Abstract: Industrielle Produktentwicklungsprozesse müssen zukünftig den gesamten Lebensweg von Produkten von der Rohstoffförderung bis zum Ende der Nutzung berücksichtigen, um neben den bisher üblichen Eigenschafts- und Nutzenprofilen der Produkte zusätzlich noch kreislaufwirtschaftliche Verbesserungen wie Lebenszeitverlängerung, Weiternutzung oder hochwertiges Recycling hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Klimafreundlichkeit und Ressourceneffizienz möglichst automatisch bewerten zu können. Dies erfordert bei der Produktentwicklung prozessbegleitend anwendbare Bilanzierungsinstrumente und gleichzeitig die Berücksichtigung zirkulärer Geschäftsmodelle. Bisher fehlen hierfür überzeugende praxisorientierte Lösungsansätze. Um diese Forschungslücke zu schließen, stellt der vorliegende Beitrag die Operationalisierung eines übergreifenden Design for Circularity anhand eines auf zirkulären und technisch orientierten Vorgaben basierenden Entscheidungsbaums dar. Die Integration eines solchen Entscheidungsbaums in industrielle Produktentwicklungsprozesse ermöglicht den an Produktentwicklungen beteiligten Akteurinnen und Akteuren eine einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen und Konstruktionsmaßnahmen.

Keywords:

Kreislaufwirtschaft, Design for Circularity, Industrielle Produktentwicklung, Entscheidungsbaum, zirkuläre Geschäftsmodelle, Produktdesign

Abstract: In the future, industrial product development processes will have to consider the entire life cycle of products, from the extraction of raw materials to the end of use, in order to be able to evaluate, as automatically as possible, circular economy improvements such as lifetime extension, reuse or high-quality recycling with regard to economic efficiency, climate friendliness and resource efficiency, in addition to the usual property and benefit profiles of the products. This requires balancing instruments that can be applied in the product development process and at the same time the consideration of circular business models. So far, there is a lack of convincing practice-oriented approaches. To close this research gap, this paper presents the operationalization of a comprehensive Design for Circularity using a decision tree based on circular and technically oriented specifications. The integration of such a decision tree into industrial product development processes enables the actors involved in product developments to easily and systematically consider circular economic and environmentally relevant information and design measures.

Keywords:

Circular Economy, Design for Circularity, Industrial Product Development, Decision Tree, Circular Business Models, Product Design

1 Einleitung

Im Produktentstehungsprozess (PEP) werden nicht nur spätere Kosten, sondern bereits auch der Großteil der Umweltwirkungen und die Kreislauffähigkeit zukünftiger Produkte und Services festgelegt. Die Analyse und Optimierung der Umweltleistung von Produkten erfolgen bislang jedoch häufig erst nach Fertigstellung eines Konstruktionskonzepts (Bender und Gericke 2021) und damit bereits für viele grundlegende Festlegungen zu spät. Andererseits ist die Bereitstellung relevanter ökologischer und kreislaufwirtschaftlicher Indikatoren für die Akteure im PEP eine Grundvoraussetzung zur erfolgreichen Umsetzung einer Circular Economy (CE; zur Bedeutung von CE im PEP vgl. den Hollander et al. 2017).

Industrielle Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozesse müssen zukünftig den gesamten Lebensweg von Produkten von der Rohstoffförderung und Materialauswahl bis zum Ende der Nutzung berücksichtigen, um neben den bisher üblichen Eigenschafts- und Nutzenprofilen der Produkte zusätzlich noch kreislaufwirtschaftliche Verbesserungen wie Lebenszeitverlängerung, Weiternutzung (Reuse), Wiederaufbereitung (Remanufacturing) oder hochwertiges Recycling hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Klimafreundlichkeit und Ressourceneffizienz direkt und möglichst ohne Zusatzaufwand bewerten zu können. Dies erfordert bei der Produktentwicklung prozessbegleitend anwendbare Bilanzierungsinstrumente und gleichzeitig die Berücksichtigung zirkulärer Geschäftsmodelle. Bisher fehlt es in diesem Aufgabenfeld noch an konkreten Lösungsansätzen (Tura et al. 2019), die praktisch anwendbar sind, eine hohe Nutzerakzeptanz erreichen und ein breites Produktspektrum adressieren können. Für die digitale Nutzung von katalog- und checklistenbasierten Ansätzen (Ponn und Lindemann 2008) gibt es Lösungsansätze wie statische Online-Handreichungen (z. B. Umweltbundesamt 2022) oder Ökobilanzsoftware-Add-ons. Eine Integration dieser Lösungen in bestehende PEP- bzw. CAD-Software (bspw. Ecodesign+ (ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH 2022) oder Solidworks Sustainability¹⁹ (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation 2022) ist jedoch bestenfalls sehr softwarespezifisch implementiert und konnte deshalb in der Breite der Industrie bisher praktisch keine Wirkung entfalten.

Um diese Anwendungs- und Forschungslücke weiter zu schließen hat sich das Forschungsvorhaben „DfC-Industry“¹ die Operationalisierung der „Design for Circularity“-Ansätze durch weitgehend automatisierte Berücksichtigung in industriellen Produktentstehungsprozessen zum Ziel gesetzt. Dies soll anhand eines auf kreislaufwirtschaftlichen und technisch orientierten Vorgaben basierenden Entscheidungsbaums für den industriellen PEP erreicht werden.

2 Forschungskontext und Methodenentwicklung

2.1 Design for Circularity

In Anlehnung an Kirchherr et al. (2017) wird die Kreislaufwirtschaft als ein Wirtschaftssystem verstanden, das das "End-of-Life"-Konzept durch die Reduzierung, die Wiederverwendung, das Recycling und die Rückgewinnung von Materialien in Produktions-/Vertriebs- und Verbrauchsprozessen ersetzt und dabei das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung verfolgt. Zirkularität („Circularity“) kann daher als vollständige Umsetzung bzw. Zielzustand der Kreislaufwirtschaft

¹ Das Projekt „DfC-Industry“ mit dem Förderkennzeichen FKZ 03EI5005A wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Förderprogramms Ressourceneffizienz im Kontext der Energiewende für die Projektlaufzeit vom 01.02.2022 – 31.01.2024 gefördert und durch den Projektträger Jülich begleitet. Die Projektpartner Robert Bosch GmbH, iPoint-systems GmbH und das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH/Smart Enterprise Engineering wirken an dem Projekt unter der Leitung des Instituts für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim mit.

verstanden werden. Der Schlüssel für ein erfolgreiches Design for Circularity (DfC) liegt in der Art und Weise, wie Produkte entworfen und die verschiedenen Anforderungen der Kreislauffähigkeit erfüllt werden (Kamp Albæk et al. 2020).

Der Stand des Wissens zur CE wurde mittels Literaturanalysen erfasst. Die forschungsleitende These der Arbeiten war, dass die Kreislauffähigkeit lediglich zum Teil von produktinhärenten Eigenschaften bestimmt wird, jedoch zusätzlich von weiteren Faktoren wie z. B. Einflüssen während der Nutzungsphase oder auch den Geschäftsmodellen des Produkthanbieters oder Dritter abhängt. Daher wurden die Literaturanalysen-Ergebnisse insgesamt fünf Dimensionen zugeordnet, die zentrale Einflussfelder auf die Kreislauffähigkeit von Produkten widerspiegeln:

- Anforderungen an Produkte aus der Umweltgesetzgebung spielen eine wesentliche Rolle für die Produktentwicklung (Bender und Gericke 2021). Die Dimension „**Marktrahmen**“ bildet die gesetzliche Grundlage ab und enthält nationale sowie internationale Gesetze, Normen und Verordnungen.
- Die Dimension „**Circular Business Models**“ (CBM) umfasst zirkuläre Geschäftsmodelle und kreislaufwirtschaftliche Strategien (Geissdörfer et al. 2020; Lewandowski 2016; Lüdeke-Freund et al. 2018; Charter 2019; Hansen 2020; Ellen MacArthur Foundation 2013).
- „**Ecodesign Anforderungen**“ lassen sich als weitere Dimension aus der EU-Richtlinie 2009/125/EC (Europäische Kommission 2022) ableiten. Sie geben Orientierungspunkte für die Umsetzung von CE am Produkt, welche direkt im PEP Anwendung finden.
- Die Dimension „**Life Cycle Intensity**“ berücksichtigt, dass Produkte in der Regel in nur einer oder wenigen ihrer Lebenszyklusphasen erhebliche Umweltwirkungen hervorrufen. „Life Cycle Intensity“ beschreibt daher den aus Umweltsicht wirkungsintensivsten Lebenswegabschnitt eines spezifischen Produkts, also z. B. die Eigenschaft „materialintensiv“ für Fassadenelemente aus Aluminium, da hier der Verbrauch von Energie und Rohstoffen, die für die Herstellung des Produkts benötigt werden, den Verbrauch von Ressourcen in den nachfolgenden Phasen des Lebenszyklus deutlich übersteigen. Im Fall von „nutzungsintensiven“ Produkten dominieren die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase die Gesamtumweltauswirkung des Produkts, wie z. B. bei intensiv genutzten Geschirrspülern oder Waschmaschinen. (Wimmer und Züst 2001)
- Die Elemente in der Dimension „**Indikatoren**“ unterstützen die Quantifizierung und Evaluierung von Ecodesign-Ansätzen innerhalb des PEP.

Diese Dimensionen adressieren unterschiedliche Handlungsebenen (Levels of action) in Unternehmen: Auf **strategischer Ebene** werden Ziele und Erwartungen an die gesamte Organisation gesetzt, beispielsweise die Entscheidung über das angestrebte (Circular) Business Model. Auf **taktischer Ebene** erfolgt die Planung und Priorisierung der von der Unternehmensleitung verfolgten Ziele im PEP, z. B. durch Methoden- und Tool-Auswahl für Ecodesign-Projekte. Die Umsetzung der Ökodesign-Methoden im Rahmen von Produktentwicklungsprojekten und Anwendung der Werkzeuge erfolgt dann auf der **operativen Ebene**. Hier werden dann u. a. Hotspots entlang des Produktlebenszyklus identifiziert und alternative Lösungen auf der Grundlage von Ökodesign-Leitlinien entwickelt. (Hauschild et al. 2018, S. 547; Pigozzo et al. 2013)

2.2 Entscheidungsunterstützung für ein Design for Circularity

Die Vielzahl der Dimensionen und Handlungsebenen stellt eine Herausforderung für die Operationalisierung des DfC im PEP dar. Entscheidungsmatrizen und Entscheidungsbäume können zur Strukturierung herangezogen werden und bieten hier eine Möglichkeit, Akteurinnen und Akteure im PEP praxisorientiert zu unterstützen.

Eine Entscheidungsmatrix stellt Varianten gegenüber und bietet durch ein Bewertungsraster eine Entscheidungsunterstützung. Durch die Bewertung der Wechselwirkungen können Abhängigkeiten und Einflussfaktoren ermittelt werden. Evaluerte Matrizen dienen dann als Grundlage zur Erstellung eines Entscheidungsbaums zur Zirkularitäts-Bewertung. (Grünig und Kühn 2013)

Ein Entscheidungsbaum stellt den komplexen, mehrstufigen Entscheidungsprozess mit allen möglichen Entscheidungsoptionen transparent dar. Durch die Verzweigungen des Baumes können verkettete Entscheidungen in einer logischen Abfolge visualisiert werden. Nutzen entsteht durch die Darstellung komplexer Entscheidungsprobleme und Zusammenhänge einzelner Elemente sowie die systematische und strukturierte Beschreibung aller Entscheidungsoptionen. (Schawel und Billing 2012)

Zur Unterstützung der Umsetzung eines DfC im PEP wurden die in Kapitel 2.1 dargestellten Dimensionen und Handlungsebenen verdichtet und in einen Entscheidungsbaum überführt, der schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist. Der Entscheidungspfad führt zu technischen Prinzipien zur Umsetzung der Zirkularität („Circular-Design-Prinzipien“) und ordnet passende konstruktive Lösungsansätze („Action Items“) zu.

Der gesamte Entscheidungsprozess ist entweder von einem strategischen (strategisches Level) oder einen produktbezogenen Ausgangspunkt (Produktlevel) zugänglich: So können in Anlehnung an Bender und Gericke (2021) entweder aus strategischen Überlegungen zu zirkulären Geschäftsmodellen heraus oder von produktspezifischen Kenntnissen ausgehend passende Ecodesign-Ansätze zu ermittelt und entsprechende Circular-Design (CD)-Maßnahmen ergriffen werden.

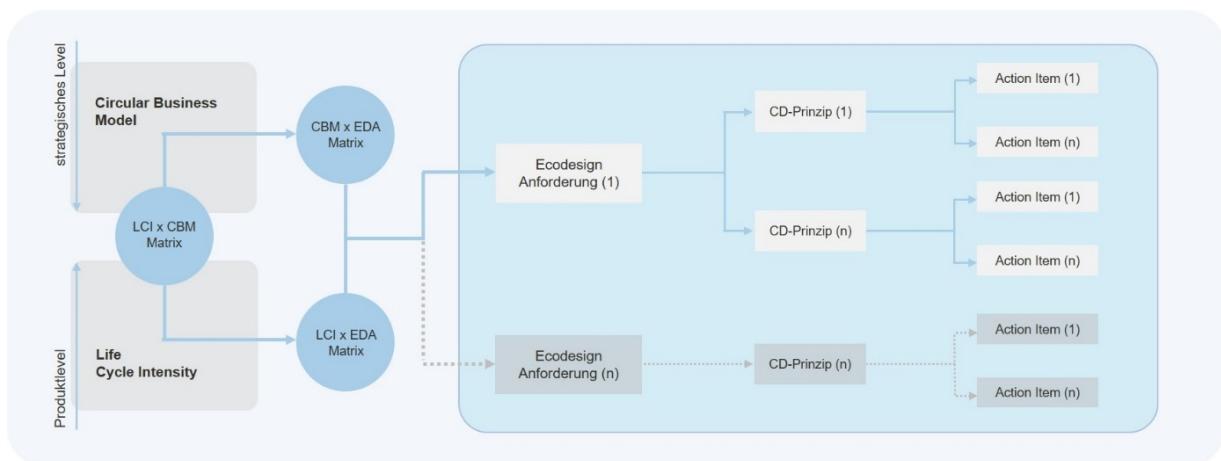


Abbildung 1: Entscheidungsablauf (schematisch) für industrielle Produktentwicklungsprozesse (CBM = Circular Business Model; LCI = Life Cycle Intensity; EDA = Ecodesign Anforderung; CD-Prinzip = Circular Design Prinzip)

Der mehrstufige Auswahlprozess innerhalb des Entscheidungsbaums wird durch die Berücksichtigung der drei Dimensionen Circular Business Models (CBM), Ecodesign Anforderungen (EDA) und Life Cycle Intensity (LCI) bestimmt. Die Kombination der Dimensionen erfolgte durch Matrizen, die während des Vorhabens jeweils durch mehrere Expertinnen und Experten für Kreislaufwirtschaft und den PEP aus Sicht von Wissenschaft und industrieller Entwicklungspraxis bewertet wurden:

- Die **LCI x CBM-Matrix** stellt Produktgruppen mit unterschiedlichen Phasenintensitäten (LCI) den CBM gegenüber. Hiermit kann die Leitfrage „Welche LCI-Produktgruppe ist für ein zirkuläres Geschäftsmodell besonders geeignet?“ beantwortet werden. Die Bewertung erfolgt mit einer dreiteiligen Skala von „low contribution to circularity and sustainability relative to all circular business models within this life cycle phase intensity“ (1 Punkt) über „medium contribution...“ (2 P.) bis „high contribution...“ (3 P.). Ausgehend von der strategischen Festlegung eines zirkulären Geschäftsmodells (CBM) können damit besonders geeignete Produktgruppen identifiziert werden. Wird als Ausgangspunkt ein Vorgängerprodukt (Produktebene) gewählt, bietet die Matrix eine Entscheidungsunterstützung für die Auswahl eines passenden CBM.
- Die **LCI x EDA-Matrix** stellt Produktgruppen mit unterschiedlichen Phasenintensitäten den Ecodesign Anforderungen gegenüber. Damit soll die Leitfrage „Welche Ecodesign-Ansätze sind bei welcher LCI-Produktgruppe besonders wirksam?“ beantwortet werden. Die Bewertung erfolgt auch hier durch eine Skala von „Low contribution to circularity and sustainability“

relative to all ED approaches within this life cycle phase intensity” (1 Punkt) über “Medium contribution...” (2 P.) bis „High contribution...” (3 P.). Ausgehend von der ausgewählten Produktgruppe werden so Ecodesign-Ansätze mit einem hohen Beitrag zur Zirkularität identifiziert.

- Die **CBM x EDA-Matrix** kann die Leitfrage „Welche Ecodesign-Ansätze unterstützen welches zirkuläre Geschäftsmodell?“ beantworten. Die binäre Bewertung unterscheidet dafür zwischen „Ability to implement the ED approach within this circular business model“ und „No necessity to implement the ED approach within this circular business model“. Dabei erfolgt die Zuordnung der Ecodesign Anforderungen innerhalb der spezifischen CBMs.

Der methodische Ansatz des DfC-Vorhabens sieht nach dem Durchlaufen des Entscheidungsbaumes zunächst lediglich die Bereitstellung technischer bzw. konstruktiver Lösungsansätze zur konkreten Umsetzung der CD-Prinzipien im PEP vor. Diese durch das Vorhaben bereitgestellten Informationen können und sollen dann in Unternehmen durch Materialvergleichslisten, Beständigkeitsbewertungen, Verfügbarkeitsinformationen zu Rezyklaten oder weitere, unternehmensspezifische Hinweise ergänzt werden. Bei Bedarf können die vorgeschlagenen Lösungen vom Entwicklungsteam z. B. durch einen paarweisen Vergleich unter Zirkularitätskriterien priorisiert werden. In einer späteren Entwicklungsstufe ist vorgesehen, auch diese Priorisierung bevorzugt unter Nutzung bestehender Indikatorensysteme durch ein DfC-Tool prozessintegriert und möglichst automatisiert bestimmen zu lassen.

3 Beispiel-Methodenanwendung „Elektrokleingerät: elektrische Zahnbürste“

Im Folgenden wird die in Kapitel 2.2 skizzierte Methode am Beispiel einer elektrischen Zahnbürste angewendet. Die elektrische Zahnbürste dient als Vertreter der Produktgruppe „Elektrokleingeräte“ (Elektrogeräte, die weniger als 5 kg wiegen oder Fernseher mit einer Bildröhre bis 51 cm, wie z. B. Fön oder Kaffeemaschine) (Umweltbundesamt 2022b). Den beispielhaften Entscheidungsweg dieses Elektrokleingeräts zeigt Abbildung 2.

Da in diesem Beispiel die zirkularitätsorientierte Weiterentwicklung einer bestehenden elektrischen Zahnbürste betrachtet werden soll, erfolgt der Einstieg in den Entscheidungsprozess über die Produktebene („Produktlevel“). Aufgrund der bereits bekannten Umweltwirkungen in den Lebensphasen des Produktes (siehe z. B. Lyne et al. 2020) kann eine sichere Einordnung in die LCI x CBM Matrix über die bekannte Lebensphasenintensität erfolgen: distributionsintensives Produkt.

Diese Einordnung führt durch Nutzung der Matrix LCI x CBM zur Empfehlung der zirkulären Geschäftsmodellfelder „Reparatur und Wartung“, „Langlebiges Produktdesign“, „Upgrading“ oder „Digitalisierung“. Diese Geschäftsmodelle können zu einer erhöhten Zirkularität in der ausgewählten Phasenintensität beitragen. Die endgültige Auswahl eines Geschäftsmodells muss fallspezifisch im Entwicklungsteam erfolgen und steht in direkter Abhängigkeit zu dem ausgewählten Produkt und der Unternehmenspolitik. In diesem Beispiel wird das Geschäftsmodell „Upgrading“ ausgewählt. Dieses zeichnet sich durch die verlängerte Nutzbarkeit und Funktionalität der Produkte durch präventive und technologische Aktualisierungen und Erweiterungen aus (Hansen et al. 2020).

Im nächsten Schritt werden unter Nutzung der CBM x EDA-Matrix zum Geschäftsmodell passende „Ecodesign-Anforderungen“ vorgeschlagen. Ausgehend von dem Geschäftsmodell „Upgrading“ sind die Ecodesign-Anforderungen „Langlebigkeit“, „Upgradability“ und „Energieeffizienz“ für die erfolgreiche Umsetzung grundlegend.

Die Upgradefähigkeit eines Produkts kann eine positive Auswirkung auf die Steigerung seiner Funktionalität, Leistung, Kapazität oder Ästhetik haben und die Wiederverwendbarkeit ermöglichen (DIN EN 45554:2020-10). Durch die Aufrüstbarkeit wird das Produkt robust gegenüber zukünftigen

Unsicherheiten in Bezug auf technologische Innovationen und Marktbewegungen. Die dadurch verlängerte Produktnutzungsdauer beschreibt den Zielzustand der Ecodesign-Anforderung „Upgradability“ (Khan et al 2018). Die Grundlage für die Ermöglichung von Nachrüstung und Produktaufwertung bildet eine entsprechende Gestaltung der Produktarchitektur. Hierzu können beispielsweise gezielt Funktionen und Komponenten vorgesehen werden, die während der Nutzung ergänzt oder ausgetauscht werden (Bender und Gericke 2021). Hierzu können technische Maßnahmen wie die Verwendung von Werknormteilen² und die Modularisierung der elektrischen Zahnbürste beitragen. Konkret können so z.B. Zahnbürstenaufsätze geometrisch vereinheitlicht oder Ladestationen markenunabhängig standardisiert werden, um diese auch nach einem Produktwechsel weiter verwenden zu können.

Eine Funktionserweiterung wäre durch die Softwareaktualisierung mit Zielsetzung einer erhöhten Energieeffizienz sinnvoll. Je weniger Energie aufgewendet werden muss, desto energieeffizienter ist ein Produkt (VDI-Norm 4800). Am Beispiel der elektrischen Zahnbürste könnte die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien durch intelligentes Laden verlängert werden, wenn der Energiebedarf für den nächsten Tag vorhergesagt wird, um die Batterie nur bei Bedarf zu laden (Hoke et al. 2013).

Ergänzend kann die Ecodesign-Anforderung „Langlebigkeit“ ebenfalls auf technischer Ebene konkretisiert werden: „Langlebigkeit“ ist die Fähigkeit eines Produkts, unter bestimmten Gebrauchs-, Wartungs- und Reparaturbedingungen wie vorgeschrieben zu funktionieren, bis ein einschränkendes Ereignis seine Funktion verhindert (nach Europäische Kommission 2022). Zur Erhaltung dieses Zustandes kann das technische Prinzip der Funktionsbeständigkeit³ angewendet werden. Auf konstruktiver Ebene kann hierfür z. B. der Verschleiß auf speziell dafür vorgesehene, leicht nachstellbare bzw. austauschbare Elemente gelenkt werden (Bender und Gericke 2021). Im Idealfall werden Komponenten eingesetzt, die geringem Verschleiß unterliegen und wiederverwendet werden können, z.B. durch den Einsatz eines bürstenlosen Motors, da dieser gegenüber Bürstenmotoren verschleißfrei ist (Pfeffer 2013).

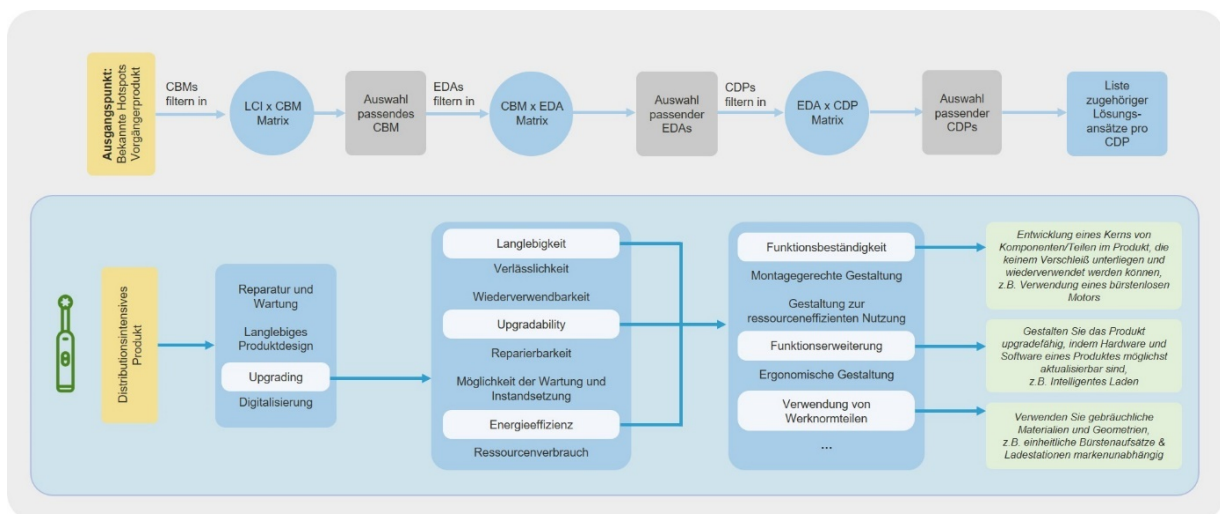


Abbildung 2: Entscheidungsablauf für den industriellen Produktentwicklungsprozess des Produktbeispiels elektrische Zahnbürste (CBM = Circular Business Model; LCI = Life Cycle Intensity; EDA = Ecodesign Anforderung; CD-Prinzip = Circular Design Prinzip)

² Durchsetzung "der Konformität allgemein verwendeter Teile und Baugruppen [...] mit allgemein anerkannten Konstruktionsstandards für Konfiguration, Maßtoleranzen, Leistungsbewertungen und andere funktionale Konstruktionsmerkmale" (Moss 1985).

³ Fähigkeit, unter bestimmten Nutzungs-, Wartungs- und Reparaturbedingungen nach Bedarf zu funktionieren, bis ein eingeschränkter Zustand erreicht ist (DIN EN 45552:2020-05).

4 Fazit und Ausblick auf weitere Entwicklungsschritte

Ziel der Arbeit war die systematische Umsetzung von Zirkularitätsanforderungen in industriellen Produktentwicklungsprozessen. CE-Strategien und -Geschäftsmodelle sollten mit Hilfe eines fortschreibungsfähigen Regelwerks für die Entwicklungspraxis operationalisiert werden. Methodisch wurde diese Herausforderung nach Auswertung der einschlägigen Literatur durch einen semi-quantitativen Ansatz gelöst, der die Dimensionen „Zirkuläre Geschäftsmodelle“, „Ökodesign-Gestaltungsregeln“ und „Produkt- und Lebenszyklusphasen-spezifische Umweltauswirkungen“ miteinander verknüpfte und in Form eines Entscheidungsbaumes operationalisiert. Die PEP-Integration dieses Entscheidungsbaums ermöglicht den beteiligten Akteurinnen und Akteuren die einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen und deren konstruktive Umsetzung. Der Entscheidungsbaum stellt dafür auf individuelle Produkte und Geschäftsmodelle der Anwender zugeschnittene Empfehlungen bereit. Dabei berücksichtigt er den Reifegrad der im Unternehmen bestehenden Innovations- und Produktentwicklungsprozesse. Besonders wirksam wird er dort, wo in Unternehmen ökologische Vorbetrachtungen von Produkten und/ oder bereits existierende zirkuläre Geschäftsmodelle vorhanden sind.

Der Pfad des Entscheidungsbaums mit seinen anwendungsorientierten Lösungsansätzen basiert derzeit auf der Expertise der am Projekt beteiligten Fachleute aus Wissenschaft und Praxis. Sie soll kurz- bis mittelfristig durch Integration weiterer Fachexpertise und den Abgleich mit Fallstudien aus weiteren Branchen validiert und adaptiert werden.

Der methodische Ansatz bildet mittel- bis langfristig die Basis weiterer Entwicklungsschritte: Zur Beschreibung der Zielerreichung soll ein Kennzahlensatz bereitgestellt werden, der die quantitative Bewertung von „Trade-offs“ und den Vergleich von Entwicklungsvarianten und Gestaltungsregeln ermöglicht. Dafür können den aus den in Kapitel 2.2 beschriebenen Matrizen abgeleiteten CD-Prinzipien zukünftig passenden Indikatoren zugeordnet werden.

Ein weiterer Methoden-Entwicklungsschritt ist die Berücksichtigung der Produktreife bzw. die Kopplung mit vordefinierten Produktentwicklungsmodellen wie z. B. dem Stage-Gate-Prozess. So können Entscheidungs- und Informationsbedarfe den jeweiligen Produkt-Entwicklungsschritten zugeordnet werden. Abbildung 3 zeigt die zukünftig vorgesehene Integration möglicher Indikatoren im Entscheidungsbaum sowie die zeitliche Einordnung der Action Items im PEP. Angestrebt wird zudem die Bereitstellung einer entsprechenden digitalen, interaktiven Umgebung.

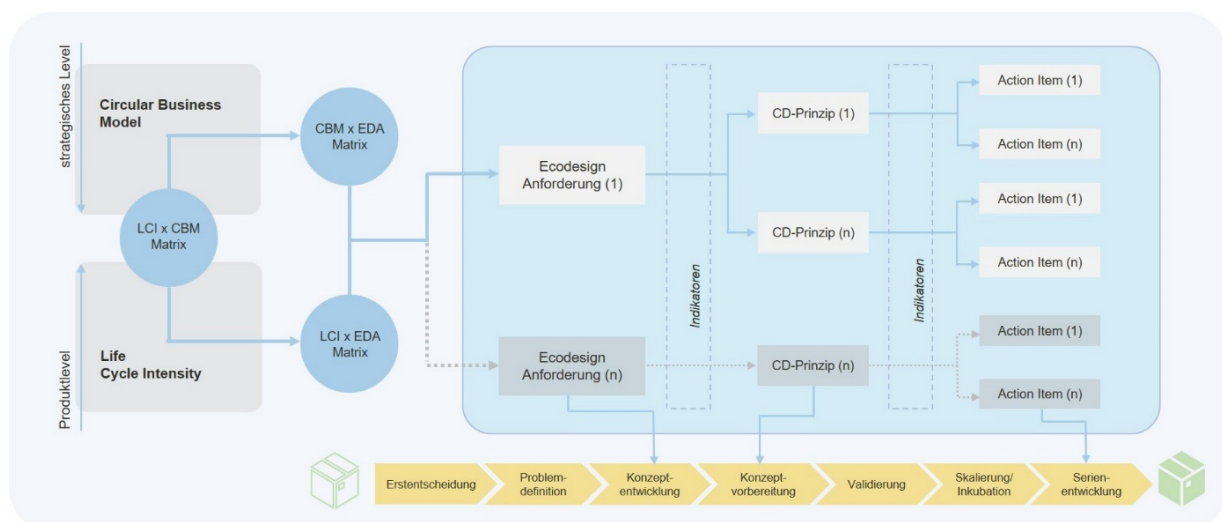


Abbildung 3: Entwicklungsphasen-adaptierter Entscheidungsablauf für den industriellen Produktentwicklungsprozess (CBM = Circular Business Model; LCI = Life Cycle Intensity; EDA = Ecodesign Anforderung; CD-Prinzip = Circular Design Prinzip)

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH, dem Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH/Smart Enterprise Engineering sowie der iPoint-systems GmbH. Ganz besonders sei den Projektpartnern für die wertvollen Anregungen und fruchtbaren Diskussionen gedankt sowie den beiden anonymen Gutachtern, die mit ihren Kommentaren zur Verbesserung und Präzisierung dieser Arbeit beigetragen haben.

Das Projekt DfC-Industry wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und den Projektträger Jülich betreut. Auch ihnen gilt der Dank des Autorenteam. Die alleinige Verantwortung für diesen Text liegt bei den Autoren.

Autorenbeitrag

Konzeptualisierung, A. P., A. K., T. V., J. W.; Methodik, A. P., A. K.; Schreiben - Erstellung des ursprünglichen Entwurfs, A. P., A. K.; Korrektur und Redaktion, A. P., A. K., T. V., J. W.; Visualisierung, A. P., A. K.; Projektverwaltung, T. V. und J. W.. Alle Autoren haben die veröffentlichte Fassung des Manuskripts gelesen und ihr zugestimmt.

Literatur

- Bender und Gericke 2021 BENDER, Beate; GERICKE, Kilian: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Charter 2019 CHARTER, Martin: Designing for the circular economy. London, New York, NY: Routledge, 2019.
- Dassault Systèmes SolidWorks Corporation 2022 DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS CORPORATION: Solidworks Sustainability. Online verfügbar unter <https://www.solidworks.com/solutions/sustainability>, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- DIN EN 45552:2020-05 Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Funktionsbeständigkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45552:2020.
- DIN EN 45554:2020-10 Allgemeine Verfahren zur Bewertung der Reparier-, Wiederverwend- und Upgradbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45554:2020.
- ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH 2022 ECODESIGN COMPANY ENGINEERING & MANAGEMENT CONSULTANCY GMBH: ECODESIGN+. Online verfügbar unter <https://www.ecodesign-company.com/en/ecodesign-plus-en/about-en>, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- Ellen MacArthur Foundation 2013 ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. Online verfügbar unter <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o>, zuletzt geprüft am 21.04.2022.
- Europäische Kommission 2022 EUROPÄISCHE KOMMISSION: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC, vom 2022/0095.
- Geissdoerfer et al. 2020 GEISSDOERFER, Martin; PIERONI, Marina P.P.; PIGOSSO, Daniela C.A.; SOUFANI, Khaled: Circular business models: A review. In: Journal of Cleaner Production 277, S. 123741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123741.
- Grünig, Rudolf und Kühn, Richard 2013 GRÜNIG, Rudolf; KÜHN, Richard: Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz. 4. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hansen et al. 2020 HANSEN, Erik G.; LÜDEKE-FREUND, Florian; FICHTER, Klaus: Circular business model typology. Actor, circular strategy, and service level. Linz: Institute for Integrated Quality Design (IQD), Johannes Kepler University Linz (JKU).
- Hauschild et al. 2018 HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving: Life Cycle Assessment. Theory and Practice. Cham: Springer.
- Hicks und Halvorsen 2019 HICKS, Andrea L.; HALVORSEN, Heather: Environmental impact of evolving coffee technologies. In: Int J Life Cycle Assess 24 (8), S. 1396-1408. DOI: 10.1007/s11367-018-1575-0.

- Hoke et al. 2013 HOKE, A.; BRISSETTE, A.; MAKSIMOVIC, D.; KELLY, D.; PRATT, A.; BOUNDY, D.: Maximizing lithium ion vehicle battery life through optimized partial charging. In: IEEE ISGT, S. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT.2013.6497818.
- Hollander et al. 2017 HOLLANDER, Marcel C. den; BAKKER, Conny A.; HULTINK, Erik Jan: Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. In: Journal of Industrial Ecology 21 (3), S. 517-525. DOI: 10.1111/jiec.12610.
- Kamp Albæk et al. 2020 KAMP ALBÆK, Julie; SHAHBAZI, Sasha; McALOONE, Tim C.; PIGOSSO, Daniela C. A.: Circularity Evaluation of Alternative Concepts During Early Product Design and Development. In: Sustainability 12 (22), S. 9353. DOI: 10.3390/su12229353.
- Khan et al. 2018 KHAN, Muztoba Ahmad; MITTAL, Sameer; WEST, Shaun; WUEST, Thorsten: Review on upgradability – A product lifetime extension strategy in the context of product service systems. In: Journal of Cleaner Production 204, S. 1154–1168. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.329.
- Kirchherr et al. 2017 KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: Resources, Conservation and Recycling 127, S. 221-232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- Lewandowski 2016 LEWANDOWSKI, Mateusz: Designing the Business Models for Circular Economy- Towards the Conceptual Framework. In: Sustainability 8 (1), S. 43. DOI: 10.3390/su8010043.
- Lüdeke-Freund et al. 2018 LÜDEKE-FREUND, Florian; GOLD, Stefan; BOCKEN, Nancy M. P.: A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. In: Journal of Industrial Ecology 23 (1), S. 36-61. DOI: 10.1111/jiec.12763.
- Lyne et al. 2020 LYNE, Alexandra; ASHLEY, Paul; SAGET, Sophie; PORTO COSTA, Marcela; UNDERWOOD, Benjamin; DUANE, Brett: Combining evidence-based healthcare with environmental sustainability: using the toothbrush as a model. In: British dental journal 229 (5), S. 303-309. DOI: 10.1038/s41415-020-1981-0.
- Moss 1985 MOSS, Marvin A.: Designing for minimal maintenance expense. The practical application of reliability and maintainability. New York: Dekker (Quality and reliability, 1).
- Pfeffer 2013 PFEFFER, Peter: Lenkungsbandbuch. Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. 2., überarb. u. erg. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).
- Pigosso et al. 2013 PIGOSSO, Daniela C. A.; GRANDI, Carlos M.; ROZENFELD, Henrique: Strategic implementation of design for environment at Embraer. In: Proceedings of EcoDesign 2013 International Symposium Korea National Cleaner Production.
- Ponn und Lindemann 2008 PONN, Josef; LINDEMANN, Udo: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI).
- Schawel und Billing 2012 SCHAWEL, Christian; BILLING, Fabian: Top 100 Management Tools. Das wichtigste Buch eines Managers: ABC-Analyse bis Zielvereinbarung. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler
- Tura et al. 2019 TURA, Nina; HANSKI, Jyri; AHOLA, Tuomas; STÄHLE, Matias; PIIPARINEN, Sini; VALKOKARI, Pasi: Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. In: Journal of Cleaner Production 212, S. 90-98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.202.
- Umweltbundesamt 2022a UMWELTBUNDESAMT: ecodesignkit. Online verfügbar unter <https://www.ecodesignkit.de/>, zuletzt geprüft am 14.12.2022.

- Umweltbundesamt 2022b UMWELTBUNDESAMT: Elektrokleingerät. Definition. Online verfügbar unter https://sns.uba.de/umthes/de/concepts/_00658851.html, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- VDI-Norm 4800 VDI-NORM 4800 Blatt 1: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag, Berlin.
- Wimmer und Züst 2001 WIMMER, Wolfgang; ZÜST, Rainer (2001): Ecodesign-Pilot. Produkt-Innovations-, Lern- und Optimierungs-Tool für umweltgerechte Produktgestaltung - mit deutsch/englischer CD-ROM. Zürich: Verl. Industrielle Organisation.

Ein DSM-basiertes Assistenzsystem zur Visualisierung von Artefaktbeziehungen in der Produktentwicklung von KMU

A DSM-based Assistance System for Visualizing Artifact Relationships in Product Development of SMEs

Jan-Phillip Herrmann¹, Christoph Trojanowski², Sebastian Imort¹, Carolin Pankrath³, Andreas Deuter¹, Sven Tackenberg¹

¹Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachbereich Produktions- und Holztechnik, 32657 Lemgo
jan-phillip.herrmann@th-owl.de

²Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Fachbereich Informatik, Kommunikation und Wirtschaft, 10318 Berlin

christoph.trojanowski@HTW-Berlin.de

³LMtec Service GmbH, 14480 Potsdam

lmtec@lmtec.eu

Abstract (deutsch): Die steigende Anzahl von Entwicklungsartefakten (z. B. mechanische oder elektronische Bauteile, Softwarefunktionen, Dokumente) konfrontiert klein- und mittelständische Unternehmen mit der Herausforderung, die vielfältigen Wirkbeziehungen zwischen Artefakten zu überblicken. Die fehlende Kenntnis von Artefaktbeziehungen verursacht Probleme, wie beispielsweise Fehleinschätzungen der Auswirkungen technischer Änderungen auf Abteilungen und das Gesamtsystem. Mit Hilfe der Design Structure Matrix (DSM) lassen sich die Elemente und Beziehungen von komplexen Systemen übersichtlich darstellen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein auf der DSM basierendes Assistenzsystem vorgestellt, welches Artefakte und Artefaktbeziehungen mittels dreidimensionaler graphbasierter Benutzungsoberfläche darstellt. Das Assistenzsystem nutzt Algorithmen zur Berechnung von Graphlayouts, Clusteranalysen und Vorhersagen von Änderungsauswirkungen. Es werden die Algorithmen und die resultierenden Darstellungsformen beschrieben. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion des Nutzens und zukünftiger Aktivitäten.

Keywords (deutsch):

Design Structure Matrix, Assistenzsystem, Benutzungsoberfläche, Produktentwicklung, Verwaltungsschale

Abstract (english): The increasing number of product development artifacts (e. g., mechanical or electrical components, software functions, documents) when developing complex systems confronts SMEs with preserving the overview of their manifold relationships. Unawareness of relationships can cause problems like missing communication of changes or product developers failing to predict engineering change effects on the system. The design structure matrix (DSM) is a matrix-based representation of the elements and relationships in a complex system.

This paper describes a DSM-based assistance system that visualizes product development artifacts and their relationships in a three-dimensional graph-based user interface. The assistance system employs different algorithms for graph layout generation, cluster analysis, and prediction of engineering change effects newly developed or modified from the literature. The algorithms and the resulting visualizations are presented. It is closed by discussing the assistance system's benefits for product developers and outlining future activities.

Keywords (english):

Design Structure Matrix, Assistance System, User Interface, Systems Engineering, Asset Administration Shell

1 Einleitung

Durch die fortschreitende digitale Transformation sehen sich kleine und mittlere Unternehmen (KMU) über den gesamten Produktlebenszyklus mit einer zunehmenden Komplexität bei der Entwicklung und Verwaltung von cyber-physischen Systemen konfrontiert. Technologischer Wandel, Produktvielfalt und Prozessagilität sind Beispiele für Komplexitätstreiber, die die Ziele der Produktentwicklung in Bezug auf Zeit, Kosten, Qualität und Flexibilität erheblich beeinflussen (Latos et al. 2018). Unbekannte Beziehungen zwischen den Artefakten der Produktentwicklung sind als eines der Kernprobleme von KMU bei der Beherrschung von Komplexität während der Produktentwicklung festgestellt worden. Im Gegensatz zu großen Unternehmen mit dedizierten Systems-Engineering-Abteilungen verfügen KMU nicht über die erforderlichen Ressourcen für eine gründliche Dokumentation und Verwaltung von Artefaktbeziehungen. Entsprechend sind Informationen über solche Beziehungen meist ein implizites Wissen der Produktentwickler. Je komplexer die Produkte werden, desto weniger sind die Beziehungen zwischen den Artefakten den beteiligten Akteuren bekannt. Ohne das Vorliegen und dem Abruf eines solchen Entscheidungswissens lassen sich die Auswirkungen von technischen Änderungen auf andere Artefakte nicht vorhersagen.

Die Design-Struktur-Matrix (DSM) ist eine leistungsfähige Methode zur Modellierung komplexer technischer Systeme und kann eine Vielzahl an Informationen zur strukturellen Komplexität von Produkten und Prozessen abbilden (Browning 2016). Bei einer DSM handelt es sich um eine quadratische Matrix, dessen Spalten und Zeilen durch die Komponenten des betrachteten Systems indiziert und deren Beziehungen zueinander durch binäre, symbolische oder numerische Einträge beschrieben sind. Im Gegensatz zur Erstellung detaillierter Systemmodelle (siehe z. B. Jacobs et al. (2022), die einen leistungsstarken SysML-basierten Ansatz vorstellen) sind die Autoren dieses Beitrags der Auffassung, dass die Erstellung von SysML-Modellen für KMUs zu zeitaufwändig ist und ein tiefgreifendes Expertenwissen über das System und die Modellierungssprache erfordert. Daher verwenden wir im Folgenden eine binäre DSM als kosten- bzw. aufwandseffiziente Beschreibung eines komplexen Systems für KMU.

Das Forschungsprojekt "*Funktionsorientiertes Komplexitätsmanagement in allen Phasen der Produktentstehung*" (FuPEP) entwickelt ein Assistenzsystem für KMU, das Produktentwickler beim Management von Komplexität im Entwicklungsprozess unterstützt. Insbesondere soll es den Produktentwicklern helfen, ein Bewusstsein für die Beziehungen zwischen den relevanten Artefakten zu schaffen und die Konsequenzen und Ergebnisse von technischen Änderungen zu reflektieren. Die Unterstützung der Produktentwicklung durch ein Assistenzsystem und der Einsatz einer benutzerfreundlichen Visualisierungen mittels Graphenstrukturen sind zwei akademische Bereiche, die bisher unabhängig voneinander untersucht worden sind. Mehrere Werkzeuge zur Unterstützung von Produktentwicklungsaktivitäten existieren bereits. Beispiele sind die Product Lifecycle Management (PLM) Software Teamcenter (Herbst, Hoffmann 2018) oder datengetriebene Assistenzsysteme mit Methoden der künstlichen Intelligenz (Küstner 2020). Nur wenige Autoren haben sich aber mit Graphenlayouts zur Visualisierung von Beziehungen in komplexen Systemen beschäftigt (Jarratt et al. 2004; Peterson 2014). Darüber hinaus sind domänenunabhängige Graphvisualisierungs- und Analysewerkzeuge wie Gephi (Bastian et al. 2009) oder Pajek (Jünger und Mutzel 2013) verfügbar. Es konnte jedoch kein Assistenzsystem identifiziert werden, das eine benutzerfreundliche und intuitive Visualisierung komplexer Systeme und deren Beziehungen bietet. Insbesondere fehlt es den bestehenden Assistenzsystemen an Möglichkeiten zur visuellen Netzwerkanalyse sowie an Funktionen zur Vorhersage der Auswirkungen von Veränderungen, wie z. B. Graphennavigation, Analyse des kürzesten Pfades oder Analyse der Ausbreitung von Veränderungen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt daher das Konzept und die Anwendung bestehender DSM-basierter Methoden zum Komplexitätsmanagement und die darauf aufbauende Visualisierung der Auswirkungen von Produkt- und Prozessänderungen. Hierzu werden in Abschnitt 2 die Ergebnisse

einer Studie zu den Anforderungen an ein entsprechendes Assistenzsystem eingeführt. Anschließend erfolgt eine Darstellung der Architektur, der Methoden sowie der angepassten Algorithmen für ein assistenzgestütztes Komplexitätsmanagement. Ferner wird eine grafische Benutzungsoberfläche vorgestellt, die mittels einer Gaming-Engine realisiert worden ist und die Funktionen des Änderungsmanagements und des Clusterings integriert. Zielgruppe für das entwickelte Assistenzsystem sind Produkt- und Prozessentwickler von KMU. Zur Veranschaulichung der eingesetzten DSM-basierten Methoden und des Nutzens eines algorithmengesteuerten Komplexitätsmanagements dient eine 3D-gedruckte intelligente Lampe ("SmartLight") als Use Case. Der Beitrag schließt in Abschnitt 3 mit der Diskussion der Vorteile und Grenzen des Assistenzsystems.

2 Assistenzsystem

2.1 Anforderungen und Architektur

Ziel ist die Bereitstellung eines Assistenzsystems mit einer grafischen Benutzungsoberfläche für KMU. Ein solches System unterstützt die Produkt- und Prozessentwickler bei der Beherrschung von Produkt- und Prozesskomplexität durch eine entsprechende Visualisierung. In zwölf Einzel- und zwei Gruppeninterviews bei zwei KMUs haben die Autoren 30 Anwendungsfälle und 130 Anforderungen an ein solches Assistenzsystem erhoben. Nach der Identifizierung der relevanten Anwendungsfälle und Anforderungen erfolgte deren Priorisierung durch die Produktentwickler der Unternehmen. Eine Übersicht über die besonders relevanten Anwendungsfälle gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Relevante Anwendungsfälle (Use Cases)

Use Case	Beschreibung	In-Scope?
UC001	Abhängigkeiten zwischen Artefakten der Produktentwicklung sichtbar machen	JA
UC008.a	Unterstützung der Freigabe von Systemfunktionen und deren Kommunikation	NEIN
UC012.a	Suchfunktionen für Artefaktinformationen	JA
UC012.b	Intuitive graphische Informationsdarstellung	JA
UC012.f	Darstellung der Auswirkungen von technischen Änderungen	JA

Die bereits realisierte Implementierung des Assistenzsystems unterstützt alle Anwendungsfälle mit Ausnahme von UC008.a. Jeder Anwendungsfall wird durch eine Reihe von Anforderungen beschrieben. UC001 umfasst Anforderungen an die Darstellung von Beziehungen zwischen verschiedenen Artefakten aus unterschiedlichen Domänen. Bei den Artefakten kann es sich hierbei um Dokumente, Produkthanforderungen, Entwürfe oder Testfälle handeln. UC012.a, UC012.b und UC012.f umfassen Anforderungen, die sich auf relevante Informationen über Artefakte und ihre Beziehungen beziehen. Diese Anforderungen sind u. a. in Konzepte für ein Dashboard mit Zahlen über die Komplexität eines Produkts, in Darstellungen hinsichtlich der Auswirkungen von technischen Änderungen auf andere Artefakte mit Hilfe eines ampelähnlichen Farbsystems oder eine Anzeige der hierarchischen Baugruppenstruktur eines Produkts überführt worden. Eine detaillierte Auflistung und Beschreibung aller ermittelten Anwendungsfälle und Anforderungen ist in Herrmann et al. (2021) veröffentlicht.

Abbildung 1 zeigt die dreistufige Architektur des Assistenzsystems. Hierbei enthält die Asset Administration Shell (Verwaltungsschale) alle artefakt- und beziehungsbezogenen Informationen. Bei dieser handelt sich um eine standardisierte digitale Repräsentation der Attribute und Beziehungen von Artefakten in Form von Assets, Submodellen, Submodellsammlungen (Plattform Industrie 4.0 2023). Der Asset Administration Shell-Server (b) importiert Artefakte und ihre Beziehungen aus Drittsystemen wie ERP- oder PLM-Systemen (a) über einen Data Manager und speichert diese in den Asset Administration Shells. Bei Anfragen von der grafischen Benutzungsoberfläche (d) holt sich der

DSM-Server über HTTP / REST vom Asset Administration Shell-Server ein DSM-Objekt mit allen relevanten Informationen für die Berechnung der Algorithmen und Visualisierungen. Nachdem die Algorithmen auf dem DSM-Objekt ausgeführt worden sind, sendet der DSM-Server das DSM-Objekt über einen Google Remote Procedure Call (gRPC 2023) an die grafische Benutzungsoberfläche. Die grafische Benutzungsoberfläche ist in Unity implementiert, einer plattformübergreifenden Spiel-Engine (Unity Technologies 2023). Der automatische Import von Artefakten und Beziehungsinformationen aus Drittsystemen ist aktuell eine vorgesehene, aber noch nicht vollständig für den Data Manager implementierte Funktion. In der vorliegenden Version wird die Asset Administration Shell aus einer Excel-Datei generiert, in der alle Artefakte und Beziehungsinformationen durch den User manuell zu hinterlegen sind. Für eine detaillierte Beschreibung der Darstellung der Asset Administration Shell einer DSM und der Struktur der Excel-Datei sei auf Imort et al. (2022) verwiesen.

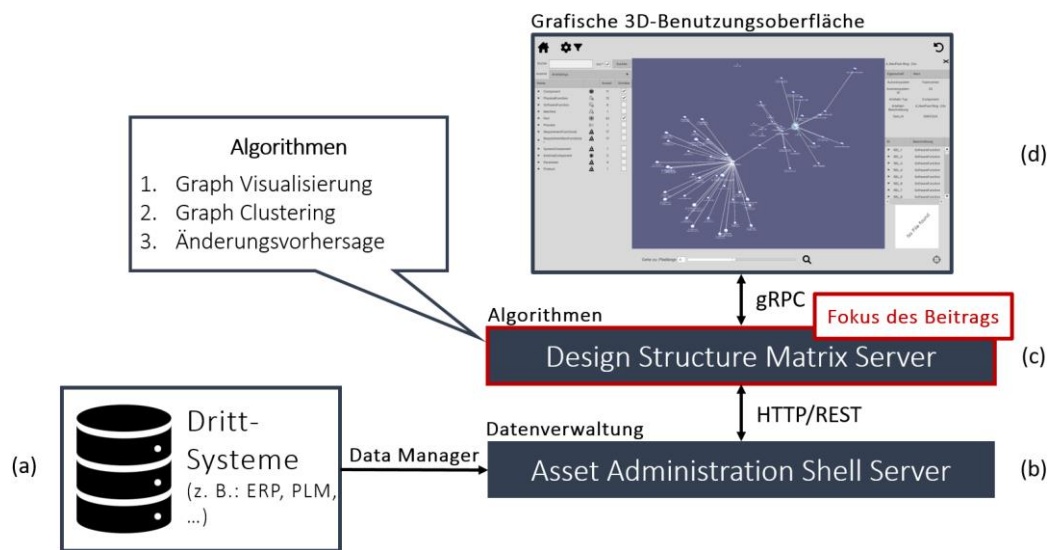


Abbildung 1: Dreistufige Assistenzsystem-Architektur

2.2 Assistenzsystem – Anwendung auf den Use Case SmartLight

Die Funktionen des Assistenzsystems werden im Folgenden anhand des Use Cases „SmartLight“ eingeführt. Bei der SmartLight handelt es sich um eine LED-Lampe mit einem 3D-gedruckten Gehäuse, die über eine Desktop-App angesteuert werden kann. Die App ist über ein WIFI-Modul mit einer montierten elektrischen Platine sowie einem Lichtring verbunden. Mittels der App können User das Licht der SmartLight an- und ausschalten und die Lichtfarbe ändern.

Die SmartLight stellt ein cyber-physisches System dar, das Artefakte aus verschiedenen Bereichen, wie physische Teile, Elektronik und Software, integriert. Abbildung 2 stellt die SmartLight mit den zentralen physischen Komponenten sowie die zugehörige DSM dar. In den folgenden Abschnitten wird die DSM der SmartLight herangezogen, um die Funktionen des Assistenzsystems zu beschreiben. Der Detaillierungsgrad der Modellierung der Artefakte eines Produktes und der zugrundeliegenden Prozesse kann entsprechend des Anwendungsfalles variieren. Daher kommen domänenspezifische oder -übergreifende DSMs unterschiedlicher Größe zum Einsatz.

2.3 Graphvisualisierung und Benutzungsoberfläche

Die Lesbarkeit einer graphenbasierten Darstellung einer DSM weist gegenüber einer matrizenbasierten Abbildung Vorteile hinsichtlich der Verständlichkeit auf. So hat die empirische Studie von Keller et al. (2006) aufgezeigt, dass Probanden bei einem Graphen im Vergleich zu einer matrizenbasierten Darstellung signifikant geringere Reaktionszeiten und Fehlerquoten bei der Suche

nach Relationen oder der Analyse des kürzesten Pfades erzielen. Daher erfolgte für das FuPEP-Assistenzsystem eine Konzipierung und Implementierung von Algorithmen zum Zeichnen von Graphen im dreidimensionalen Raum. Die vorgenommene graphische Erweiterung auf drei Dimensionen vergrößert den Raum möglicher Knotenpositionen und reduziert Kantenkreuzungen, eines der Hauptprobleme im Zusammenhang mit der Ästhetik von Graphen (Purchase 1997).

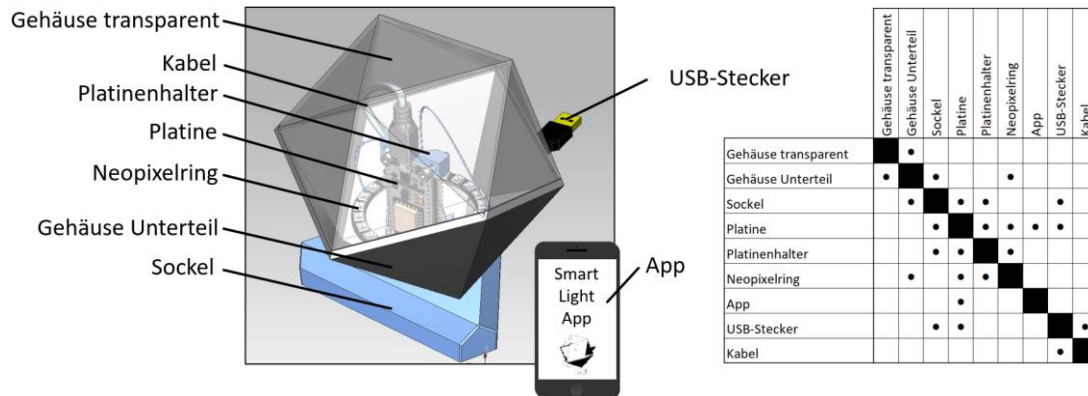


Abbildung 2: SmartLight Demonstrator

Das FuPEP-Assistenzsystem nutzt binäre symmetrische DSMs, die als ungerichtete zyklische Graphen darzustellen sind. Für die Realisierung der geforderten dreidimensionalen Darstellung erfolgte eine Anpassung des ForceAtlas2-Algorithmus. Der ForceAtlas2 ist ein Graphenlayout-Algorithmus, der in der Graphenvisualisierungssoftware Gephi (Jacomy et al. 2014) Anwendung findet. Abbildung 3 zeigt die automatisch generierte Hauptansicht nach Auswahl der Asset Administration Shell einer DSM. Die linke Seite der dargestellten Benutzeroberfläche ermöglicht dem User die Auswahl der Artefakte über die Baumansicht. Die Baumansicht zeigt die Hierarchie der Artefakte nach ihrem Artefakttyp (z. B. Komponente oder Prozess) und lässt deren Ein- und Ausblenden zu.

In der Hauptansicht der Benutzeroberfläche wird mittig das vom ForceAtlas2 erzeugte Graphenlayout angezeigt. Die Knoten sind mit den Artefaktnamen beschriftet. Aus der Ansicht in Abbildung 3 kann der Nutzer die Elemente und Relationen sowie die Architektur ableiten. In der oberen linken Ecke (siehe Abbildung 3, Mitte) ist beispielsweise die Architektur der Platine der SmartLight dargestellt. Die Sternstruktur mit einem Mittelpunkt ergibt sich aus den elektronischen Komponenten, die alle mit der Platine eine Beziehung aufweisen. Kabel und Schrauben verbinden die Platine mit den weiteren Komponenten. Die realisierte Darstellungsform kann der Nutzer eine visuelle Beurteilung der Modularität von Produkten und ihrer Artefakte vornehmen. Modular organisierte Artefakte werden z. B. als kettenartige Strukturen vom Visualisierungsalgorithmus gezeichnet. Hochgradig bus-modulare Systeme, wie die elektronische Platine, weisen hingegen eine sternförmige Struktur auf.

Wählt der Nutzer ein Artefakt über die Baumstruktur oder im Graph aus, wird ein Fenster mit den Eigenschaften zum Artefakt eingeblendet. In diesem sind Informationen, wie beispielsweise der Name, die Identifikationsnummer, die Herkunft (Fremdsystem) und eine Liste von Beziehungen zu anderen Artefakten dargestellt. Abbildung 4 (rechts) zeigt das Eigenschaftsfenster für die Auswahl des Artefakts ["4_NeoPixel Ring -24x"]. Durch die vorgenommene Auswahl erfolgt auch eine Veränderung der Perspektive auf den Graphen. So ermöglicht die Navigationsfunktion dem Nutzer, sich im dreidimensionalen Raum zu bewegen. Auf diese Weise können Details der Graphenstruktur sowie bestimmte Artefakte und ihre Beziehungen zu anderen Artefakten analysiert werden.

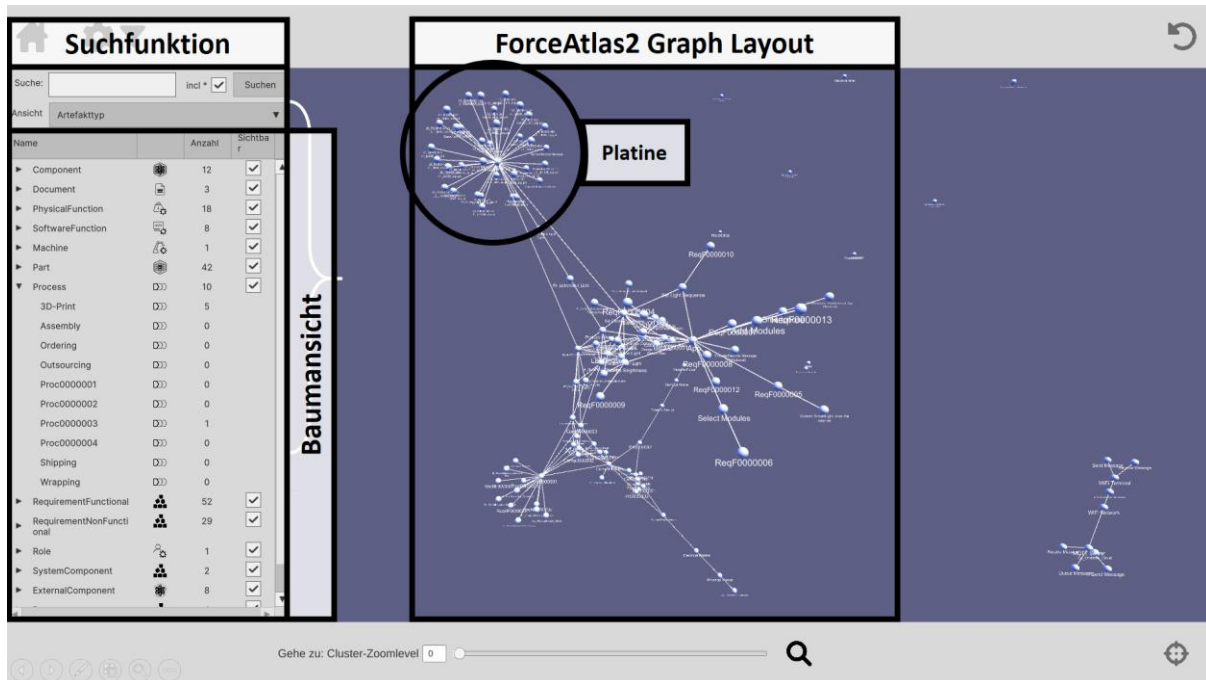


Abbildung 3: Hauptansicht der Benutzungsoberfläche des Assistenzsystems

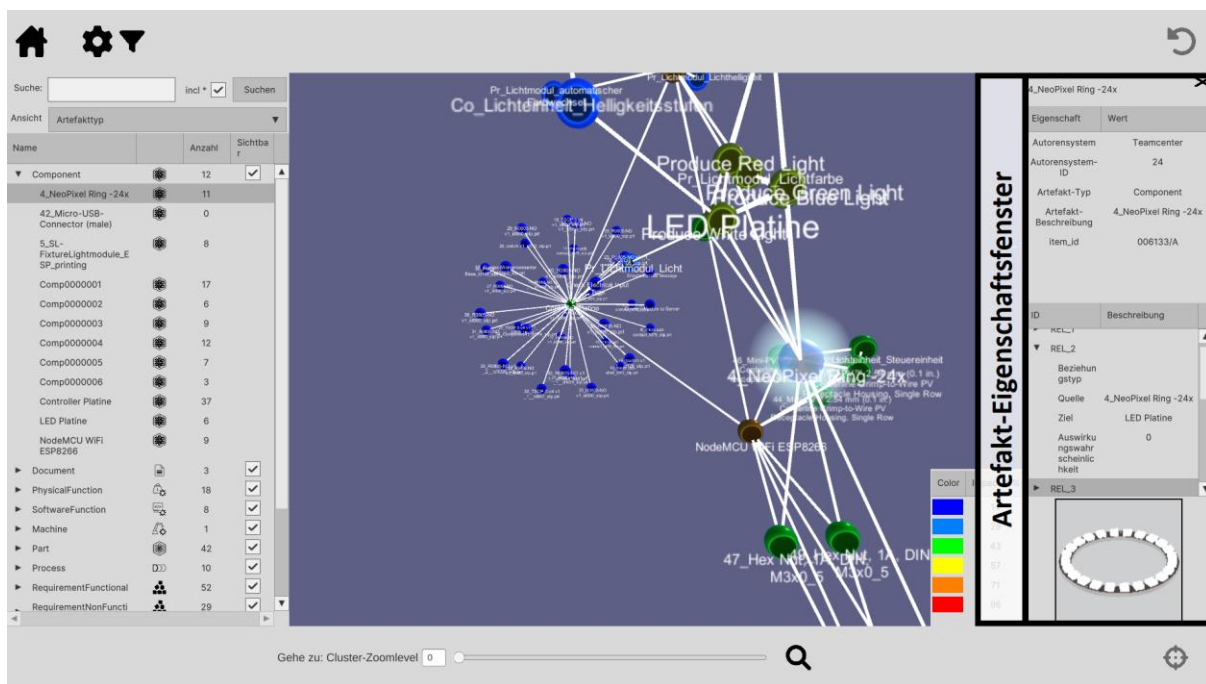
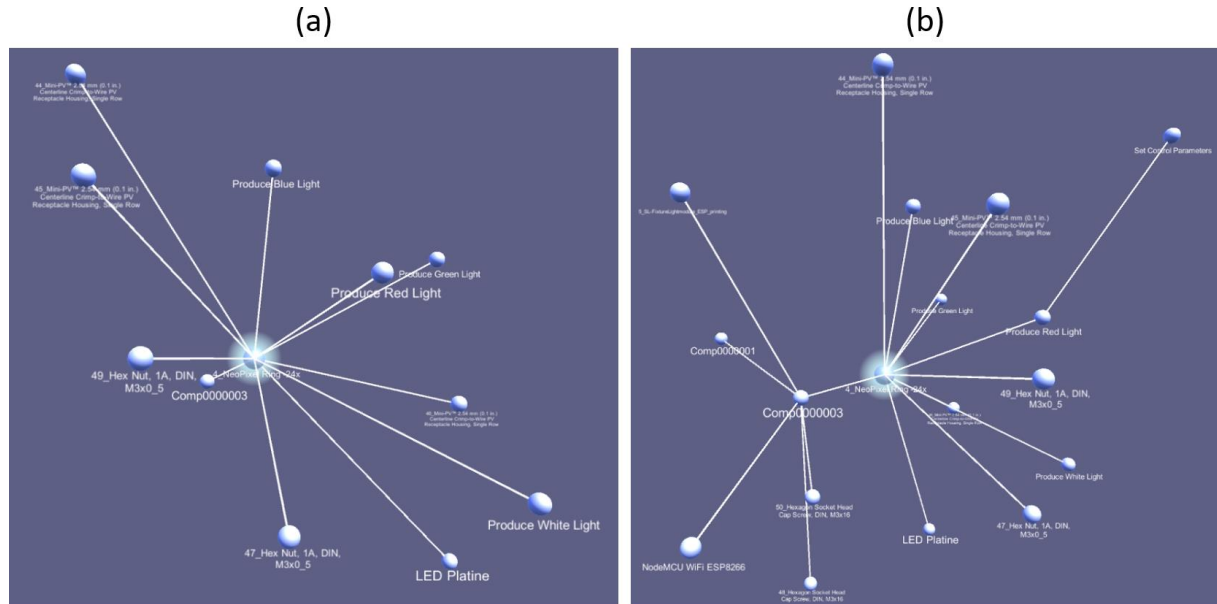


Abbildung 4: Auswahl von Artefakten

Eine intuitiv verständliche Darstellung der Beziehungen zwischen Artefakten lässt sich mittels der Ansicht des kürzesten Pfades realisieren. Da eine DSM auch Zyklen abbilden kann, sind diese für die Visualisierung aufzulösen. D. h., eine Änderung von A, die eine Änderung von B bewirkt, führt wiederum zu einer Änderung von A. Dies erschwert die Verständlichkeit, da eine Vielzahl an Schleifen entstehen können. Zur vereinfachten Visualisierung bietet es sich an, das Konzept des kürzesten Pfades zu nutzen. Daher erzeugt ein Algorithmus eine vorwärtsgerichtete Baumstruktur und eliminiert enthaltene Zyklen durch die Anzeige derjenigen Beziehungen, welche in den kürzesten Wegen zwischen Artefakten enthalten sind. Der erzeugte Graph bildet den kürzesten Pfad zwischen dem Startelement und den anderen Elementen der DSM mit einer vom Nutzer festgelegten maximalen

Pfadlänge ab. Wird das Start- und das Ziel-Element vom Nutzer vorgegeben, so werden alle direkten Pfade zwischen diesen Elementen angezeigt, wenn je Pfad die angegebene Maximallänge nicht überschritten wird. Die Abbildungen 5 (a) und (b) zeigen die Ansicht des kürzesten Pfades für eine vom Nutzer angegebene maximale Pfadlänge von eins und zwei. Abbildung 5 (c) zeigt den Pseudocode des entsprechenden Algorithmus für die Erzeugung eines Graphen.



Algorithm 1 Shortest Path Analysis

Require: dsm, n_{start}, l_{max}

```

dms ← ∅
for  $l \leq l_{max}$  do
   $dsm_l \leftarrow \emptyset$ 
  for all  $n \neq n_{start}$  do
     $shortestPath \leftarrow ShortestPath(dsm, n_{start}, n, l)$ 
     $dsm_l \leftarrow dsm_l \cup \{(n_i, n_j) \mid (n_i, n_j) \in shortestPath\}$ 
  end for
   $dms \leftarrow dms \cup dsm_l$ 
end for
return  $dms$ 

```

Figure 5: Darstellung des kürzesten Weges mit einer maximalen Länge $l_{max} = 1$ (a) und $l_{max} = 2$ (b) sowie der Pseudocode für die Erstellung (c).

2.4 Graph Clustering

Clustering-Algorithmen für Graphen werden zur Vereinfachung des Layouts und zur Identifizierung von zusammenhängenden Elementen / Prozessen, sogenannten funktionalen Modulen, einer DSM verwendet. Funktionale Module stellen eine Aggregation miteinander verbundener Artefakte dar. Mehrere Artefakte können zu einem Bus zusammengefasst werden, wenn diese als Träger für andere Artefakte dienen (Sharman und Yassine 2004). Für das Zusammenfassen von Artefakten existieren in der Literatur eine Vielzahl an Clustering-Algorithmen für DSMs (z. B. Idicula 1995). Für das FuPEP-Assistenzsystem und das Erzeugen des erforderlichen Clusterings ist der ForceAtlas2 und für die Entwicklung des Graphenlayouts der k-means-Algorithmus umgesetzt worden (Lloyd 1982; MacQueen 1967). Als Eingabe für die beiden Algorithmen wird die Adjazenzmatrix der Artefakte verwendet, die sich aus den Positionen des Graphenlayouts ergibt. Auf diese Weise erfolgt ein Clustern auf der Grundlage der zur Verfügung gestellten Graphenstruktur. Darüber hinaus ermöglicht der k-means-Algorithmus, unter Anwendung des Lloyd-Algorithmus, aufgrund seiner linearen Zeitkomplexität die effiziente Generierung von Clustern auch bei großen DSMs. Abbildung 6 zeigt den Pseudocode und das aus dem ForceAtlas2 resultierende Graphenlayout nach erfolgter Clustering.

Der ForceAtlas2 wird für jede verbundene Komponente der DSM berechnet. Auf der Grundlage der generierten Artefaktpositionen im dreidimensionalen Raum wird die Affinitätsmatrix bestimmt. Diese bildet den Ausgangspunkt für die Ausführung des k-means-Algorithmus. Anschließend wird die optimale Anzahl von Clustern k mithilfe der Elbow-Methode berechnet (siehe Cui (2020) für eine Einführung in den k-means-Algorithmus unter Verwendung der Elbow-Methode). Diese Methode führt den k-means-Algorithmus für alle zulässigen Cluster k durch. Die Anzahl von k mit der geringsten Verzerrung (ein Qualitätskriterium des Clustering) wird als Optimum ausgewählt. Abschließend werden die Zeilen und Spalten der ursprünglichen DSM neu angeordnet, indem Artefakte innerhalb eines Clusters nebeneinander platziert werden. Zeilen und Spalten, die zu einem Cluster gehören, bleiben jedoch ungeordnet.

Die Ergebnisse nach Ausführung von Algorithmus 2 werden mittels Algorithmus 3 verdichtet und ergeben eine neue DSM. Im Gegensatz zur Klassifizierung existieren beim Clustering keine vordefinierten Cluster-Labels. Daher wird für jedes Cluster ein repräsentatives Element mit Hilfe des PageRank-Algorithmus (Page et al. 1999) bestimmt. Hierbei handelt es sich um das Element mit dem höchsten Rang im PageRank-Algorithmus. Anschließend wird eine komprimierte DSM mit allen repräsentativen Elementen erstellt. Für diese wird anstelle einer binären Angabe über die Existenz / Nicht-Existenz einer Beziehung die Anzahl der Beziehungen innerhalb und zwischen den Clustern der initialen DSM angegeben. Abbildung 6 (rechts) zeigt den resultierenden Graph. Jede Kugel stellt hierbei ein Cluster dar. Die Sphären sind nach dem repräsentativen Element des jeweiligen Clusters benannt. Die Algorithmen 2 und 3 sind in Python unter Verwendung der Pakete Scikit-learn (2011) und Networkx (Hagberg et al. 2008) implementiert worden.

Algorithm 2 Cluster Analysis

```

Require: dsm
dsm ← Reorder(dsm, randomOrder)
components ← GetConnectedComponents(dsm)
for all co ∈ components ∧ Order(co) > 1 do
  positions ← ComputeForceAtlas2(co)
  m_Aff ← ComputeAffinityMatrix(positions)
  n_opt ← ComputeOptimalNumberOfClustersUsingElbowMethod(m_Aff)
  clustering ← KMeansAlgorithm(n_opt, m_Aff)
  for all cluster ∈ clustering do
    clusters ← clusters ∪ cluster
  end for
end for
dsm ← Reorder(dsm, clusters)
return dsm

```

Algorithm 3 Condense DSM

```

Require: dsm, clusters
dsm_clustered = ∅
representativeElements = ∅
for all cl ∈ clusters ∧ Order(cl) > 1 do
  reprElement ← GetFirstElementInPageRank(cl)
  representativeElements ← representativeElements ∪ reprElement
end for
for all row ∈ representativeElements do
  for all column ∈ representativeElements do
    noOfRel ← GetNoOfRelationshipsBetween(row, column)
    dsm_clustered ← dsm_clustered ∪ (row, column, noOfRel)
  end for
end for
return dsm_clustered

```

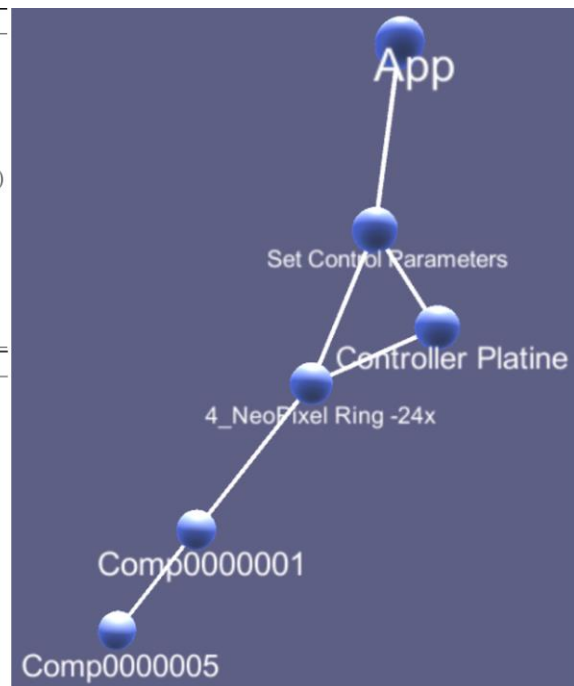


Abbildung 6: Pseudocode und resultierender Graph einer Clusteranalyse

2.5 Vorhersage von Änderungen

Das entwickelte FuPEP-Assistenzsystem umfasst Funktionen zur Beschreibung der direkten und indirekten Auswirkungen einer Produkt- oder Prozessänderung. Hierzu findet eine angepasste Version der Change Prediction Method (CPM) von Clarkson et al. (2004) Anwendung, die die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen einer Änderung auf andere Artefakte zu einem Risikomaß kombiniert. Zunächst erzeugt die CPM einen Ausbreitungsbaum, der aus Pfaden zwischen einem vom Nutzer angegebenen Start- und Zielelement (ohne Zyklen) besteht. Auf der Grundlage dieses

Ausbreitungsbaums erfolgt eine Berechnung der kombinierten Wahrscheinlichkeit der Änderungsausbreitung zwischen dem Start- und dem Zielelement. Das kombinierte Risiko ergibt sich als Ergebnis der Auswirkungen unter Berücksichtigung der kombinierten Wahrscheinlichkeit. Die Anwendung der CPM erfordert die Ergänzung der binären DSM um zwei numerische DSM-Matrizen. Diese beiden Matrizen geben die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen von Änderungen an (siehe Abschnitt 2.1). Für eine weiterführende Beschreibung der Berechnungen sei an dieser Stelle auf Clarkson et al. (2004) verwiesen.

Die für das Assistenzsystem modifizierte Version der CPM ermöglicht eine Berücksichtigung von Zyklen im Ausbreitungsbaum (Graph) bei gleichzeitiger Festlegung einer beliebigen Anzahl von Zielelementen. Bei der Änderung eines Artefaktes können somit die Auswirkungen auf das gesamte System oder eine Teilmenge davon bestimmt werden.

Wird vom Nutzer ein einzelnes Asset als Zielelement angegeben, kann das mittels der CPM berechnete Risiko für das Einfärben der Graphknoten herangezogen werden. Der Wertebereich für das kalkulierte Risiko erstreckt sich zwischen null und eins und wird für die Visualisierung in einen Farbwert überführt. Die verwendete Farbskala orientiert sich hierbei an der Darstellung von Temperaturen bei Wettervorhersagen. Abbildung 7 zeigt die Darstellung der Auswirkungen einer Änderung der Komponente ["4_NeoPixel Ring -24x"] auf das System SmartLight. Bei einer manuellen Auswahl eines Knotens durch den Nutzer, erfolgt die Einfärbung aller betroffenen Systemelemente durch das Assistenzsystem entsprechend des kalkulierten Risikos.

Durch die Einfärbung der Elemente (Knoten) werden Produkt- und Prozessentwickler befähigt, die von einer technischen Änderung betroffenen Artefakte hinsichtlich der Änderungswahrscheinlichkeit und der resultierenden Auswirkung zu bewerten. Die entsprechenden Informationen können genutzt werden, um gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen oder die entsprechenden Akteure über die vorliegende Änderung zu informieren. Mit Hilfe der Werte für Risiko und Auswirkung kann ein Näherungswert für den erforderlichen Zeit- und Arbeitsaufwand für die Änderung ermittelt werden. Abbildung 8 zeigt den Pseudocode zur Berechnung des Risikos einer Änderung für das betrachtete System.

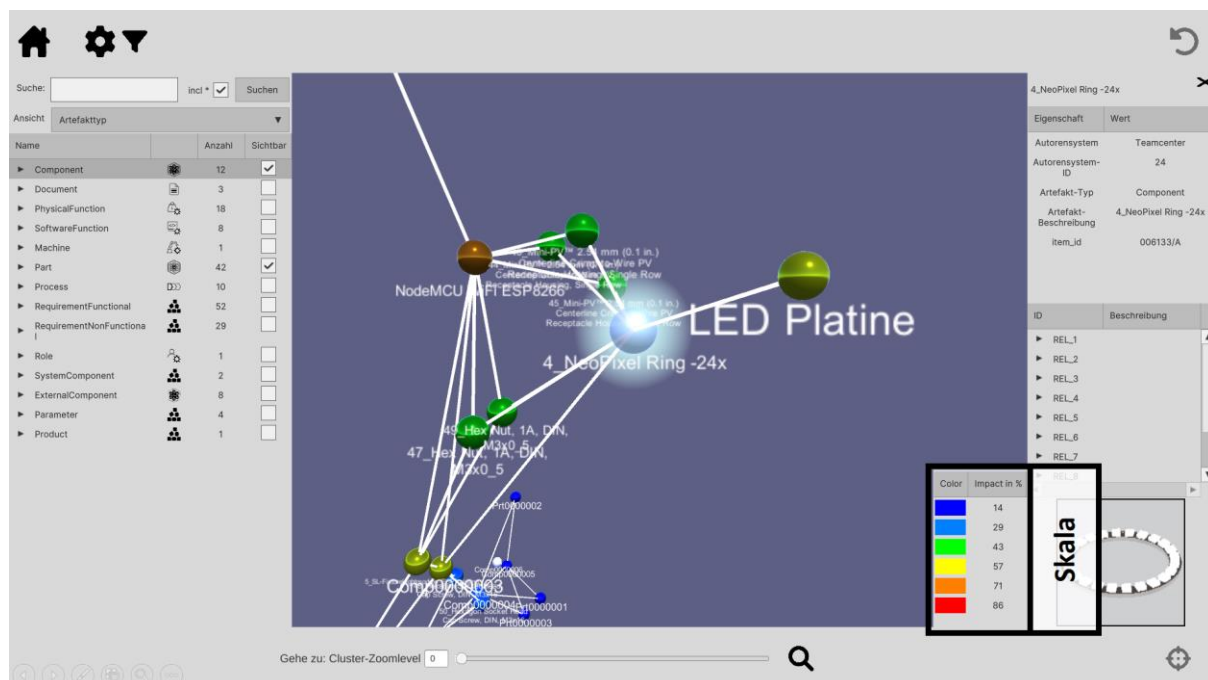


Abbildung 7: Änderungsvorhersage auf der Grundlage der Knoteneinfärbung im Assistenzsystem

Algorithm 1 Change Prediction

Require: $dsm, dsm_L, dsm_I, allow_cycles$
for all $n_{Source} \in dsm$ **do**
 for all $n_{Target} \in dsm$ **do**
 $column_R \leftarrow ChangePredictionMethod(n_{Source}, n_{Target}, allow_cycles)$
 end for
 $dsm_R \leftarrow dsm_R \cup column_R$
end for
return dsm_R

Abbildung 8: Implementierter Pseudocode des angepassten CPM von Clarkson et al. (2004)

3 Diskussion und Schlussfolgerung

Das vorgestellte Assistenzsystem bietet eine visuelle Darstellung und Analyse von Artefakten und deren Beziehungen zueinander. Die Funktionen des FuPEP-Assistenzsystems unterstützen den Nutzer, die vielfältigen Beziehungen und möglichen Konsequenzen einer Produkt- oder Prozessänderung zu identifizieren und zu verstehen. Bestehende Produktentwicklungs- und PLM-Softwarewerkzeuge sind jedoch bei der Organisation und Darstellung von Artefaktinformationen überlegen. Daher schafft das FuPEP-Assistenzsystem darüber hinausgehende Möglichkeiten zur Visualisierung von Änderungsprozessen und stellt eine wertvolle Erweiterung dieser Drittsysteme dar.

Die realisierten Visualisierungsformen von Beziehungen zwischen Artefakten, der Clusteranalyse und der Änderungsvorhersage unterstützen Produkt- und Prozessentwickler dabei, die Komplexität von Produktentstehungsprojekten zu beherrschen. Die aus der Darstellung abgeleitete Kenntnis von Beziehungen zwischen Artefakten soll bestehende Probleme, wie veraltete Dokumentation, fehlende Abstimmung mit betroffenen Disziplinen, verzögerte Änderungen etc. entschärfen (Herrmann et al. 2021). So leisten auch die im Assistenzsystem integrierten Clusteranalysen einen Beitrag zur Veranschaulichung der Auswirkungen von hochmodularen, integralen oder gemischten Produkt- und Prozessarchitekturen. Weiterhin bildet die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer Änderung und deren Auswirkungen einen Beitrag zur Abschätzung des erforderlichen monetären und zeitlichen Aufwands.

Das Assistenzsystem befindet sich noch in der Entwicklung, und die Umsetzung vieler Anforderungen steht noch aus. So erfolgte eine erste Evaluation der Usability des Assistenzsystems nur im Rahmen der Funktionsprüfung mit einer sehr begrenzten Anzahl an ausgewählten Akteuren der am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen. Daher sind die in dieser Veröffentlichung dargestellten Visualisierungen als erste Schritte in Richtung einer benutzerfreundlichen, intuitiven, grafischen Darstellung einer DSM zu interpretieren. Die angedachte Weiterentwicklung des Assistenzsystems betrifft eine geführte Navigation entlang der Auswirkungen einer Änderung. Hierdurch wird es dem Nutzer ermöglicht, sich durch den Graph angeleitet zu bewegen.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Besonderer Dank gilt den Experten der Unternehmen Leichtwerk AG und MSF-Vathauer Antriebstechnik GmbH & Co KG für ihr wertvolles Feedback bei der Entwicklung der verschiedenen Visualisierungsformen und für die Teilnahme an den Usability Assessments.

Literatur

- Bastian et al. 2009 BASTIAN, Mathieu; HEYMANN, Sebastien; JACOMY, Mathieu: *Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks*. In: *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media* 3 (2009), Nr. 1, S. 361–362. URL <http://ojs.aaai.org/index.php/icwsm/article/view/13937>
- Browning 2016 BROWNING, Tyson R.: *Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities*. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 63 (2016), Nr. 1, S. 27–52
- Clarkson et al. 2004 CLARKSON, P. John; SIMONS, Caroline; ECKERT, Claudia: *Predicting Change Propagation in Complex Design*. In: *Journal of Mechanical Design* 126 (2004), Nr. 5, S. 788–797
- gRPC 2023 gRPC: *gRPC A high performance, open source universal RPC framework*. URL <https://grpc.io/>
- Hagberg et al. 2008 HAGBERG, Aric; SWART, Pieter; SCHULTZ, Daniel: *Exploring network structure, dynamics, and function using networkx*. 2008 (Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, NM (United States) LA-UR-08-05495; LA-UR-08-5495)
- Herbst and Hoffmann 2018 HERBST, Sven; HOFFMANN, Alexander: *Product Lifecycle Management (PLM) mit Siemens Teamcenter: Grundlagen, Anwendung und Best Practices: Grundlagen, Anwendung und Best Practices*. [Place of publication not identified]: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018
- Herrmann et al. 2021 HERRMANN, Jan-Phillip; IMORT, Sebastian; TROJANOWSKI, Christoph; DEUTER, Andreas: *Requirements Elicitation for an Assistance System for Complexity Management in Product Development of SMEs during COVID-19: A Case Study*. In: *Computers* 10 (2021), Nr. 11, S. 149. URL <https://www.mdpi.com/2073-431x/10/11/149>
- Idicula 1995 IDICULA, John: *Planning for concurrent engineering*, 1995
- Imort et al. 2022 IMORT, Sebastian; PANKRATH, Carolin; HERRMANN, Jan-Phillip; DEUTER, Andreas: *Verwaltungsschale: Integration einer Design Structure Matrix (DSM) in die VWS*. In: *atp Magazin* 63 (2022), 11-12
- Jacobs et al. 2022 JACOBS, Georg; KONRAD, Christian; BERROTH, Joerg; ZERWAS, Thilo; HÖPFNER, Gregor; SPÜTZ, Kathrin: *Function-Oriented Model-Based Product Development*. In: *Design Methodology for Future Products*: Springer, Cham, 2022, S. 243–263
- Jacomy et al. 2014 JACOMY, Mathieu; VENTURINI, Tommaso; HEYMANN, Sebastien; BASTIAN, Mathieu: *ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the Gephi software*. In: *PLOS ONE* 9 (2014), Nr. 6, e98679. URL <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098679>

- Jarratt et al. 2004 JARRATT, Timothy; KELLER, René; NAIR, Seena; ECKERT, Claudia; CLARKSON, P. John: Visualization Techniques for Product Change and Product Modelling in Complex Design. In: Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, S. 388–391
- Jünger and Mutzel 2004 JÜNGER, Michael (Hrsg.); MUTZEL, Petra (Hrsg.): *Graph Drawing Software*. 1., 2004. Berlin : Springer Berlin, 2013 (Mathematics and Visualization)
- Keller et al. 2006 KELLER, René; ECKERT, Claudia M.; CLARKSON, P. John: *Matrices or Node-Link Diagrams: Which Visual Representation is Better for Visualising Connectivity Models?* In: *Information Visualization* 5 (2006), Nr. 1, S. 62–76
- Küstner 2020 KÜSTNER, Christof: *Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung*, 2020
- Latos et al. 2018 LATOS, Benedikt Andrew; HARLACHER, Markus; BURGERT, Florens; NITSCH, Verena; PRZYBYSZ, Philipp; NIEWÖHNER, Susanne Mütze: *Complexity Drivers in Digitalized Work Systems: Implications for Cooperative Forms of Work*. In: *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* 3 (2018), Nr. 5, S. 171–185
- Lloyd 1982 LLOYD, S.: *Least squares quantization in PCM*. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 28 (1982), Nr. 2, S. 129–137
- MacQueen 1967 MACQUEEN, J.: *Classification and analysis of multivariate observations* : University of California Press, 1967
- Cui 2020 CUI, Mengyao: *Introduction to the K-Means Clustering Algorithm Based on the Elbow Method*. In: *Accounting, Auditing and Finance* 1 (2020), Nr. 1, S. 5–8. URL <https://www.clausiuspress.com/article/592.html>
- Page et al. 1999 PAGE, Lawrence; BRIN, Sergey; MOTWANI, Rajeev; WINOGRAD, Terry: *The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web*. 1999
- Peterson 2014 PETERSON, Troy: *Understanding Systems through Graph Theory and Dynamic Visualization*, 2014
- Plattform Industrie 4.0 2023 PLATTFORM INDUSTRIE 4.0: *Details of the Asset Administration Shell: Specification Part 1–The Exchange of Information between Partners in the Value Chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02)* 2023
- Purchase 1997 PURCHASE, Helen: Which aesthetic has the greatest effect on human understanding? In: Springer, Berlin, Heidelberg, 1997, S. 248–261
- Scikit-learn 2011 *Scikit-learn: Machine learning in Python*, 2011
- Sharman and Yassine 2004 SHARMAN, David M.; YASSINE, Ali A.: *Characterizing complex product architectures*. In: *Systems Engineering* 7 (2004), Nr. 1, S. 35–60
- Unity Technologies 2013 Unity Technologies, 2023. <https://unity.com/> (accessed 20.01.2023)

Datengetriebene Optimierung des Produktportfolios für hochvariante Endprodukte der Automobilindustrie

Data-Driven Optimization of the Product Portfolio for Highly Variant End Products in the Automotive Industry

Anastasia Marbach¹, Florian Tichla¹, Thorsten Schmidt², Frank Mantwill²

¹Hamburg Analytics EDS GmbH, 22089 Hamburg

{anastasia.marbach, florian.tichla}@hamburg-analytics.de

²Helmut-Schmidt-Universität, Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung, Hamburg

{thorsten.schmidt, frank.mantwill}@hsu-hh.de

Abstract (deutsch):

Diese Ausarbeitung systematisiert die Nutzung bestehender Informationen aus der Produktdokumentation für die Optimierung des Produktportfolios variantenreicher Produkte. Da in der Automobilindustrie nach dem Generationsprinzip konstruiert wird, lassen sich viele Informationen von einem Vorgängerfahrzeug auf ein neues Projekt übertragen. Somit können Annahmen basierend auf der Produktdokumentation eines Vorgängerfahrzeugs ausgewertet werden sowie systematisch Vorschläge zur Optimierung des Angebotsprogramms ermittelt werden. Das Ziel der Optimierung ist die Reduktion der internen Komplexität unter der Nebenbedingung, dass nur besonders wenig nachgefragte Endprodukte gestrichen werden. Hierfür wird ein Vorgehen entwickelt, welches in Form von Was-wäre-wenn Analysen zur Überprüfung von Annahmen bezüglich Produktvarianten fungiert. Den besonderen Erfordernissen, die aus der Variantenbeschreibung in der deutschen Automobilindustrie resultieren, wird mit einer Modellierung als Erfüllbarkeitsproblem und dem Einsatz eines SAT-Solvers begegnet. Weiterhin werden Methoden vorgestellt, um automatisiert Vorschläge zur Optimierung des Produktportfolios zu ermitteln.

Keywords (deutsch):

Produktdokumentation, Variantenvielfalt, Optimierung des Produktportfolios, Automobilindustrie, Erfüllbarkeitsproblem, SAT-Solver

Abstract (english):

This paper systematizes the usage of existing information from the product documentation for the optimization of the product portfolio for variant-rich products. Since design in the automotive industry is based on the generation principle, a lot of information from a predecessor vehicle can be transferred to a new project. Thus, assumptions based on the product documentation of a predecessor vehicle can be evaluated and suggestions for optimizing the product portfolio can be systematically determined. The aim of the optimization is the reduction of the internal complexity under the constraint that only those end-product variants are removed which were not in demand at all or which were in particularly low demand. For this purpose, a procedure is developed which uses "what-if" analyses to check assumptions regarding product variants. The special requirements resulting from the description of variants in the German automotive industry are met by modeling them as a satisfiability problem and by using a SAT solver. Furthermore, methods are presented to automatically determine proposals for the optimization of the product portfolio.

Keywords (english):

Product documentation, product variance, optimization of the product portfolio, automotive industry, satisfiability problem, SAT solver

1 Einleitung

Automobilhersteller bieten eine sehr breite Palette an Produktvarianten an (Stich 2007). Diese externe Vielfalt birgt allerdings nicht nur Chancen, sondern wirkt sich auch in einer erhöhten Komplexität (interne Vielfalt) und somit in erhöhten Kosten aus (Meffert 2000). Der Anteil an Gesamtkosten, der durch produktvarianteninduzierte Komplexität verursacht wird, wird von Caesar (1991) am Beispiel von Automobilherstellern auf 15-20% beziffert. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Anteil heutzutage bei genauerer Betrachtung noch deutlich höher ausfällt (Krause und Gebhardt 2018). Weiterhin wird angenommen, dass es einen Punkt gibt, ab dem bei Hinzunahme einer Variante die Zunahme von Nutzen (Herlyn 2012), bzw. Erlös (Krause und Gebhardt 2018) geringer ausfällt als die Kosten, die dadurch entstehen. Demnach kann die Hinzunahme einer zusätzlichen Produktvariante bei einer bereits bestehenden Produktvielfalt einen negativen wirtschaftlichen Effekt nach sich ziehen. Daher sollte bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung das Ziel verfolgt werden, Produktvarianten gezielt und bedarfsgerecht zu entwickeln. Weiterhin wird in der Automobilindustrie nach dem Generationsprinzip konstruiert (Albers et al. 2015), aufgrund dessen viele Informationen aus Vorgängerprojekten auf neue Entwicklungsprojekte übertragen werden können. Auf diesem Wege können Annahmen für Folgeprojekte anhand einer Analyse der vorhandenen Produktdaten von Vorgängerfahrzeugen getestet werden. Die Verfügbarkeit, Struktur und Umfang der Daten machen eine datengetriebene Unterstützung möglich und erlauben tiefergehende Analysen.

Diese Ausarbeitung leistet ihren Beitrag in der Identifikation von angebotenen Eigenschaftskombinationen, welche die interne Varianz treiben und einen hohen Anteil zur Komplexitätskostensteigerung beitragen und zugleich kaum oder gar nicht nachgefragt wurden.

2 Problemstellung, Zielsetzung und Struktur

Die Produktgenerationsentwicklung beschreibt die Entwicklung von Produkten, welche über mehrere Generationen angeboten werden. Diese basiert auf zwei grundlegenden Hypothesen. Zum einen werden Produkte auf Grundlage eines Referenzsystems entwickelt, dessen Elemente aus bestehenden oder bereits geplanten sozio-technischen Systemen stammen. Zum anderen werden die Systemelemente auf Grundlage von Referenzsystemelementen durch die Aktivitäten Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation entwickelt. Dabei kann das Referenzsystem aus Wettbewerbs- oder Vorgängerprodukten bestehen (Albers et al. 2015).

In diesem Sinne, wird in diesem Beitrag das Problem adressiert, Produktdaten aus Vorgängerprojekten zu untersuchen, um Potentiale zur Optimierung der angebotenen Varianten des Folgeprojektes zu ermitteln. Das Ziel dieser Ausarbeitung ist es, Informationen aus der Produktdokumentation vor dem Hintergrund der Variantenoptimierung zu analysieren. Im ersten Schritt sollen bestehende Annahmen beteiligter Projektmitglieder zur Optimierung des Produktportfolios datengetrieben überprüft werden können. Im zweiten Schritt soll ein Vorgehen entwickelt werden, bei dem Vorschläge zur Optimierung automatisiert berechnet werden.

Für eine Reduktion der Angebotsvielfalt sollten die Produktvarianten analysiert werden, die einen hohen Beitrag zur Komplexitätskostensteigerung geleistet haben (Krause und Gebhardt 2018). Daher soll weiterhin das Ziel verfolgt werden, die innere Varianz zu reduzieren und hingegen die äußere Varianz nur dort zu beschneiden, wo in der Vergangenheit keine oder nur eine sehr geringe Nachfrage von Kunden bestand. Aus dieser Problemstellung lassen sich drei Forschungsziele und eine übergeordnete Forschungsfrage ableiten:

1. Prozessbeschreibung: Beschreibung des Prozesses der Variantenabbildung beispielhaft an der offenen Variantenkonfiguration der deutschen Automobilindustrie und den dort zum Einsatz kommenden Dokumenten. Herausarbeiten der Unterstützungsmöglichkeiten der Variantendefinition im Entwicklungsprozess.

2. Modellbildung: Modellierung des Zusammenhangs und Auswahl geeigneter Methoden zur datengetriebenen Varianzreduktion. Ziel ist es, den Varianzraum nur dort zu reduzieren, wo Treiber der internen Varianz liegen und somit einen hohen Anteil zur Komplexitätskostensteigerung beitragen und zugleich wenig nachgefragt wurden.
3. Toolunterstützung: Einsatz von datengetriebenen Methoden zur gezielten Optimierung des Produktportfolios als Werkzeug einer verbesserten Generationsentwicklung. Nutzung einer digitalen Assistenz als Unterstützung eines erfahrungsbasierten Entwicklungsprozesses.

Aus diesen Zielen wird die folgende Forschungsfrage abgeleitet: Wie können die Informationen, die in der Ergebnisdokumentation der Produktentwicklung enthalten sind, systematisch analysiert und aufbereitet werden, um als Entscheidungsunterstützung bei der Optimierung des Produktportfolios zu fungieren?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird das nachfolgend beschriebene Vorgehen gewählt. Zunächst wird der aktuelle Stand der Forschung zur Abbildung von individuell konfigurierbaren Produkten am Beispiel der deutschen Automobilindustrie beschrieben und die zugehörige Ergebnisdokumentation der Produktentwicklung dargestellt. Außerdem wird der Einsatz von SAT-Solvern und die Grundlagen der Assoziationsanalyse vorgestellt. Anschließend werden das erarbeitete Konzept zur datengetriebenen Optimierung des Produktportfolios sowie die verwendeten Dokumente im Detail beschrieben. Daraufhin wird das Vorgehen in Form einer prototypischen Umsetzung bei einem Industriepartner von Experten erprobt und der Umgang mit dem Tool qualitativ beobachtet. Abschließend wird das Konzept anhand von erzielten Ergebnissen validiert, zusammengefasst und in einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf eingegangen.

3 Stand der Forschung

3.1 Abbildung variantenreicher Produkte am Beispiel der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie werden Fahrzeuge anhand ihrer Merkmale und Merkmalswerte beschrieben, welche der Kunde aus einem Merkmalskatalog wählen kann. Die Kombination von Merkmalswerten unterliegt Restriktionen (Regelwerk) aus technischen, vertrieblichen oder gesetzlichen Gründen. Die Dokumentation dieser Zusammenhänge geschieht dabei in der sogenannten Merkmalsebene (von Eisenhart Rothe 2002). Die Merkmalswerte werden wiederum, über Boolesche Operatoren verknüpft, als Einbaubedingungen für Bauteile und Baugruppen verwendet. Auf diese Weise gelingt es, alle Endproduktvarianten einer Modellfamilie in einer Stückliste zu erfassen. Da für Produktvarianten ein hohes Maß an Überschneidungen in den zu dokumentierenden Informationen existiert, entstünde ein ungerechtfertigter Aufwand bei der Erzeugung und Pflege einzelner Stücklisten für jede Produktvariante (von Eisenhart Rothe 2002).

Insbesondere für variantenreiche Serienerzeugnisse (z.B. in der Automobilindustrie) hat sich diese Art der Produktdokumentation durchgesetzt und wird als regelbasierte Komplexstückliste bezeichnet (Herlyn 1990). In diesem Zusammenhang ordnet Herlyn (1990) die Stückliste der „Technikebene“ zu. Damit können die Merkmalsebene und die Technikebene der Produktdokumentation als die für diese Ausarbeitung relevanten Informationslieferanten dienen.

3.2 Einsatz SAT-Solver in der Automobilindustrie

Auf der Merkmalsebene definierte Fahrzeugkonfigurationen müssen im Rahmen einer Baubarkeitsprüfung auf Widersprüche zum Regelwerk untersucht werden. Dazu kann die Konfiguration sowie das Regelwerk in Form Boolescher Ausdrücke in ein aussagelogisches Erfüllbarkeitsproblem (SAT-Problem) überführt werden (Sinz 1997). Das Boolesche Erfüllbarkeitsproblem ist ein fundamentales, NP-vollständiges Problem aus dem Bereich der Informatik. Bei einem Booleschen Erfüllbarkeitsproblem gilt es die Frage zu beantworten, ob eine gegebene Boolesche Formel erfüllbar ist. Die Boolesche Formel gilt als erfüllbar, wenn (mindestens)

eine gültige Variablenbelegung gefunden wird, bei der die Boolesche Formel den Wahrheitswert 1 annimmt. Algorithmen, die das Lösen von SAT-Problemen zum Ziel haben, werden als SAT-Solver bezeichnet. Für die dahinterliegenden Methoden und Algorithmen wird an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen (Marques-Silva und Sakallah 2003; Davis et al. 1962). Um verfügbare SAT-Solver anwenden zu können, muss die Boolesche Formel in der Konjunktiven Normalform (KNF) vorliegen. Für den Anwendungsfall in der Automobilindustrie müssen daher die bekannten Informationen aus dem Regelwerk und die zu prüfende Konfiguration in die KNF übersetzt werden (Sinz 1997). Es existieren bereits einige Arbeiten, die sich mit dem Einsatz von SAT-Solvern im Umfeld von variantenreichen Produkten der Automobilindustrie beschäftigen. Dabei wurden insbesondere Verfahren zur Identifikation von Inkonsistenzen und Validierung von Regelwerk und regelbasierter Komplexstückliste beschrieben (Sinz 1997, Zengler 2014, Braun et al. 2018). Weiterhin wurden Methoden zur Unterstützung des Konfigurationsprozesses, beispielsweise durch effiziente Auflösung von Konflikten, beschrieben (Walter 2018).

3.3 Assoziationsanalyse

Die Assoziationsanalyse ist eine datengetriebene Methode zur Suche von Abhängigkeiten auf der Basis von Korrelationen. Dazu wird eine Datenbasis auf gemeinsam vorkommende Elemente untersucht und daraus Regeln der Form *Wenn(X) → Dann(Y)* abgeleitet (Zhang und Zhang 2002). Die Assoziationsanalyse wird häufig auf Transaktionsdaten in Form einer „Warenkorbanalyse“ oder des Direktmarketings eingesetzt. Ein häufig verwendetes Framework der Assoziationsanalyse stammt von Agrawal et al., welche zur Beschreibung der Abhängigkeiten die Berechnung von zwei Kennzahlen vorschlagen (Agrawal et al. 1993). Die Kennzahl „Support“ beschreibt die Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens, die Kennzahl „Confidence“ die Stärke des Zusammenhangs zweier Elemente. Die Gleichungen zur Berechnung der Kennzahlen sind nachfolgend abgebildet (1) und (2).

$$\text{Gleichung Support: } \text{supp}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Anzahl an Transaktionen mit } X \cup Y}{\text{Anzahl an Transaktionen}} = \text{Support}(X \cup Y) \quad (1)$$

$$\text{Gleichung Confidence: } \text{conf}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Anzahl an Transaktionen mit } X \cup Y}{\text{Anzahl an Transaktionen mit } X} = \frac{\text{Support}(X \cup Y)}{\text{Support}(X)} \quad (2)$$

Der Anwender legt Schwellenwerte für Support (supp_{min}) und für Confidence (conf_{min}) fest. Wenn diese überschritten werden, gilt der untersuchte Zusammenhang als signifikant (Agrawal et al. 1993). Als bestehender und effizient umgesetzter Algorithmus der Assoziationsanalyse gilt unter anderem der Apriori-Algorithmus (Zhang und Zhang 2002).

Als Datenbasis werden vergangene Transaktionen ausgewertet. Elemente einer solchen Transaktion sind dabei im klassischen Sinne „Items“, eine Übertragung auf eine Produktbeschreibung über Merkmale und Merkmalswerte sowie die Restriktionen des Regelwerks der deutschen Automobilindustrie ist allerdings ebenfalls möglich (Schmidt et al. 2022). Einen Ansatz zur Berücksichtigung von Nebenbedingungen in Form von Booleschen Ausdrücken schlägt Adamo (2001) in seinem Beitrag zu Constraint-based Rule Mining vor.

4 Konzept einer datengetriebenen Optimierung des Produktportfolios

4.1 Detailierung der Optimierungsrichtung

Im Rahmen der Optimierung des Produktportfolios soll die interne Varianz reduziert werden, die Komplexitätskosten verursacht. Der Kostenbeitrag einer zusätzlichen Produktvariante kann nicht direkt beziffert werden, da er sich häufig weniger in den Herstellkosten als in den Gemeinkosten niederschlägt (Krause und Gebhardt 2018). So können in der Beschaffung mehr Bauteilvarianten und somit niedrigere Stückzahlen zu höheren Einkaufspreisen führen. Gleichzeitig werden größere Lager

und aufwändigere Logistikplanung und -kontrolle notwendig, um einige Beispiele zu nennen. Daher konzentriert sich diese Ausarbeitung auf die Reduzierung der Anzahl von notwendigen Bauteilvarianten. Diese eignet sich als Indikator, da sie einen Beitrag zur internen Varianz leistet.

Als weiteres Ziel sollen nur die Produktvarianten aus dem Programm genommen werden, die wenig oder gar nicht nachgefragt wurden. Eine Fahrzeugmodellreihe kann durch die Variantenkonfiguration und sich daraus ergebende Kombinatorik sehr viele Produktvarianten aufweisen. Ein Beispiel zur Größenordnung findet sich bei Zagel (2006) mit 10^{27} möglichen Produktvarianten bei einer Auswertung einer Modellreihe von Daimler. Daher ist die Betrachtung einzelner Produktvarianten an dieser Stelle nicht sinnvoll. Stattdessen werden Merkmalswerte und Kombinationen aus Merkmalswerten betrachtet, zu denen wiederum berechnet wird, in wie vielen Fahrzeugaufträgen diese vorgekommen sind. Die Optimierungsrichtung soll also die Reduktion der Teilevarianz sein. Als Nebenbedingung soll ein Absatzverlust vermieden werden, indem die untersuchten Merkmalswerte auf das Vorkommen in bestehenden Fahrzeugaufträgen geprüft werden.

Bei der Generierung von Optimierungsvorschlägen ist zu beachten, dass es einen Unterschied zwischen dem Entfall zweier (oder mehrerer) Merkmalswerte und dem Entfall der Kombination aus diesen Merkmalswerten gibt. Als sprachliche Differenzierung hat sich „und“ für den Entfall beider Merkmalswerte und „mit“ für den Entfall der Kombination beider Merkmalswerte durchgesetzt: „Entfall von Navigationssystem und Schiebedach“ kann gut von „Entfall des Navigationssystems mit Schiebedach“ unterschieden werden. Als formalisierte Einträge in einer zu testenden Booleschen Funktion f_B lässt sich der Sachverhalt wie folgt darstellen:

Merkmalswerte a und b sollen entfallen: $f_B = \dots \wedge \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge \dots$

Merkmalswert a mit b soll entfallen: $f_B = \dots \wedge \overline{a \wedge b} \wedge \dots$

4.2 Darstellung der Dokumente, aus denen die benötigten Informationen gewonnen werden können

Um die entsprechenden Optimierungsvorschläge datenseitig zu ermitteln, ist es notwendig, einen Einblick in die Beschaffenheit der entsprechenden Produktdaten zu geben. Für die hier vorgestellten Aspekte sind folgende Dokumentarten „Merkmalsliste“, „Regelwerk“, „Stückliste“ und „Fahrzeugaufträge“ relevant. Die Beschreibung der Merkmalsebene mit ihren Merkmalen und Restriktionen liefert den Input für die Modellierung des Varianzschemas eines Fahrzeugmodells. Hierbei spannen die Merkmale den Varianzraum auf, die Merkmalswerte quanteln die einzelnen Dimensionen des Varianzraums und die Restriktionen liefern Aussagen über die Zulässigkeit von Merkmalskombinationen. Diese Restriktionen schränken den Varianzraum entsprechend ein. Folgendes Beispiel für eine Modellierung der Merkmalsebene aus der Automobilindustrie, dargestellt in Tabelle 1 und 2, findet sich bei von Eisenhart Rothe (2002):

Tabelle 1: Ausschnitt der Merkmalsliste

Merkmal	Wert	Bezeichnung
TRW		Trennwand
	3CA	ohne Trennwand
	3CX	Netztrennwand
LBH		Ladeboden
	3GA	ohne Ladeboden
	3GN	variabler Ladeboden

Tabelle 2: Ausschnitt des Regelwerks

Restriktion	Regeltext
K8B Z 3CA	Stufenheck zwingt ohne Trennwand
3GN Z K8D/K8M	Variabler Ladeboden zwingt Golf Variant oder Bora Variant
3GN Z 1X0	Variabler Ladeboden zwingt Frontantrieb

In einem aktuellen Fahrzeugprojekt existieren 1345 Merkmalswerte in 186 Merkmalen. Zwischen den Merkmalswerten bestehen 9466 Restriktionen in Form von Zwängen und Verboten. Die technische Stückliste verknüpft Teilenummern mit Merkmalswerten. Diese Verknüpfungen (Teilegültigkeiten)

sind Boolesche Funktionen, die Merkmalswerte als Variablen nutzen. Eine Konfiguration aus Merkmalswerten kann zusammen mit der Teilegültigkeit auf Erfüllbarkeit geprüft werden. Ist die Kombination erfüllbar ist das Teil für die Produktkonfiguration notwendig, sonst nicht. Ebenfalls bei von Eisenhart Rothe (2002) findet sich ein Beispiel für die Verknüpfung zwischen den Teilenummern an der Verwendungsstelle „Laderaumverkleidung links“ und den Merkmalswerten, dargestellt in Tabelle 3.

Tabelle 3: Ausschnitt einer Stückliste

Teilenummer	Benennung	Teilegültigkeit	Menge
1J0.343.132.A	ZSB Laderaumverkleidung links	3CA+1X0+3GA+7B2+K8D/K8M	1
1J0.343.132.B	ZSB Laderaumverkleidung links	3CA+1X0+3GN+7B2+K8D/K8M	1
1J0.343.132.J	ZSB Laderaumverkleidung links	3CX+1X0+3GA+7B0+K8D	1
1J0.343.132.K	ZSB Laderaumverkleidung links	3CX+1X0+3GN+7B0+K8D	1

Ähnliche Beispiele für diese Systematik in der Komplexstückliste finden sich auch bei Herlyn (1990) und Stich (2007). Stich (2007) spricht in diesem Zusammenhang von Coderegeln.

Als weiteres relevantes Dokument ist die Liste der verkauften Produktvarianten von einem Fahrzeugmodell (Fahrzeugaufträge) identifiziert worden. Sie liefert den Input zur Berechnung der Verkaufszahlen von Merkmalen und Merkmalskombinationen. In dieser Liste ist ein verkauftes Endprodukt über die Kombination von Merkmalswerten, die zur Beschreibung des Endprodukts dienen, beschrieben. Diese Liste ist nach folgendem Schema in Tabelle 4 aufgebaut.

Tabelle 4: Schematische Darstellung von Fahrzeugaufträgen

Fahrgestellnummer	Fertigungsdatum	Ausstattung
96546513647845	02.01.2021	3CA+1X0+3GA+7B2+K8M+...
79849814651645	02.01.2021	3CA+1X0+3GN+7B2+K8D+...
51659851651651	03.01.2021	3CA+1X1+3GA+7B2+K8M+...

Zur Verbesserung der Lesbarkeit und zum Zwecke des Informationsschutzes werden nachfolgend Merkmale mit MA, MB, ... und Merkmalswerte mit MA1, MA2, ... abgekürzt. Hierbei gehören die Merkmalswerte MA1 und MA2 zum Merkmal MA.

4.3 Vorgehen

Aus den vorliegenden Daten sollen nun mit Hilfe geeigneter Methoden Merkmalswerte und Kombinationen aus Merkmalswerten ermittelt werden, die möglichst selten in den Fahrzeugaufträgen des Vorgängermodells vorkommen und für die gleichzeitig viele Bauteile in der Stückliste exklusiv vorgehalten werden. Der folgende Abschnitt ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden Einzelprüfungen von Annahmen und Anfragen aus Fachbereichen durchgeführt. Im zweiten Abschnitt soll der Rechner dazu befähigt werden, automatisierte Prüfungen zur Ermittlung von Vorschlägen zur Reduktion der Variantenvielfalt durchzuführen. In diesem Zusammenhang wird die Eignung der Assoziationsanalyse untersucht sowie ein an die Rucksackmethode (Kellerer et al. 2004) angelehntes Vorgehen betrachtet.

4.3.1 Einzelprüfung

An dieser Stelle wird beschrieben, wie Was-wäre-wenn Analysen im Rahmen von Einzelprüfungen von Annahmen durchgeführt werden können. Auf diese Weise wird eine Informationsgrundlage für Entscheidungen bezüglich Produktvarianten geschaffen. Abbildung 1 stellt das Verfahren schematisch dar.

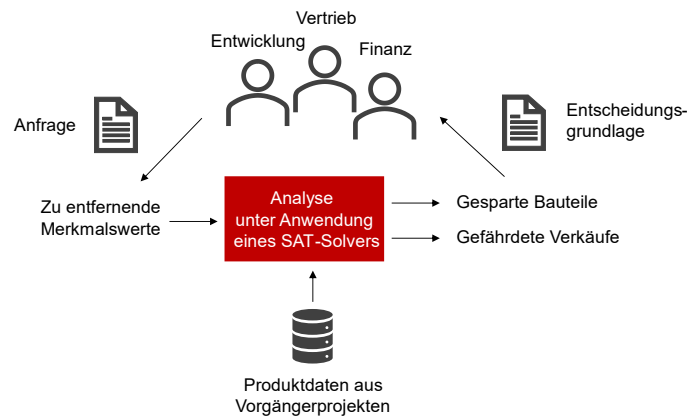


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prozesses zur Einzelprüfung

Auf diese Weise lassen sich anhand der Daten aus der Produktdokumentation beispielsweise folgende Fragestellungen beantworten: „Welche Teile werden nicht mehr benötigt, wenn die Merkmalswerte MA1 und MB1 nicht mehr in Kombination angeboten werden?“ Weiterhin lässt sich auch berechnen, welche weiteren Merkmalswerte nicht mehr angeboten werden können, wenn der Merkmalswert MA2 nicht mehr angeboten werden soll. Als gefährdete Verkäufe werden die Fahrzeuge angesehen, die die untersuchten zu entfernenden Merkmalswerte enthielten. Ob es tatsächlich zu Absatzeinbußen kommen würde oder Kunden lediglich eine andere Konfiguration dieses Fahrzeuges wählen würden, lässt sich anhand der beschriebenen Produktdaten nicht beurteilen. Für die Durchführung der Analyse ist die Abbildung der Fragestellung in einem aussage-logischen Modell notwendig. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

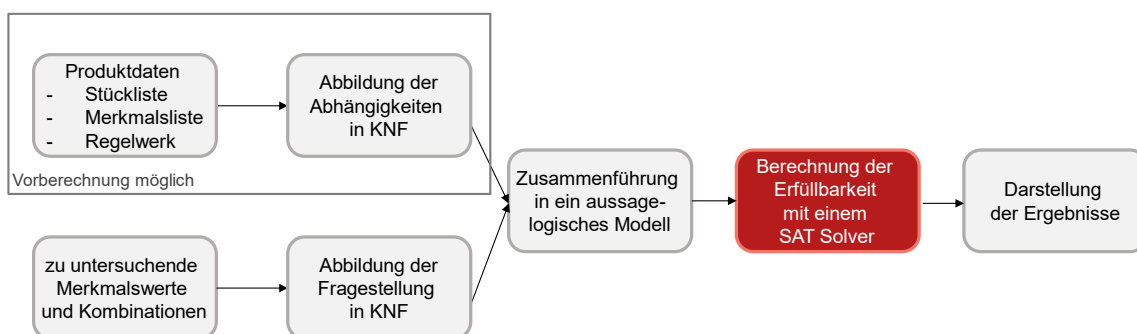


Abbildung 2: Modellierung als aussage-logisches Modell

Im ersten Schritt werden die Stückliste und das Regelwerk in die KNF überführt, da die meisten SAT-Solver dieses Format erwarten (Marques-Silva 2008). Ebenfalls muss die auf Merkmalswerte bezogene Anfrage in KNF überführt werden. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenführung zu einer Booleschen Formel, die mittels SAT-Solver gelöst wird.

4.3.2 Automatisierte Prüfungen

Um den Rechner zur Ermittlung von selten nachgefragten Merkmalswerten und Kombinationen aus Merkmalswerten zu befähigen, muss das oben beschriebene Vorgehen angepasst werden. Die zu entfernenden Merkmalswerte sollen anders als bisher durch geeignete Methoden automatisiert ermittelt werden. Dazu müssen Merkmalswerte und ihre Kombinationen identifiziert werden, die selten nachgefragt wurden. Die anschließende Analyse mittels SAT-Solver bleibt bestehen. In der Abbildung 3 ist der neue Prozess schematisch dargestellt.

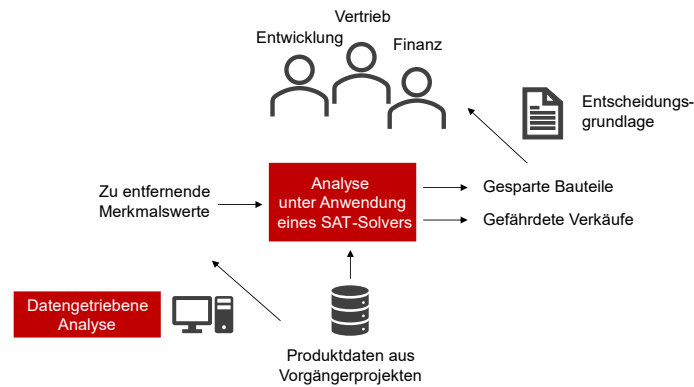


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Prozesses der automatisierten Prüfungen

Anwendung der Assoziationsanalyse

Zur Überprüfung der Überlegungen und Sicherung der Erkenntnisse über die Assoziationsanalyse wird diese in Form des Apriori-Algorithmus angewendet. Der verwendete Apriori-Algorithmus benötigt als Input die Datenbasis der Transaktionen sowie vom Benutzer spezifizierte Schwellenwerte für Support ($supp_{min}$) und Confidence ($conf_{min}$).

Die Ausarbeitung beschränkt sich auf die paarweise Betrachtung von Merkmalswerten (sog. 2-Tupel). Zunächst werden die genannten Kennzahlen der Assoziationsanalyse anhand der Daten zu den Fahrzeugaufträgen berechnet. Ein Zusammenhang gilt dann als signifikant, wenn er sowohl $supp_{min}$ als auch $conf_{min}$ übersteigt. Anschließend wird das Ergebnis auf gefundene Regeln des verwendeten Regelwerks sowie unerlaubte Kombinationen mithilfe eines SAT-Solvers untersucht und bereinigt. Als Plausibilitätscheck kann das Ergebnis mit dem Regelwerk verglichen werden, welches zur Konfiguration der untersuchten Fahrzeuge genutzt wurde. Erwartungsgemäß sind die verwendeten Regeln eine Teilmenge der gefundenen Zusammenhänge mit hohem Support und Confidence.

Bei der Nutzung bestehender Ansätze ist darauf zu achten, dass die etablierten Ansätze darauf abzielen, die am häufigsten gemeinsam konfigurierten Merkmalswerte zu finden. Für das eingangs formulierte Ziel der Optimierung des Produktportfolios durch Sperrung von Merkmalskombinationen, welche selten verkauft wurden, ist die Aussage umzudrehen und in eine Negation umzuwandeln. Eine solche Betrachtung der negierten Assoziationsanalyse (negative Association Rule Mining) ist komplex und rechenintensiv, da sie die folgenden vier Fälle beinhaltet: $X \rightarrow Y: supp(X, Y)$; $X \rightarrow \bar{Y}: supp(X, \bar{Y})$; $\bar{X} \rightarrow Y: supp(\bar{X}, Y)$; $\bar{X} \rightarrow \bar{Y}: supp(\bar{X}, \bar{Y})$ (Antonie et al. 2014). Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Ausarbeitung nur einer der vier Fälle betrachtet, welcher sich aus den berechneten Größen des verwendeten Apriori-Algorithmus ableiten lässt. Die selten vorkommenden Kombinationen von Merkmalswerten berechnen sich aus einer Negation der Gleichung 1. Die Gleichung für die Umwandlung der Negation ist im Folgenden dargestellt (3) (Duggirala und Narayana 2013; Antonie et al. 2014).

$$\text{Gleichung Negation: } \quad supp(X \rightarrow \bar{Y}) = supp(X) - supp(X \cup Y) \quad (3)$$

Abschließend wird die Anzahl der potenziell „gesparten Teile“ durch die Modellierung als aussagelogisches Modell, wie es bereits im vorangegangenen Kapitel Einzelprüfung vorgestellt worden ist, berechnet.

Anwendung des Vorgehens angelehnt an die Rucksackmethode

Das beschriebene Vorgehen zur Anwendung der Assoziationsanalyse sucht im gesamten Varianzraum nach selten verkauften Merkmalskombinationen, um erst im Anschluss zu prüfen, ob durch den Wegfall der Merkmalskombinationen auch Bauteile eingespart werden würden. Die Teilegültigkeiten in der Stückliste liefern die Kombinationen von Merkmalswerten, für die Teile vorgehalten werden. Daher wird alternativ zur Assoziationsanalyse ein weiteres Vorgehen beschrieben, um

datengetrieben nach potenziell zu streichenden Kombinationen von Merkmalswerten zu suchen, für die exklusive Teile vorgehalten werden. Hierbei wird der Suchraum auf die Teilegültigkeiten beschränkt, da die hier enthaltenen Kombinationen auf jeden Fall Auswirkungen auf die Teilevielfalt haben. Die Problemstellung ist dabei ähnlich geartet wie das Rucksackproblem. Die Rucksackkapazität ist hier durch eine wählbare Schranke, bis zu welcher ein potenzieller Absatzverlust akzeptiert wird, repräsentiert. Die Optimierungsrichtung ist, wie oben beschrieben, eine möglichst hohe Einsparung von Bauteilvarianten durch das Streichen von Merkmalswerten und Kombinationen von Merkmalswerten.

Zunächst werden dazu die Einbauraten jedes Bauteils über die Teilegültigkeit in der Stückliste und das Vorkommen dieser Merkmalswerte in Fahrzeugaufträgen berechnet. Zu beachten ist hierbei, dass gleiche Bauteile potenziell an mehreren Stellen in der Stückliste vorkommen können und an den jeweiligen Verwendungsstellen unterschiedliche Teilegültigkeiten und damit auch unterschiedliche Einbauraten aufweisen können. Die Einbauraten der einzelnen Verwendungsstellen dürfen jedoch nicht einfach aufsummiert werden, da diese Schnittmengen zueinander aufweisen können. Daher ist eine Auswertung der Teilegültigkeiten aller Verwendungsstellen eines Bauteils und deren Schnittmengen bei der Ermittlung der Einbauraten zu berücksichtigen. Es kann demnach ein Zusammenlegen von Teilegültigkeiten notwendig werden, damit ein über unterschiedliche Teilegültigkeiten gesteuertes Bauteil entfallen kann. Die auf diese Weise gefundenen Merkmalswerte und Kombinationen aus Merkmalswerten können wiederum durch eine Modellierung zusammen mit der Stückliste und dem Regelwerk als aussagelogisches Problem bezüglich Bauteilentfall überprüft werden. Dabei kann sich für den Entfall einer Merkmalskombination eine größere Anzahl an zu entfallenden Bauteilen ergeben als zuvor ersichtlich war. Die vorher ermittelten Zahlen zu gefährdeten Verkäufen können sich dabei nicht ändern. Das Ergebnis ist eine Liste von potenziell zu streichenden Merkmalswerten und Kombinationen und der entsprechenden Bauteile, die durch die Streichung nicht mehr benötigt werden. Um hier eine optimale Lösung gemäß dem Rucksackproblem zu erhalten, müssen die jeweils gefunden Merkmalswerte und Kombinationen aus Merkmalswerten wiederum in Kombination überprüft werden, da der Nutzen in Form von Teileeinsparung und das Gewicht, welches hier die gefährdeten Verkäufe darstellt, nicht statisch sind. Da sowohl das SAT-Problem als auch das Rucksackproblem NP-vollständig sind, stößt man dabei schnell an die Grenze der Berechenbarkeit und muss entsprechende Approximationsalgorithmen anwenden. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge ist an dieser Stelle abzuwägen, ob sich hier tatsächlich das eine optimale Ergebnis als Entscheidungsgrundlage eignet oder eine differenziertere Betrachtung der einzelnen Ergebnisse zur höheren Transparenz führt. Ein bekannter approximativer Ansatz zur Lösung des Rucksackproblems ist der Greedy-Algorithmus. Der dort berechnete Quotient aus Wertbeitrag und Gewicht, kann in unserem Anwendungsfall durch die gesparten Teile und die gefährdeten Verkäufe ermittelt werden und zur Sortierung der Ergebnisse verwendet werden.

5 Konzeptvalidierung und Ergebnisse

Die datengetriebenen Was-wäre-wenn Analysen ermöglichen Auswirkungen von Veränderungen der angebotenen Produktvarianz zu untersuchen. Ein entsprechendes Tool zur Einzelprüfung sowie zur automatisierten Prüfung wurde mit einem Industriepartner prototypisch entwickelt und validiert. Es hat sich gezeigt, dass dieses Vorgehen Transparenz schafft und die Möglichkeit einer fundierten Entscheidungsunterstützung bietet. Dabei leisten sowohl die Einzelprüfungen als auch die automatisierten Prüfungen ihren Beitrag. Das Vorgehen kann sowohl zur Angebotsplanung als auch zur Angebotsbereinigung dienen. Der Rechneinsatz ermittelt systematisch Ergebnisse, wo zuvor Näherungen und Schätzungen notwendig waren. Weiterhin hat sich beim Einsatz des Tools gezeigt, dass neben den modellierten Zusammenhängen weitere Aspekte vorliegen, die für eine Optimierung des Produktportfolios zu berücksichtigen sind.

Als datengetriebene Methoden zur automatisierten Berechnung von Vorschlägen zur Streichung von Merkmalen und Merkmalskombinationen wurde der Einsatz der Assoziationsanalyse untersucht

sowie ein Vorgehen in Anlehnung an das Rucksackproblem erarbeitet. Das Ergebnis der Assoziationsanalyse auf Grundlage des Apriori-Algorithmus wird tabellarisch aufbereitet, um die entsprechenden Informationen durch den Einsatz eines SAT-Solvers ergänzt und auszugsweise vorgestellt. Die gefundenen Entfallkandidaten entsprechen den Kandidaten des negierten Apriori-Algorithmus mit hohem Support und hoher Confidence bei gleichzeitig hoher Anzahl an „gesparten Teilen“. Eine schematische Darstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Schematische Darstellung der vier betrachteten Ergebnistypen

Wenn	Dann	Support	Confidence	SAT	Regel	Zwang	Anzahl gesparte Teile
MA1	MB1	1	1	„true“	„true“	„true“	37
MC3	MF2	0,92	0,95	„true“	„true“	„false“	20
MC3	MG1	0,85	0,90	„true“	„false“	„true“	15
MU1	MV1	0,88	0,88	„true“	„false“	„false“	6

In den Spalten „SAT“, „Regel“, „Zwang“ wird mithilfe des SAT-Solvers ermittelt, ob das Hinzufügen der Regel noch immer die Baubarkeit des bestehenden Regelwerks ermöglicht (SAT), ob es sich bei der gefundenen Beziehung bereits um eine Regel handelt (Regel) und ob eines der beteiligten Merkmalswerte immer wahr sein muss (Zwang). Schlussendlich wird in der letzten Spalte die Anzahl an „gesparten“ Teilen gezählt, welche durch das Hinzufügen der jeweiligen Regel nicht mehr benötigt werden. Der Tabellenausschnitt ist so gewählt, dass er alle möglichen Ergebnistypen abdeckt. Nicht baubare Ergebnisse (SAT = „false“) werden nicht berücksichtigt, da sie keine praktische Relevanz für das beschriebene Problem besitzen. Die ersten beiden Zeilen spiegeln zum Stichtag gültige Regeln wider. Die Zeilen drei und vier sind neuartige Beziehungen. Im Rahmen der beschriebenen Problembeschreibung sind ausschließlich Beziehungen des Ergebnistyps der vierten Zeile von weiterem Interesse.

Weiterhin wurde eine Möglichkeit beschrieben, wie man gezielter nach zu streichenden Merkmalswerten suchen kann, indem man die Teilegültigkeiten in der Stückliste auswertet. Es hat sich herausgestellt, dass das Zwischenergebnis in Form einer Tabelle mit potenziell zu streichenden Merkmalswerten und Kombinationen sich eher zur Entscheidungsunterstützung eignet als das Optimum, da auf diese Weise Wirkzusammenhänge und weitere Informationen besser bereitgestellt werden können. Es ermöglicht Einzelfallentscheidungen und unterstützt somit besser den Entscheidungsprozess. Wie in Tabelle 6 dargestellt, wurden noch weitere Informationen aus der Produktdokumentation ermittelt, die zur Entscheidung beitragen können. Die Detailinformationen zu den Bauteilen, dem Absatztrend und den potenziell wegfallenden Märkten, können in einem entsprechenden Tool ebenfalls zur Verfügung gestellt werden. Weitere Informationen, die in diesem Zuge berücksichtigt werden sollten, sind der Verbau der betrachteten Bauteile in anderen Fahrzeugmodellen und gleichen Werken. Im Vergleich zur Assoziationsanalyse hat das Vorgehen den Vorteil, dass nicht der gesamte Varianzraum untersucht werden muss.

Tabelle 6: Auszug der Tabelle mit zu streichenden Merkmalswerten

Merkmale und Merkmalskombinationen	Gefährdete Verkäufe	Anzahl gesparte Bauteile	Absatz-trend	Wegfallende Märkte	Weitere Merkmalswerte, die entfallen
MA1+MB1+MC3+MD2+ME2	0,15%	35	Leicht steigend	keine	keine
MK1+MN2	0,15%	35	Leicht steigend	keine	keine
MR1+MQ2	0,28%	6	Fallend	keine	keine
MU1	0	23	Zu wenig Daten	1	MI1, MI2, MI3, MS1, MZ1

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausarbeitung stellt dar, wie die Dokumente Stückliste, Regelwerk, Merkmalsliste und Fahrzeugaufträge systematisch analysiert werden können, um zur Optimierung des Produktportfolios genutzt werden zu können. Dazu wurde zunächst durch die Modellierung als aussagelogisches Modell die Möglichkeit geschaffen, Was-wäre-wenn Analysen durch Einzelprüfungen durchzuführen. Weiterhin wurde beschrieben, wie automatisiert Vorschläge zur Optimierung des Produktportfolios ermittelt werden können. Im Prozess der Produktentwicklung stellt das hier vorgeschlagene Vorgehen einen Baustein in der Variantenfestlegung neuer Produkte dar. Damit können in der frühen Phase Produktvarianten hinsichtlich des Zielkonflikts zwischen notwendigen Bauteilvarianten und verkaufbaren Produktvarianten beurteilt werden. Das entwickelte Tool kann somit als digitaler Assistent zur Entscheidungsunterstützung fungieren. Für eine Anwendung in einem Fahrzeugprojekt müssen die Entscheidungsgrundlagen hinsichtlich weiterer Kriterien durch Experten beurteilt werden, da beispielsweise vertriebliche Gründe vorliegen können, die eine rechnerisch ungünstige Produktvariante legitimieren. Weiterer Analysebedarf liegt in der Betrachtung von zeitlichen Änderungen und Trends in den Daten der Vorgängerprojekte. Auch die prinzipielle Möglichkeit aus Verkaufsdaten von Vorgängerprojekten auf den Verkauf von Merkmalswerten im Folgeprojekt schließen zu können, muss von Fall zu Fall beurteilt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei der Volkswagen AG für die Zusammenarbeit und die Unterstützung des Forschungsthemas bedanken.

Literatur

- Adamo 2001 ADAMO, Jean-Marc: *Constraint-Based Rule Mining*. In: Data Mining for Association Rules and Sequential Patterns; Sequential and Parallel Algorithms. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 2001, S. 67–78.
- Agrawal et al. 1993 AGRAWAL, Rakesh; IMIELIŃSKI, Tomasz; SWAMI, Arun: *Mining Association Rules Between Sets of Items in Large Databases*. In: ACM SIGMOD Record 22 (2), 1993, S. 207–216.
- Albers et al. 2015 ALBERS, Albert; BURSAC, Nikola; WINTERGERST, Eike: *Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. In: Binz, Hansgeorg; Bertsche, Bernd; Bauer, Wilhelm; Roth, Daniel (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. Fraunhofer IAO, 2015, S. 1-10.
- Antonie et al. 2014 ANTONIE, Luiza; LI, Jundong; ZAIANE, Osmar: *Negative Association Rules*. In: Aggarwal, C., Han, J. (eds) Frequent Pattern Mining. Springer, Cham, 2014.
- Braun et al. 2018 BRAUN, Felix; KREIMEYER, Matthias; PAETZOLD, Kristin: *Procedural model to ensure consistency and validity of complex, variant-oriented product portfolios*. Linköping, Schweden: NordDesign 2018, 2018.
- Caesar 1991 CAESAR, Christoph: *Kostenorientierte Gestaltungsmethodik für variantenreiche Serienprodukte – Variant mode and effects analysis (VMEA)*. Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1991.
- Davis et al. 1962 DAVIS, Martin; LOGEMANN, George; LOVELAND, Donald: *A Machine Program for Theorem-Proving*. In: Communications of the ACM 5 (7), 1962, S. 394–397.

- Duggirala und Narayana 2013 DUGGIRALA, Rakesh; NARAYANA, P.: *Mining Positive and Negative Association Rules Using Coherent Approach*. In: International Journal of Computer Trends and Technology 4 (1), 2013.
- von Eisenhart Rothe 2002 EISENHART ROTHE, Maximilian von: *Konzeption und Einführung eines IT-gestützten Produkt-Konfigurationsmanagements für die technische Information in der Automobilentwicklung und -herstellung*. Aachen: Shaker, 2002.
- Herlyn 1990 HERLYN, Wilmjakob: *Zur Problematik der Abbildung variantenreicher Erzeugnisse in der Automobilindustrie*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1990.
- Herlyn 2012 HERLYN, Wilmjakob: *PPS im Automobilbau - Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*. München: Hanser, 2012
- Kellerer et al. 2004 KELLERER, Hans; PFERSCHY, Ulrich; PISINGER, David: *Knapsack Problems* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- Krause und Gebhardt 2018 KRAUSE, Dieter; GEBHARDT, Nicolas: *Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln*. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- Marques-Silva 2008 MARQUES-SILVA, João P.: *Practical applications of boolean satisfiability*. In: Discrete Event Systems, 2008. Wodes 2008. 9th International Workshop, IEEE, 2008, S. 74–80.
- Marques-Silva und Sakallah 2003 MARQUES-SILVA, João P.; SAKALLAH, Karem A.: *Grasp - A New Search Algorithm for Satisfiability*. In: Andreas Kuehlmann (Hrsg.): *The Best of ICCAD*. Boston, MA: Springer US, 2003, S. 73–89.
- Meffert 2000 MEFFERT, Heribert: *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung; Konzepte, Instrumente, Praxisbeispiele; mit neuer Fallstudie VW Golf*. 9. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2000.
- Schmidt et al. 2022 SCHMIDT, Thorsten; MARBACH, Anastasia; MANTWILL, Frank: *Recommender Systems for Variant Management in the Automotive Industry*. In DfX 2022: Proceedings of the 33th Symposium Design for X, Hamburg, Germany, 2022.
- Sinz 1997 SINZ, Carsten: *Baubarkeitsprüfung von Kraftfahrzeugen durch automatisches Beweisen*. Diplomarbeit, Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik, Arbeitsbereich Symbolisches Rechnen, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen, Germany, 1997.
- Stich 2007 STICH, Christoph: *Produktionsplanung in der Automobilindustrie: Optimierung des Ressourceneinsatzes im Serienanlauf*. Köln: Wissenschaftsverlag, 2007.
- Walter 2018 WALTER, Rouven: *SAT-based Analysis, (Re-)Configuration & Optimization in the Context of Automotive Product Documentation*. Universität Tübingen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2018.
- Zagel 2006 ZAGEL, Mathias: *Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung*. 2. Aufl. Kaiserslautern: Techn. Univ. Kaiserslautern, Schriftenreihe VPE, Band 1, 2006.
- Zengler 2014 ZENGLER, Christoph: *New Formal Methods for Automotive Configuration*. Universität Tübingen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2014.
- Zhang und Zhang 2002 ZHANG, Chengqi; ZHANG, Shichao: *Association Rule Mining. Models and Algorithms*. Berlin-Heidelberg: Springer Nature, 2002, S. 25–39.

Reduktion komplexer Produktportfolios durch die Ableitung von Kombinatorikregeln aus verkauften Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse

Reduction of complex product portfolios by generating combinatoric rules from sold product configurations with association rule mining

Jan Mehlstäubl¹, Felix Braun², Kristin Paetzold-Byhain¹

¹Technische Universität Dresden, Professur für Virtuelle Produktentwicklung, Dresden
kristin.paetzold@tu-dresden.de

²MAN Truck & Bus SE, 80995 München
felix.braun@man.eu

Abstract (deutsch): Aufgrund der Nachfrage nach individualisierten Produkten, steigt die Anzahl der angebotenen Produktvarianten in vielen Unternehmen immer weiter an. Trotz des Einsatzes von Strategien zur variantenorientierten Produktstrukturierung kann die resultierende Komplexität in den Produkten und Prozessen mit den heutigen manuellen und erfahrungsbasierten Verfahren nicht mehr beherrscht werden. Es werden daher intelligente und datengetriebene Ansätze zur Analyse komplexer Produktportfolios benötigt.

In dieser Arbeit wird ein methodisches Vorgehen vorgestellt, mit dem Regeln zur Einschränkung des Produktportfolios, sogenannte Kombinatorikregeln, aus den Daten verkaufter Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse automatisiert abgeleitet werden können. Durch den Einsatz des FP-Growth Algorithmus können komplexe Produktportfolios mit einer Vielzahl an konfigurierbaren Kundenmerkmalen analysiert und unter Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse systematisch reduziert werden. Der Ansatz wird in einer Fallstudie anhand eines realen Vertriebsdatensatzes eines Nutzfahrzeugherstellers mit einem besonders breiten und tiefen Produktportfolio angewandt und validiert.

Keywords (deutsch):

Produktportfoliokomplexität, Variantenmanagement, Assoziationsanalyse, Künstliche Intelligenz, FP-Growth

Abstract (english): Due to the demand for individualised products, the number of product variants offered is constantly increasing in many companies. Despite the use of strategies for variant-oriented product structuring, the resulting complexity in the products and processes can no longer be managed with today's manual and experience-based procedures. Therefore, intelligent and data-driven methods for the analysis of complex product portfolios are needed.

This paper introduces a methodological approach to automatically derive product portfolio restriction in form of rules, so-called combinatoric rules, from data of sold product configurations with association rule mining. By using the FP-Growth algorithm, complex product portfolios with a large number of configurable customer features can be analysed and systematically reduced, taking into account customer needs. The approach was applied and validated in a case study using a real sales data set of a commercial vehicle manufacturer with a particularly broad and deep product portfolio.

Keywords (english):

Product Portfolio Complexity, Variety Management, Association Rule Mining, Artificial Intelligence, FP-Growth

1 Einführung

Die Anzahl der von Unternehmen angebotenen Produktvarianten ist in den letzten Jahren aufgrund der veränderten Nachfragestrukturen sowie dem verschärften globalen Wettbewerb in vielen Industriezweigen signifikant angestiegen (Krause und Gebhardt 2018). Die Vergrößerung der externen Vielfalt sorgt für eine Steigerung der internen Vielfalt und somit zu einem Anstieg der Komplexität und der Kosten in den Unternehmen (Schuh et al. 2018). Um die interne Vielfalt und Komplexität möglichst gering zu halten, verfolgen Unternehmen unterschiedliche Strategien zur Produktstrukturierung (z. B. Modularisierung, Plattformen oder Baukästen). Dennoch stellt die große Anzahl an konfigurierbaren Produktvarianten die Unternehmen zunehmend vor Herausforderungen (Schmieder und Thomas 2005). Ein BMW 7 kann zum Beispiel bis zu 10^{17} mögliche Konfigurationen besitzen (Hu et al. 2008). Bei Nutzfahrzeugen ist diese Anzahl noch um ein Vielfaches höher (Kusiak et al. 2007). Ein besonderer Stellenwert besitzt daher die Variantenreduktion, welche heutzutage von Experten und deren Erfahrungswissen angegangen wird (Riesener et al. 2019). Aufgrund der hohen Varianz und daraus resultierenden Komplexität des Produktportfolios kann dieses von einzelnen Personen nicht mehr durchschaut werden und erfordert intelligente und datengetriebene Lösungen (Mehlstäubl et al. 2022). Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Analyse verkaufter Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse, um Regeln zwischen Merkmalsausprägungen, sogenannte Kombinatorikregeln, abzuleiten und so das Produktportfolio einzuschränken. Aus dieser Zielsetzung leitet sich die folgende Forschungsfrage ab: Wie kann die Anzahl von Produktvarianten komplexer Produktportfolios durch die Analyse verkaufter Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse reduziert werden?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird in Kapitel 2 auf die wichtigsten Begrifflichkeiten und methodischen Grundlagen eingegangen. In Kapitel 3 werden bestehende Arbeiten, welche eine Assoziationsanalyse im Variantenmanagements einsetzen vorgestellt und der Forschungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet. Im vierten Kapitel wird auf das Forschungsvorgehen, welches zur Erstellung dieser Arbeit verfolgt wird, eingegangen. Das methodische Vorgehen zur Reduktion komplexer Produktportfolios mit einer Assoziationsanalyse wird in Kapitel 5 eingeführt. Dieses beinhaltet die Auswahl und Vorbereitung der Daten, den Einsatz eines FP-Growth Algorithmus zur Ableitung von potenziellen Portfolioeinschränkungen sowie deren Evaluation und Abgleich mit den bisherigen Einschränkungen des Produktdatenmodells. Der Ansatz wird anschließend in Kapitel 6 im Rahmen einer Fallstudie bei einem Nutzfahrzeughersteller angewandt und validiert. Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse kritisch diskutiert, bevor in Kapitel 8 eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungstätigkeiten gegeben wird.

2 Terminologie

2.1 Komplexe Produktportfolios

Das *Produktportfolio* eines Unternehmens beinhaltet alle Produkte, die auf dem Markt angeboten werden (Jonas 2013). Die Breite des Produktportfolios ergibt sich aus der Anzahl der Produktfamilien und die Tiefe beschreibt die Anzahl der Produktvarianten innerhalb der einzelnen Produktfamilien (Lingnau 1994). Eine *Produktfamilie* besteht aus ähnlichen Produktvarianten, welche spezifische Funktionen aufweisen, um bestimmte Kundenanforderungen zu erfüllen (Kissel 2014). *Produktvarianten* sind „Gegenstände ähnlicher Form oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“ (DIN 199-1 2002). Sie unterscheiden sich untereinander in mindestens einer Ausprägung einer kundenrelevanten Eigenschaft (Franke und Firchau 2000). Die Konfiguration einer Produktvariante ist eine besondere Art der Entwicklungstätigkeit, bei der aus den vordefinierten Bausteinen eines Baukastensystems unter Berücksichtigung der definierten Einschränkungen eine *Produktkonfiguration* zusammengesetzt wird (Mittal und Frayman 1989). *Merkmale* (z. B. Schiebedacht) und *Merkmalsausprägungen* (z. B. automatisches Schiebedacht) sind von Kunden wählbare Eigenschaften und bilden die

Beschreibung des Produkts aus Kundensicht (Kreimeyer et al. 2016). Die Kombinierbarkeit der Merkmalsausprägungen unterliegt technischen und vertrieblichen Einschränkungen, welche durch Kombinatorikregeln ausgedrückt werden (Braun et al. 2017). *Kombinatorikregeln* sind Boolesche Regeln, welche einzelne Merkmalsausprägungen miteinander in Beziehung setzen („Merkmalsausprägung A erfordert Merkmalsausprägung B“ oder „Merkmalsausprägung A verbietet Merkmalsausprägung B“) (Braun et al. 2017). Auf Basis der Beschreibung des Produkts aus Kundensicht werden die technischen *Komponenten* (z. B. Zylinderkopf) mit ihren Varianten, den sogenannten *Komponentenvarianten* (z. B. Zylinderkopf für vier Zylinder) ebenfalls über Boolesche Regeln ausgewählt (Braun et al. 2017).

In der Systembetrachtung beschreibt *Komplexität* die Anzahl, die Vielfalt und die Beziehungen der Elemente sowie deren Zustände und Veränderlichkeit (Krause und Gebhardt 2018). *Komplexe Produktportfolios* ergeben sich aus der Anzahl, Vielfalt und der zeitlichen Veränderlichkeit der Merkmale, Merkmalsausprägungen, Komponenten, Komponentenvarianten, deren Beziehungen ausgedrückt durch die Booleschen Regelwerke sowie die resultierenden Produktkonfigurationen. Die *varianteninduzierte Komplexität* beschreibt die Anteile der unternehmensinternen Komplexität, die durch die Produktvielfalt mit ihrer Anzahl und Verschiedenheit varianter Objekte, wie Komponenten, Produkte oder Prozesse, entstehen (Abdelkafi 2008). Die varianteninduzierte Komplexität der Produkte und Prozesse verursachen Kosten, die sogenannten *Komplexitätskosten* (Ehrlenspiel et al. 1998).

2.2 Assoziationsanalyse

Die Assoziationsanalyse stammt ursprünglich aus der Warenkorbanalyse und ermittelt Muster (z. B. Elemente, Subsequenzen oder Substrukturen), die häufig in einem Datensatz auftreten (Han et al. 2012). Es werden Regeln der Form $X \rightarrow Y$ aus einer Menge von Transaktionen Z ermittelt, wobei X eine Teilmenge von Z und Y ein einzelnes Element in Z ist, welches nicht in X vorhanden ist (Agrawal et al. 1993). Der meistverwendete Assoziationsalgorithmus im Produktportfolio- und Variantenmanagement ist der Apriori Algorithmus (Mehlstäubl et al. 2021). Der Apriori Algorithmus wurde von Agrawal und Srikant (1994) entwickelt und legt die Annahme zugrunde, dass jede Teilmenge von häufig auftretenden Elementen ebenfalls häufig auftritt. Es wird zuerst die Häufigkeit aller einzelnen Elemente in einem Datensatz bestimmt und eine Mindesthäufigkeit definiert. Anschließend wird für die Elemente, welche den zuvor definierten Mindestwert überschreiten, die Häufigkeit aller Teilmengen aus zwei Elementen mit einem Durchlauf durch den Ausgangsdatsatz bestimmt. Hierbei werden keine Kombinationen von Elementen, welche zuvor den Mindestwert unterschritten haben, betrachtet. Dies wird so lange wiederholt, bis keine Elemente mehr übrig sind oder ein Abbruchkriterium erreicht wird. Der Nachteil des Apriori Algorithmus ist, dass aufgrund des mehrmaligen Durchlaufens des Datensatzes und der Bestimmung der Häufigkeitswerte eine hohe Rechenleistung benötigt wird (Zhao und Bhowmick 2003). Daher ist er für die Analyse komplexer Produktportfolios mit einer Vielzahl an Merkmalen und Merkmalsausprägungen ungeeignet. Der FP-Growth Algorithmus überführt die Konfigurationen der Produktvarianten in eine datenoptimierte Baumstruktur (Han et al. 2000). Die Baumdarstellung ermöglicht es, die Rechenleistung im Vergleich zu anderen Assoziationsalgorithmen wie dem Apriori enorm zu verringern und komplexe Produktportfolios mit vielen Merkmalen und Merkmalsausprägungen sowie einer großen Anzahl an Produktkonfigurationen zu analysieren.

2.3 Datenanalyseprozess

Die Assoziationsanalyse selbst stellt nur eine Phase in einem Datenanalyseprozess dar. Für deren industrielle Anwendung muss ein Datenanalyseprozess komplett durchlaufen werden. In dieser Arbeit wird der Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) von Wirth und Hipp (2000) herangezogen (Bild 1). Der CRISP-DM fokussiert die industrielle Anwendung von Datenanalysen und ist charakterisiert durch die Phasen des Geschäftsverständnisses und des Datenverständnisses zu Beginn des Prozesses. In der Phase des *Geschäftsverständnisses* geht es darum, die Ziele des Datenanalyseprojekts zu verstehen und in einen konkreten Anwendungsfall zu übersetzen. In der zweiten Phase, dem *Datenverständnis*, werden die Daten gesammelt und genauer untersucht, um die Datenqualität, erste

Erkenntnisse und interessante Teilmengen zu ermitteln. Die *Datenvorbereitung* umfasst alle Aktivitäten zur Umwandlung der Rohdaten in den endgültigen Datensatz (z. B. Datenbereinigung, Feature Engineering und Datentransformation). Die *Modellierung* beinhaltet die Auswahl und Implementierung verschiedener Algorithmen. In der *Evaluation* werden die Modelle im Hinblick auf die vordefinierten Ziele bewertet und es wird eine Entscheidung über ihre Verwendung getroffen. In der letzten Phase, dem *Einsatz*, werden die Modelle und das Wissen den Nutzern zur Verfügung gestellt.

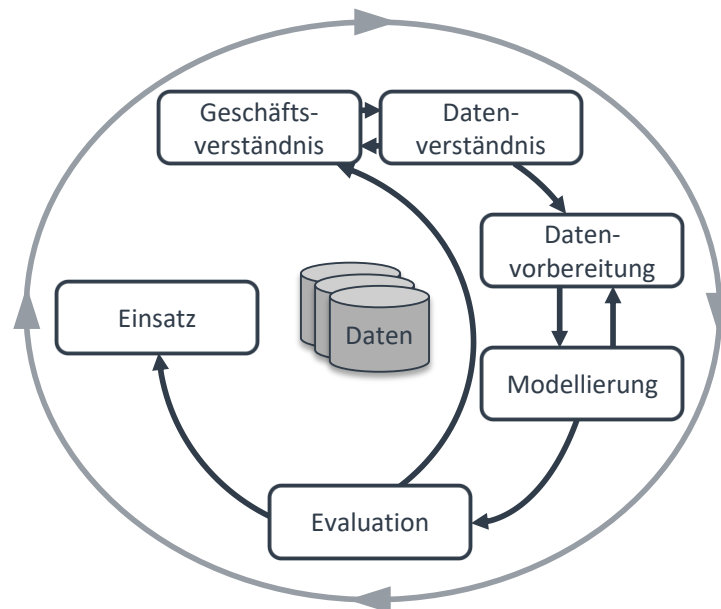


Bild 1: CRISP-DM nach Wirth und Hipp (2000)

3 Stand der Forschung

In der Literatur existieren erste Ansätze, welche eine Assoziationsanalyse im Kontext der Produktportfoliogestaltung einsetzen. Erstmals beschreiben Agard und Kusiak (2004) den Einsatz einer Assoziationsanalyse zur Identifikation von Zusammenhängen zwischen Anforderungen. Eine tatsächliche Implementierung findet nicht statt. Jiao und Zhang (2004) setzen den Apriori Algorithmus ein, um Kundenbedürfnisse zu zuvor definierten Clustern aus funktionalen Anforderungen zuzuordnen. Romanowski und Nagi (2004) bilden mithilfe einer Clusteranalyse generische Stücklisten (GBOMs), für die sie mit dem Apriori Algorithmus Regeln zwischen den einzelnen Stücklistenpositionen definieren. Song und Kusiak (2009) wenden eine Assoziationsanalyse an, um Regeln aus historischen Verkaufsdaten zu extrahieren und nutzen diese für die Bildung von Unterbaugruppen und Hauptproduktkonfigurationen. Bei einer zu großen Anzahl an Regeln werden ähnliche Regeln mittels einer Clusteranalyse zusammengefasst und Unterbaugruppen der Produktkonfigurationen abgeleitet. Xia und Wang (2010) führen eine Assoziationsanalyse durch, um die Zuordnung von Kundenanforderungen zu Stücklistenelementen abzubilden und so anschließend eine automatisierte Übersetzung zu ermöglichen. Moon et al. (2010) ermitteln mit dem Apriori Algorithmus Entwicklungseinschränkungen für die Modul- und Plattformdefinition. Zhang (2012) stellen einen Ansatz vor, bei dem Assoziationsregeln zwischen Funktions- und Technologieklassen bestimmt werden. Der Schwerpunkt von Tensa et al. (2019) liegt auf der Ermittlung von Beziehungen zwischen Komponenten, Funktionen und Produktflüssen. Wang (2019) analysieren die Produktfamilien hinsichtlich der Attribute und bestimmen so deren Wichtigkeit aus dem Kaufverhalten und der Wahrnehmung der Kunden. Eine detailliertere Beschreibung und Analyse der bisherigen Arbeiten kann Mehlstäubl et al. (2021) entnommen werden. Die beschriebenen Ansätze verfolgen nicht das Ziel, die bestehende Varianz zu reduzieren. Zudem findet keine industrielle Anwendung oder lediglich eine Anwendung auf wenig komplexe Produktportfolios statt. Für die Assoziationsanalyse wird ausschließlich der Apriori Algorithmus verwendet, welcher viele Durchläufe durch den

Datensatz benötigt sowie eine aufwendige Berechnung der Häufigkeitswerte beinhaltet. Aufgrund der enorm hohen Rechenleistung ist dieser für die Anwendung auf komplexe Produktportfolios nur bedingt geeignet.

4 Forschungsvorgehen

Das Forschungsvorgehen zur Erstellung dieses Artikels orientiert sich an der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2009). In der ersten Phase werden zur Definition des Forschungsziels Gespräche bei einem Industriepartner sowie eine initiale Literaturbetrachtung durchgeführt. In Phase 2 werden zur weiteren Konkretisierung der Zielsetzung, Vertiefung des Verständnisses über die Problemstellung und Ableitung des Forschungsbedarfs eine Literaturrecherche sowie Interviews bei einem Industriepartner durchgeführt. Auf Basis dessen wird in der dritten Phase ein methodisches Vorgehen entwickelt, welches von den einzelnen Phasen des CRISP-DM abgeleitet ist. Es wird eine Assoziationsanalyse mit einem Frequent Pattern Growth (FP-Growth) Algorithmus zur Ableitung von Regeln komplexer Produktportfolios durchgeführt. Diese Regeln ermöglichen die Formulierung von Einschränkungen des Produktportfolios und somit eine Variantenreduktion. Das Vorgehen wird anschließend im Rahmen einer Fallstudie bei einem Nutzfahrzeughersteller validiert. Nutzfahrzeughersteller besitzen ein besonders breites und tiefes Produktportfolio aufgrund der Vielzahl an Transportaufgaben und Einsatzszenarien sowie der globalen Wettbewerbssituation (Kreimeyer et al. 2016). In der Validierung findet eine Anwendung des Vorgehens auf einen realen Datensatz des Industriepartners statt, wodurch die Potenziale sowie Einschränkungen identifiziert werden.

5 Methodisches Vorgehen zur Reduktion komplexer Produktportfolios mit einer Assoziationsanalyse

Das entwickelte methodische Vorgehen besteht aus vier Phasen und ist in Bild 2 dargestellt. Zuerst wird der Datenbedarf sowie die einzelnen Schritte der Datenvorbereitung erläutert. Für die Ermittlung von Assoziationsregeln zwischen Merkmalsausprägungen sind die Konfigurationen der verkauften Produktvarianten erforderlich. Diese beinhalten die Merkmale (z. B. Modell) sowie deren Merkmalsausprägungen (z. B. Modell S oder M). Damit die Daten von einem Assoziationsalgorithmus verarbeitet werden können, muss eine One-Hot-Kodierung durchgeführt werden. Anschließend findet die Modellierung und Ableitung von Assoziationsregeln (z. B. Modell S → Fahrgestellart Sattel) mit einem FP-Growth Algorithmus statt (Han et al. 2000). Der FP-Growth Algorithmus überführt die Konfigurationen der Produktvarianten in eine datenoptimierte Baumstruktur. Die Baumdarstellung ermöglicht es die Rechenleistung im Vergleich zu anderen Assoziationsalgorithmen enorm zu verringern und komplexe Produktportfolios mit vielen Merkmalen und Merkmalsausprägungen sowie einer großen Anzahl an Konfigurationen zu analysieren. In der dritten Phase werden die Regeln mit den Metriken Support und Confidence evaluiert. In der letzten Phase werden die ermittelten Assoziationsregeln mit den bestehenden Produktportfolieinschränkungen verglichen und neue Kombinatorikregeln formuliert, um das Produktportfolio einzuschränken. Abschließend werden die Auswirkungen der Kombinatorikregeln auf die interne Vielfalt, ausgedrückt in Komponentenvarianten, geprüft und das Einsparpotenzial ermittelt.

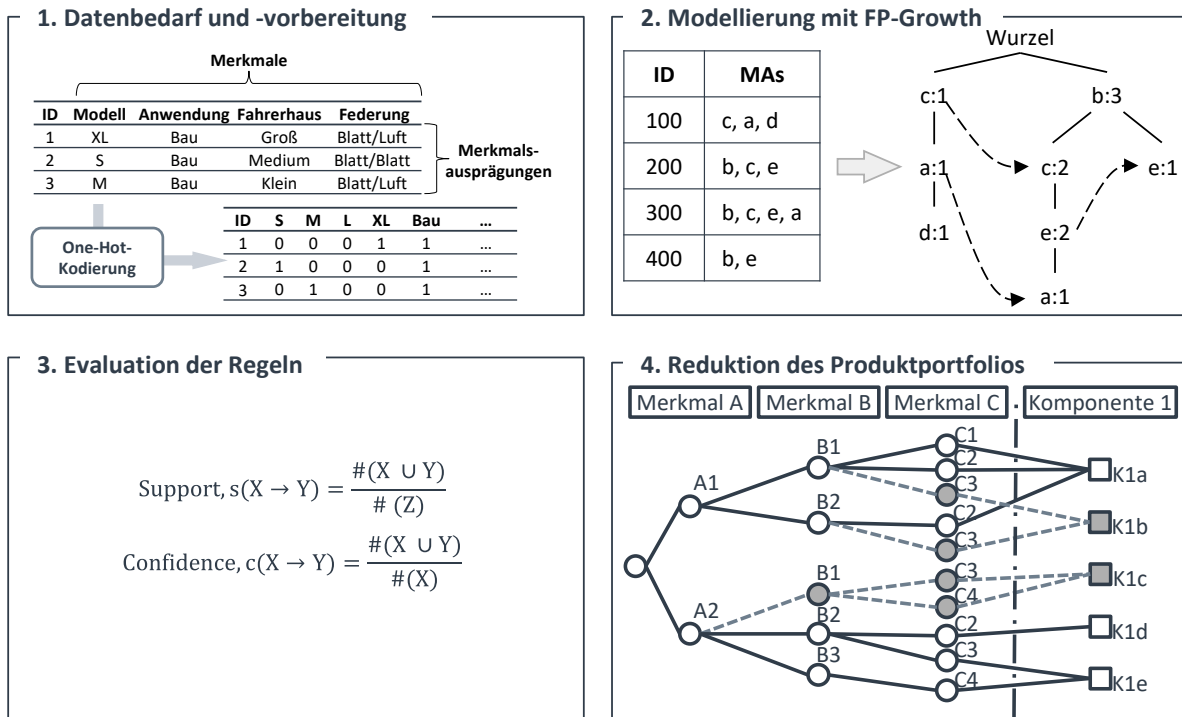


Bild 2: Methodisches Vorgehen zur Reduktion komplexer Produktportfolios mit einer Assoziationsanalyse

5.1 Phase 1: Datenbedarf und -vorbereitung

Die immer weiter steigende Anzahl kombinierbarer Merkmale sorgt für eine nahezu unendliche Anzahl möglicher Produktkonfigurationen. Dies führt dazu, dass Variantenentscheidungen nicht mehr auf Produktebene, sondern auf Merkmalsebene getroffen werden (Heina 1999). Die Reduktion von Merkmalen oder die Einschränkung ihrer Kombinierbarkeit sorgt für eine Verkleinerung des Produktportfolios. Durch die Assoziationsanalyse werden Merkmalskombinationen identifiziert, welche häufig gemeinsam in Produktkonfigurationen auftreten. Die Daten verkaufter Produktkonfigurationen bestehen aus den Merkmalen sowie deren Merkmalsausprägungen. Für die Durchführung einer Assoziationsanalyse ist eine One-Hot-Kodierung erforderlich (Hancock und Khoshgoftaar 2020). Dabei wird für jede Merkmalsausprägung eine Spalte erzeugt und wenn eine Merkmalsausprägung in einer Produktkonfiguration enthalten ist, diese mit 1 (hot) und wenn nicht mit 0 (cold) kodiert (vgl. Bild 3).

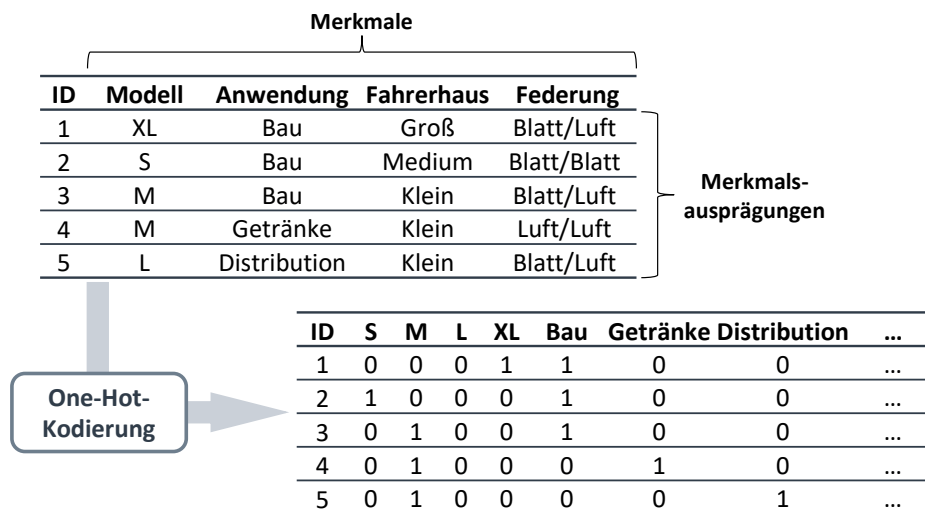


Bild 3: Datenbedarf und -verarbeitung

5.2 Phase 2: Modellierung mit FP-Growth

In dieser Phase werden die Assoziationsregeln mit dem FP-Growth Algorithmus ermittelt (Han et al. 2000). Dabei wird in einem ersten Schritt die große Datenmenge in eine stark komprimierte baumartige Datenstruktur überführt. Der Durchlauf durch den FP-Baum erfordert zum einen weniger Rechenleistung und zum anderen ist keine Ermittlung von Kandidatenelementen erforderlich. Für die Erstellung des Baumes wird zuerst die Häufigkeit aller Merkmalsausprägungen (MAs) in den verkauften Produktkonfigurationen bestimmt und in absteigender Reihenfolge sortiert. Anschließend wird der Baum gebildet indem jede Produktkonfiguration ausgehend von der Wurzel des Baumes aufgetragen wird (siehe Bild 4). Jedem Knoten wird die Anzahl der Produktkonfigurationen zugeordnet, die diesen Knoten durchlaufen.

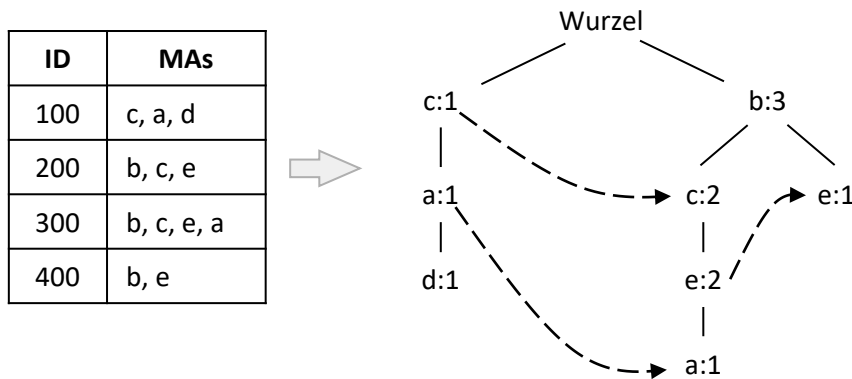


Bild 4: Erstellung des FP-Baums nach Han et al. (2012)

Nachdem alle Produktkonfigurationen im Baum erfasst wurden, kommt es zur Ableitung der Assoziationsregeln (Han et al. 2000). In Tabelle 1 ist die Ableitung der Assoziationsregeln für eine Mindesthäufigkeit von zwei abgebildet. Dabei wird beginnend mit der Merkmalsausprägung mit der geringsten Häufigkeit der Baum von oben nach unten durchlaufen und dessen bedingte Muster identifiziert. Daraus wird ein reduzierter FP-Baum gebildet, welcher die Häufigkeit zu anderen Elementen darstellt. Ausgehend davon werden die Regeln abgeleitet, welche die Mindesthäufigkeit überschreiten. Dies wird bis zur zweithäufigsten Merkmalsausprägung wiederholt.

Tabelle 1: Ableitung der Assoziationsregeln aus dem FP-Baum nach Han et al. (2012)

MAs	Muster im FP-Baum	Reduzierter FP-Baum	Assoziationsregeln
d	{c,a:1}	<c:1,a:1>	-
a	{c:1}, {b,c,e:1}	<c:2,b:1,e:1>	{c,a:2}
e	{b,c:2}, {b:1}	<b:3, c:2>	{e,b:3}, {e,c:2} {e,c,b:2}
c	{b:2}	<b:2>	{c,b:2}

5.3 Phase 3: Evaluation der Regeln

Die Güte der Regeln wird grundsätzlich mit den zwei Metriken Support und Confidence gemessen (Han et al. 2000). Der Support-Wert zeigt, wie häufig eine Regel im gesamten Datensatz Z vorkommt und der Confidence-Wert wie oft Y in Produktkonfigurationen auftreten, welche X beinhalten. Die Metriken werden wie folgt berechnet:

$$\text{Support, } s(X \rightarrow Y) = \frac{\#(X \cup Y)}{\#(Z)} \tag{1}$$

$$\text{Confidence, } c(X \rightarrow Y) = \frac{\#(X \cup Y)}{\#(X)} \quad (2)$$

Für die Ableitung von Kombinatorikregeln ist vor allem der Confidence-Wert von zentraler Bedeutung. Ist dieser nahe oder gleich eins bedeutet dies, dass die Merkmalsausprägungen fast immer oder immer zusammen auftreten und eine Kombinatorikregel der Form „Merkmalsausprägung A erfordert Merkmalsausprägung B“ sinnvoll ist. Dadurch wird die Kombination aller anderen Merkmalsausprägungen der entsprechenden Merkmale eingeschränkt.

5.4 Phase 4: Reduktion des Produktportfolios

In der Produktportfoliogestaltung werden beim Aufbau eines Produktdatenmodells in erster Linie technische Einschränkungen betrachtet. Durch die Analyse der verkauften Produktkonfiguration mit einer Assoziationsanalyse werden dagegen Einschränkungen auf Basis der Kundenbedürfnisse ermittelt. In dieser Phase findet daher ein Abgleich zwischen den bestehenden Einschränkungen des Produktdatenmodells mit den durch die Assoziationsanalyse generierten Regeln statt. Durch die Definition von Kombinatorikregeln wird die Kombinierbarkeit der Merkmalsausprägungen eingeschränkt. Dies führt zunächst lediglich zur Reduktion der unnötigen externen Vielfalt. Durch die Verknüpfung der Kundensicht mit der technischen Sicht über die Teileauswahlregeln hat die Einführung von Kombinatorikregeln einen direkten Einfluss auf die interne Vielfalt und Komplexität. Es ist daher zu ermitteln, welche Komponentenvarianten durch die neuen Einschränkungen obsolet werden und für eine Reduktion der Kosten sorgen. In Bild 5 wurden beispielhaft die Kombinatorikregeln „B1 verbietet C3“, „B2 erfordert C2“ sowie „A2 verbietet B1“ eingeführt, weshalb die Komponentenvarianten K1b und K1c nicht mehr benötigt werden.

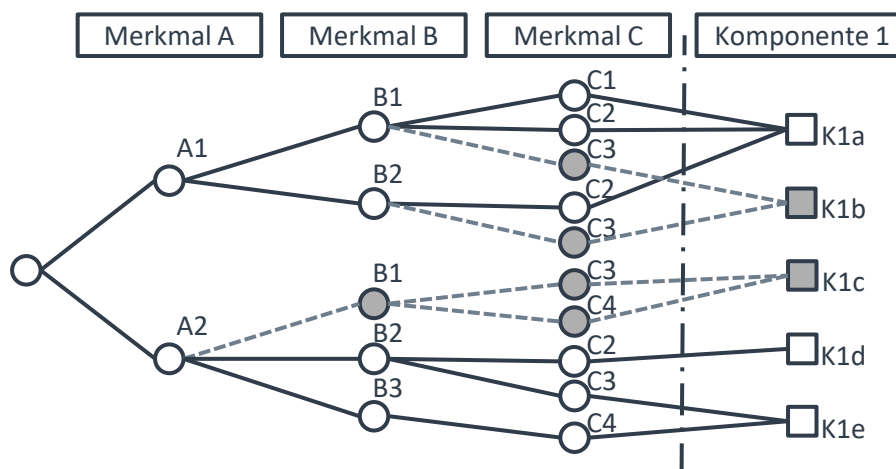


Bild 5: Reduktion des Produktportfolios durch die Einführung von Kombinatorikregeln

6 Validierung mit einer Fallstudie bei einem Nutzfahrzeughersteller

Das methodische Vorgehen wurde im Rahmen einer Fallstudie mit einem realen Datensatz eines Nutzfahrzeugherstellers validiert. Der Datensatz des Industriepartners besteht aus einer Auswahl von 189 802 im Zeitraum zwischen April 2020 und März 2022 verkauften Fahrzeugkonfigurationen mit 986 Merkmalen und insgesamt 12 511 Merkmalsausprägungen. Die Implementierung wurde in Python vorgenommen. Dabei wurden die Bibliotheken Pandas (Python Data Analysis Library) und Mlxtend (Machine Learning Extensions) eingesetzt. In einem ersten Schritt wurden die 986 Merkmale mit Experten auf 246 Merkmale und 1 824 Merkmalsausprägungen reduziert, die eine hohe Relevanz für die Eigenschaften der Produktvarianten haben. Anschließend wurde eine One-hot-Kodierung durchgeführt. Die

Assoziationsalgorithmen erfordern die Eingabe der minimalen Häufigkeit der Regeln sowie die Regeltiefe. Die minimale Häufigkeit wurde auf 0,8 und die maximale Regeltiefe auf drei festgelegt. In der Modellierung wurde sowohl der FP-Growth Algorithmus als auch der Apriori Algorithmus implementiert. Bei der Durchführung der Assoziationsanalyse mit dem Apriori Algorithmus trat ein Memory Error auf, da der Arbeitsspeicher für die Analyse des Datensatzes nicht ausreichend ist. Der FP-Growth ermittelte 327 212 Regeln, wovon 9 499 zwei und 317 713 drei Merkmalsausprägungen enthalten. Für diese Regeln wurden anschließend die Confidence-Werte berechnet.

Im Folgenden werden die Evaluation der Regeln und Reduktion des Produktportfolios beispielhaft an einer der identifizierten Regeln demonstriert. Die Regel lautet „Ohne Hydrauliktank, links (Material)“ → „Luftansaugung, hinter Fahrerhaus, hochgezogen“ und besitzt einen Support von 0,973 und Confidence von 0,991. Das bedeutet, dass in 99,1 % der Fälle diese beiden Merkmalsausprägungen zusammen verkauft wurden. Im nächsten Schritt wurde die Regel mit den bestehenden Produktportfolieeinschränkungen verglichen. Die Merkmalsausprägung „Ohne Hydrauliktank, links (Material)“ kann aktuell mit den Merkmalsausprägungen „Luftansaugung, hinter Fahrerhaus, hochgezogen“, „Vorbereitung für hochgezogene Luftansaugung“ und „Luftansaugung, hinter Fahrerhaus, oberhalb Getriebe (nicht für Standardaufbauten)“ kombiniert werden. Es wurde die Kombinatorikregel „Ohne Hydrauliktank, links (Material)“ erfordert „Luftansaugung, hinter Fahrerhaus, hochgezogen“ definiert und somit die Kombinierbarkeit mit den anderen beiden Merkmalsausprägungen ausgeschlossen. Durch die Definition von Kombinatorikregeln wird zunächst lediglich die äußere Vielfalt des Produktportfolios eingeschränkt. Die äußeren Einschränkungen resultieren jedoch in einer Reduktion der internen Vielfalt durch die Verknüpfung der Merkmalsausprägungen über die Booleschen Teileauswahlregeln mit den Komponentenvarianten und damit der Komplexität sowie der Kosten. Die Auswirkungen der definierten Kombinatorikregeln wurde beim Industriepartner mithilfe einer Rule Engine berechnet. Dabei wurden 14 Komponentenvarianten ermittelt, welche nicht mehr vom Konfigurator gezogen und dadurch nicht mehr benötigt werden. Der Entfall dieser Komponentenvarianten sorgt für eine Reduktion der internen Vielfalt sowie der Komplexitätskosten.

7 Diskussion

Das entwickelte methodische Vorgehen ermöglicht die Reduktion komplexer Produktportfolios durch die Ableitung von Kombinatorikregeln aus verkauften Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse. Durch den Einsatz des FP-Growth Algorithmus können komplexe Produktportfolios mit einer Vielzahl an Merkmalen und Merkmalsausprägungen analysiert werden. Die Anwendbarkeit und der Nutzen wurde bei einem Industriepartner aus der Nutzfahrzeugbranche validiert und dadurch die Forschungsfrage „Wie kann die Anzahl von Produktvarianten komplexer Produktportfolios durch die Analyse von verkauften Produktkonfigurationen mit einer Assoziationsanalyse reduziert werden?“ beantwortet. Es wurde gezeigt, wie die Assoziationsregeln in konkrete Kombinatorikregeln übersetzt und die externe sowie interne Varianz reduziert werden kann. Dadurch können Produktportfolios systematisch und automatisiert analysiert und Komplexitätskosten reduziert werden. Der Abgleich der ermittelten Assoziationsregeln mit dem bestehenden Regelwerk im Produktdatenmodell findet aktuell manuell statt. Außerdem ermöglicht der FP-Growth Algorithmus lediglich die Ermittlung von Regeln mit einem hohen Support und Confidence. Diese resultieren in Kombinatorikregeln der Form „Merkmalsausprägung A erfordert Merkmalsausprägung B“. Merkmalsausprägungen, welche selten zusammen auftreten werden damit nicht ermittelt. Das bedeutet, dass Kombinatorikregeln der Form „Merkmalsausprägung A verbietet Merkmalsausprägung B“ nur indirekt abgeleitet werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein methodisches Vorgehen zur Ableitung von Kombinatorikregeln aus verkauften Produktkonfigurationen mittels einer Assoziationsanalyse vorgestellt. Hierfür werden Vertriebsdaten aus Merkmalen und Merkmalsausprägungen mit dem FP-Growth Algorithmus analysiert,

welcher die Ausgangsdaten in eine komprimierte Baumstruktur überführt und dadurch die Ableitung von Assoziationsregeln für komplexe Produktportfolios ermöglicht. Die Assoziationsregeln werden mit den Metriken Support und Confidence evaluiert und in Kombinatorikregeln ausgedrückt. Im letzten Schritt werden die Auswirkungen der Einschränkungen der externen Vielfalt auf die interne Vielfalt untersucht. Dadurch können konkrete Einsparpotenziale transparent gemacht werden. Die Anwendbarkeit und der Nutzen des Ansatzes wurde durch eine Fallstudie bei einem Nutzfahrzeughersteller mit einem besonders breiten und tiefen Produktportfolio bestätigt.

Zukünftige Forschungstätigkeiten beinhalten den automatisierten Abgleich der Assoziationsregeln mit dem bestehenden Kombinatorikregelwerk sowie die automatisierte Ermittlung der Einsparpotenzialen in den Komponentenvarianten. Durch den Einsatz einer Assoziationsanalyse können lediglich Kombinatorikregeln der Form „Merkmalsausprägung A verbietet Merkmalsausprägung B“ abgeleitet werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer negativen Assoziationsanalyse zur Ableitung von Kombinatorikregeln der Form „Merkmalsausprägung A verbietet Merkmalsausprägung B“ zu prüfen (Shen et al. 2010). Des Weiteren ist der Generalisierbarkeit des Ansatzes durch die Anwendung auf komplexe Produktportfolios weiterer Unternehmen zu bestätigen.

Danksagung

Die vorgestellte Forschungsarbeit ist Teil des bayerischen Forschungsverbundes „FORCuDE@BEV – Customized Digital Engineering für Bayerische KMU“ und gefördert durch die Bayerische Forschungsförderung (BFS). Für den Inhalt dieser Publikation sind die Autoren verantwortlich. Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung (BFS) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- Abdelkafi 2008 ABDELKAFI, NIZAR: Variety induced complexity in mass customization: concepts and management, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG (2008)
- Agard und Kusiak 2004 AGARD, B. ; KUSIAK, A.: Standardization of components, products and processes with data mining. In: *International Conference on Production Research Americas* (2004), S. 1–9
- Agrawal et al. 1993 AGRAWAL, RAKESH ; IMIELIŃSKI, TOMASZ ; SWAMI, ARUN: Mining association rules between sets of items in large databases. In: *Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 1993, S. 207–216
- Agrawal und Srikant 1994 AGRAWAL, RAKESH ; SRIKANT, RAMAKRISHNAN: Fast algorithms for mining association rules. In: *Proc. 20th int. conf. very large data bases, VLDB*. Bd. 1215 : Citeseer, 1994, S. 487–499
- Blessing und Chakrabarti 2009 BLESSING, LUCIENNE T.M. ; CHAKRABARTI, AMARESH: *DRM, a design research methodology* : Springer, 2009 — ISBN 9781848825864
- Braun et al. 2017 BRAUN, FELIX ; KREIMEYER, MATTHIAS ; KOPAL, BASTIAN ; PAETZOLD, KRISTIN: Herausforderungen in der Validierung der Variantenbeschreibung komplexer Produkte. In: *DFX 2017: Proceedings of the 28th Symposium Design for X* (2017), S. 61–73 — ISBN 9783946094203
- DIN 199-1 2002 DIN 199-1: Technische Produktdokumentation-CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten-Teil 1: Begriffe, Beuth Berlin (2002)
- Ehrlenspiel et al. 1998 EHRENSPIEL, KLAUS ; KIEWERT, ALFONS ; LINDEMANN, UDO ; MÖRTL, MARKUS: *Kostengünstig entwickeln und konstruieren* : Springer, 1998 — ISBN 3540251650

- Franke und Firchau 2000 FRANKE, HANS-JOACHIM ; FIRCHAU, NORMAN L: Variantenmanagement in der Einzel-und Kleinserienfertigung. In: *DFX 2000: Proceedings of the 11th Symposium on Design for X, Schnaittach/Erlangen, Germany, 12.-13.20. 2000*, 2000
- Han et al. 2012 HAN, JIAWEI ; PEI, JIAN ; TONG, HANGHANG: *Data Mining: Concepts and Techniques*, 2012
- Han et al. 2000 HAN, JIAWEI ; PEI, JIAN ; YIN, YIWEN: Mining frequent patterns without candidate generation. In: *ACM sigmod record* Bd. 29, ACM New York, NY, USA (2000), Nr. 2, S. 1–12
- Hancock und Khoshgoftaar 2020 HANCOCK, JOHN T ; KHOSHGOFTAAR, TAGHI M: Survey on categorical data for neural networks. In: *Journal of Big Data* Bd. 7, SpringerOpen (2020), Nr. 1, S. 1–41
- Heina 1999 HEINA, JÜRGEN: *Variantenmanagement*: Springer-Verlag, 1999 — ISBN 3663090930
- Hu et al. 2008 HU, S. J. ; ZHU, X. ; WANG, H. ; KOREN, Y.: Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Bd. 57 (2008), Nr. 1, S. 45–48
- Jiao und Zhang 2004 JIAO, JIANXIN ; ZHANG, YIYANG: Product portfolio identification based on association rule mining. In: *CAD Computer Aided Design* Bd. 37 (2004), Nr. 2, S. 149–172 — ISBN 6567904143
- Jonas 2013 JONAS, HENRY: *Eine Methode zur strategischen Planung modularer Produktprogramme*: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2013
- Kissel 2014 KISSEL, MAXIMILIAN PHILIPP: Mustererkennung in komplexen Produktportfolios (2014), S. 212
- Krause und Gebhardt 2018 KRAUSE, DIETER ; GEBHARDT, NICOLAS: *Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. Bd. №3, 2018 — ISBN 9783662530399
- Kreimeyer et al. 2016 KREIMEYER, M. ; BAUMBERGER, C. ; DEUBZER, F. ; ZIETHEN, D.: An integrated product information model for variant design in commercial vehicle development. In: *Proceedings of International Design Conference, DESIGN* Bd. DS 84 (2016), Nr. 1, S. 707–716
- Kusiak et al. 2007 KUSIAK, ANDREW ; SMITH, MATHEW R. ; SONG, ZHE: Planning product configurations based on sales data. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* Bd. 37 (2007), Nr. 4, S. 602–609
- Lingau 1994 LINGNAU, VOLKER: *Variantenmanagement: Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie*. Bd. 58 : Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG, 1994 — ISBN 3503036199
- Mehlstäubl et al. 2022 MEHLSTÄUBL, JAN ; BRAUN, FELIX ; DENK, MARTIN ; KRAUL, RALF ; PAETZOLD, KRISTIN: Using Machine Learning for Product Portfolio Management: A Methodical Approach to Predict Values of Product Attributes for Multi-Variant Product Portfolios. In: *Proceedings of the Design Society* Bd. 2 (2022), S. 1659–1668
- Mehlstäubl et al. 2021 MEHLSTÄUBL, JAN ; BRAUN, FELIX ; PAETZOLD, KRISTIN: Data Mining in Product Portfolio and Variety Management – Literature Review on Use Cases and Research Potentials. In: *2021 IEEE Technology & Engineering Management Conference-Europe (TEMSCON-EUR)*, 2021 — ISBN 9781665440912, S. 442–447
- Mittal und Frayman 1989 MITTAL, SANJAY ; FRAYMAN, FELIX: Towards a Generic Model of Configuraton Tasks. In: *IJCAI*. Bd. 89 : Citeseer, 1989, S. 1395–1401

- Moon et al. 2010 MOON, SEUNG KI ; SIMPSON, TIMOTHY W. ; KUMARA, SOUNDAR R.T.: A methodology for knowledge discovery to support product family design. In: *Annals of Operations Research* Bd. 174 (2010), Nr. 1, S. 201–218
- Riesener et al. 2019 RIESENER, M. ; DÖLLE, C. ; SCHMITT, L. ; JANK, M. H.: Development of a Methodology to Design Product Portfolios in Accordance to Corporate Goals Using an Evolutionary Algorithm. In: *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* Bd. 2019-Decem (2019), S. 1466–1470 — ISBN 9781538667866
- Romanowski und Nagi 2004 ROMANOWSKI, CAROL J. ; NAGI, RAKESH: A data mining approach to forming generic bills of materials in support of variant design activities. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* Bd. 4 (2004), Nr. 4, S. 316–328
- Schmieder und Thomas 2005 SCHMIEDER, MATTHIAS ; THOMAS, SVEN: *Plattformstrategien und Modularisierung in der Automobilentwicklung* : Shaker, 2005 — ISBN 3832231560
- Schuh et al. 2018 SCHUH, GÜNTHER ; RIESENER, MICHAEL ; JANK, MERLE-HENDRIKJE: Managing Customized and Profitable Product Portfolios Using Advanced Analytics. In: *Customization 4.0*, 2018 — ISBN 9783319775562, S. 203–216
- Shen et al. 2010 SHEN, YANGUANG ; LIU, JIE ; SHEN, JING: The further development of weka base on positive and negative association rules. In: *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Bd. 3 : IEEE, 2010 — ISBN 1424472806, S. 811–814
- Song und Kusiak 2009 SONG, Z. ; KUSIAK, A.: Optimising product configurations with a data-mining approach. In: *International Journal of Production Research* Bd. 47 (2009), Nr. 7, S. 1733–1751
- Tensa et al. 2019 TENSA, MELISSA ; EDMONDS, KATHERINE ; FERRERO, VINCENZO ; MIKES, ALEX ; SORIA ZURITA, NICOLAS ; STONE, ROB ; DUPONT, BRYONY: Toward automated functional modeling: An association rules approach for mining the relationship between product components and function. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED*. Bd. 2019-Augus : Cambridge University Press, 2019 — ISBN 2220-4342, S. 1713–1722
- Wang 2019 WANG, CHIH HSUAN: Association rule mining and cognitive pairwise rating based portfolio analysis for product family design. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* Bd. 30, Springer US (2019), Nr. 4, S. 1911–1922
- Wirth und Hipp 2000 WIRTH, RÜDIGER ; HIPPE, JOCHEN: CRISP-DM : Towards a Standard Process Model for Data Mining. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on the Practical Application of Knowledge Discovery and Data Mining*. Bd. 1 : Springer-Verlag London, UK, 2000, S. 29–39
- Xia und Wang 2010 XIA, SHI SHENG ; WANG, LI YA: Customer requirements mapping method based on association rules mining for mass customisation. In: *International Journal of Computer Applications in Technology* Bd. 37, Springer (2010), S. 198–203
- Zhang 2012 ZHANG, LINDA: Identifying mapping relationships between functions and technologies with association rule mining. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* Bd. 25 (2012), January 2013, S. 37–41
- Zhao und Bhowmick 2003 ZHAO, QIAN KUN ; BHOWMICK, SOURAV S: Association rule mining: A survey. In: *Nanyang Technological University, Singapore* Bd. 135 (2003)

„Shaping Missions“-Tool - Ein Managementinstrument für missionsorientierte Innovationsökosysteme

The "Shaping Missions" tool - A management instrument for mission-oriented innovation ecosystems

Lale Altinalana-Widenka¹

¹Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI),
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Berlin/Stuttgart
lale.altinalana@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Angesichts großer globaler Herausforderungen wie dem Klimawandel und der damit einhergehenden zunehmenden Komplexität bedarf es Innovationen, die sich an Missionen orientieren, sowie der Zusammenarbeit verschiedener Akteure aus unterschiedlichen Sektoren innerhalb von Innovationsökosystemen. Um Organisationen dabei zu unterstützen, ihre Innovationsökosysteme zu analysieren und missionsorientiert auszubauen, wurde das „Shaping Missions“-Tool entwickelt. Dieses forschungsbasierte Managementinstrument zielt darauf ab, die notwendige Kollaboration zwischen Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Wirtschaft in missionsorientierten Netzwerken so zu gestalten, dass die gemeinsamen Missionen effektiv verfolgt werden können.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Missionsorientierte Innovationspolitik, Innovationsökosysteme, Management

Abstract (english): In the face of major global challenges such as climate change and the increasing complexity associated with it, mission-oriented innovations are needed, as well as the collaboration of various actors from different sectors within innovation ecosystems. To help organizations analyze and develop their innovation ecosystems in a mission-oriented way, the "Shaping Missions" tool was developed. This research-based management method aims at shaping the necessary collaboration between science, civil society, politics and business in mission-oriented networks in such a way that the shared missions can be effectively pursued.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

mission-oriented innovation, innovation ecosystems, management

1 Einleitung

Die Klimakrise und Covid-19-Pandemie gehören zu den großen globalen Herausforderungen unserer Zeit (Kuhlmann und Rip 2018). Aufgrund der zunehmenden Komplexität und den veränderten Anforderungen müssen neue innovative Lösungsstrategien zur Bewältigung dieser Herausforderungen entwickelt werden. In diesem Kontext kommt dem Verfolgen von Missionen eine zunehmende Bedeutung zu. Mazzucato und Dibb (2019) definieren Missionen als konkrete Ziele innerhalb einer Herausforderung, die als Rahmen und Anreiz für Innovationen dienen. Im Kontext der großen globalen Herausforderungen und Missionsorientierung bedarf es Innovationen, die weder konventionell noch rein ökonomisch ausgerichtet sind (ebd.) und der Zusammenarbeit verschiedener Akteure aus unterschiedlichen Sektoren wie Zivilgesellschaft, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik innerhalb von Innovationsökosystemen (Adner 2006; Jütting 2020; Schütz 2020). Im Zuge dessen hat das Konzept der Innovationsökosysteme in den letzten Jahren immer mehr Aufmerksamkeit und Forschungsinteresse erhalten (Adner 2006). Bisher ist jedoch wenig über die strategische Gestaltung solcher Innovationsökosysteme bekannt (Jütting 2020). Durch das Erkennen und Beschreiben von Merkmalen der strategischen Gestaltung ist es möglich, praktische Empfehlungen für Entscheidungsträger:innen in Innovationsökosystemen aufzuzeigen, die Organisationen die Möglichkeit geben, ihre Mission(en) erfolgreich zu verfolgen. Um dies organisational umsetzen zu können, braucht es Methoden, wie das dieser Arbeit zugrundeliegende „Shaping Missions“-Tool, auf welches Organisationen als Innovationsmanagementinstrument zurückgreifen können, um individuelle Handlungsempfehlungen in Bezug auf alle missions-relevanten Elemente im Innovationsökosystem zu erhalten. Diese Handlungsempfehlungen konnten basierend auf unseren Forschungsergebnissen im BMBF-geförderten Forschungsprojekt „Open Innovation Ecosystems“ abgeleitet und ein Tool zur Strukturierung und Konfiguration von Innovationsökosystemen in Übereinstimmung mit ihrer Mission entwickelt werden. Das „Shaping Missions“-Tool zielt insgesamt darauf ab, die Kollaboration zwischen Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Wirtschaft in einem missionsorientierten Innovationsökosystem so zu gestalten, dass die gemeinsamen Missionen effektiv verfolgt werden können.

Die zugrundeliegenden Forschungsfragen des „Shaping Missions“-Tool lauten deshalb wie folgt:

- Welche Strukturen müssen bei Innovationsökosystemen vorhanden sein, damit sie ihre Mission(en) erzielen können?
- Wie können diese Strukturen in einem Tool für Praktiker:innen nutzbar gemacht werden?

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand der Thematik erläutert. Auf dieser Grundlage werden im dritten Kapitel die methodischen Ansätze zur Toolentwicklung aufgezeigt und im vierten Kapitel der Kontext und die Ziele der Toolnutzung dargelegt. In Kapitel fünf werden die Inhalte des Tools anhand eines fiktiven Beispiels erläutert und im darauffolgenden Kapitel diskutiert. Der Beitrag schließt mit einem kurzen Fazit der wichtigsten Erkenntnisse und einem Ausblick für künftige Forschungsunternehmungen.

2 Aktueller Forschungsstand

Die Vereinten Nationen haben im Jahr 2015 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung verabschiedet, die als große globale Herausforderungen gelten, angefangen mit der Beseitigung der Armut weltweit (United Nations 2015). Um diese Herausforderungen erreichbar zu machen, müssen sie laut Mazzucato und Dibb (2019) in pragmatische Schritte unterteilt werden. Sie bezeichnen diese als „Missionen - konkrete Ziele innerhalb einer Herausforderung, die als Rahmen und Anstoß für Innovationen dienen.“ (ebd., S. 2, eigene freie Übersetzung). Die Nutzung von Missionen zur Steuerung der nationalen Innovationspolitik bedeutet laut Mazzucato und Dibb (2019), dass man sich weniger auf ganze Industriesektoren und mehr auf Probleme konzentriert, die für alle von Bedeutung sind. Missionen

sollten zu Investitionen in verschiedenen Sektoren führen und verschiedene Arten von Akteuren einbeziehen. Um die größtmögliche Wirkung zu erzielen, sollten Missionen Akteure aus der gesamten Wirtschaft einbeziehen, nicht nur aus einem Sektor und nicht nur aus dem privaten oder öffentlichen Bereich (Mazzucato 2018). Das Bestreben, eine oder mehrere Missionen in der Organisation und im Innovationsökosystem zu verfolgen – auch Missionsorientierung genannt – stellt eine Grundvoraussetzung für die Nutzung des „Shaping Missions“-Tools dar. Das Tool ist auf Innovationsökosysteme ausgerichtet, welche sich missionsorientiert aufstellen wollen, oder es bereits sind und konkrete Handlungsempfehlungen brauchen.

Digitale Software-Tools stellen dabei heutzutage in Innovationsmanagementprozessen keine Seltenheit dar: Sie zählen zu den wichtigsten Treibern von Innovationen (Huber 2013). Huesig und Endres (2018) untersuchten beispielsweise Innovationsmanagementsoftware-Tools und ihre Wirkung in unterschiedlichen Kontexten. Zu ihren Kernergebnissen gehört, dass die wichtigsten erwarteten Vorteile von solchen digitalen Tools insbesondere in der Steigerung von Effizienz und Effektivität liegen, diese aber weniger geeignet für kompetenz- und kreativitätssteigernde Funktionen seien. Auf eben diesen Effizienz- und Effektivitätsvorteilen beruht das „Shaping Missions“-Tool, indem es individuelle Empfehlungen zum effizienten und effektiven Auf- und Ausbau von Innovationsökosystemen darlegt. Eine besondere Herausforderung besteht dabei in der Umsetzung der konkreten Toolentwicklung: Welches Format und in welchem Design muss das Tool gestaltet werden, damit es die Komplexität der Materie herunterbrechen und verringern kann und dabei die Nutzer:innenorientierung aufrechterhält? Wie nicht nur die inhaltliche, sondern auch die darstellerische Komponente gelingen kann, bleibt im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs unbeantwortet. Aus diesem Grund wurde das „Shaping Missions“-Tool entwickelt.

3 Toolentwicklung

Die Entwicklung des digitalen „Shaping Missions“-Tool erfolgte in mehreren Schritten. Die Basis für die qualitative und quantitative Studie bildete eine Literaturrecherche. Die Untersuchungen fokussierten sich auf Merkmale von missionsorientierten Innovationsökosystemen sowie bestimmte Kombinationen von Ökosystembedingungen, die Aussagen darüber erlauben, wie missionsorientierte Innovationsökosysteme ihr strategisches Design erfolgreich auf ihre Mission(en) ausrichten können. Aufbauend auf der Literaturrecherche wurden virtuell über ein Videokonferenz-Tool halbstrukturierte Interviews geführt, die durchschnittlich 58 Minuten dauerten. Die Stichprobe umfasste 23 Personen, die entweder eine Führungs-, Koordinations- oder Projektmanagementposition innehaben. Die Stichprobe umfasste ausschließlich missionsorientierte Innovationsökosysteme, die sich in ihrer Größe und Reichweite, den beteiligten Akteuren, den behandelten Herausforderungen und den verfolgten Missionen unterscheiden. Die Innovationsökosysteme wurden im Hinblick auf mehrere Variablen analysiert, darunter das zu lösende Problem, die Innovationstreiber, die Zieldimensionen, die Vielfalt der beteiligten Akteure und ihre funktionalen Rollen, die Art der Steuerung, die Methoden des Transfers und die Beweggründe. Die Erkenntnisse der Interviews wurden durch eine Dokumentenanalyse von Website-Informationen, Pressemitteilungen und Strategiepapieren ergänzt. Die Analyse der qualitativen Studie wurde mittels der Qualitativen Komparativen Analyse (kurz: QCA) durchgeführt (Ragin 2000, 2009; Schneider und Wagemann 2012). Diese Methode integriert die Vorteile sowohl qualitativer als auch quantitativer Methoden, da es sich um eine hybride Methode handelt, die auf Boolescher Algebra basiert und einen Mittelweg zwischen qualitativen Fallstudien und quantitativen statistischen Methoden bildet. QCA zeigt nicht nur die Beziehung zwischen einer Reihe von Bedingungen und einem bestimmten Ergebnis, sondern auch kausale Beziehungen zwischen einer Konfiguration von Bedingungen und einem Ergebnis. Dementsprechend erfasst die QCA sowohl komplexe als auch gleichwertige Kausalität (Schneider und Wagemann 2007). So konnten Rückschlüsse auf bestimmte Merkmalskombinationen gezogen werden, die in bestimmten Innovationsökosystemen auftauchen.

Um die Ergebnisse der qualitativen Studie zu bestätigen und vorhandene Lücken zu schließen, wurde eine zusätzliche quantitative Studie durchgeführt. Die Stichprobe der quantitativen Studie umfasst 200 Unternehmen aus den wirtschaftlich führenden Industriebranchen in Deutschland: Automobil, chemische Industrie, Elektrotechnik und Maschinenbau. Die Telefonbefragung wurde mit Personen aus der Forschungs- und Entwicklungsabteilungsleitung bzw. dem Senior Management durchgeführt. Die Befragung erfolgte mittels eines strukturierten, literaturbasierten Fragebogens, der auf den Fragen der qualitativen Studie basiert.

Die Forschungserkenntnisse aus den durchgeführten Studien zeigen Merkmale von missionsorientierten Innovationsökosystemen sowie bestimmte auftretende Kombinationen auf. Diese Merkmale und Bedingungen sind:

- Vielfalt der Partner
- Direktionalität der Transferformate
- funktionale Rollen
- Steuerung und Regelungen
- Nachhaltigkeitsfokus

Diese fünf Konditionen wurden im „Shaping Missions“-Tool entsprechend in fünf Schritte übersetzt. Die fragebogen-ähnlichen Schritte bestehen jeweils aus einer Frage und verschiedenen Antwortmöglichkeiten, aus denen die zutreffenden Antworten ausgewählt werden können. Das „Shaping Missions“-Tool wurde in Zusammenarbeit mit einem fachlich diversen Expert:innenbeirat des Forschungsprojekts iterativ entwickelt und durchlief mehrere Feedbackschleifen. Nach Entwicklung des ersten Prototyps, dienten mehrere User-Testings schließlich der Anpassung an User-Freundlichkeit, Handhabbarkeit und Inklusion des digitalen Tools. Dazu wurden Vertreter:innen der Fraunhofer-Leistungszentren als potenzielle Nutzer:innen des Tools, als Stichprobe gewählt. Alle Testungen durchliefen denselben strukturierten Ablauf und fanden online über die eine Videokonferenzplattform statt. Die User-Testings wurden für die nachgelagerte Auswertung aufgezeichnet und protokollartig dokumentiert. Die Testung erfolgte mithilfe der Think-Aloud Methode oder auch bekannt unter: Protokollanalyse, Methode des Lauten Denkens, Gedankenprotokoll, Talkaloud Interview oder Verbal Protocol. Die Methode wird unter anderem in der Produkt- und Usability Forschung eingesetzt, um Informationen zu vorhandenen Schwachstellen oder Missverständnissen zu erhalten (Bowles 2010; Ericsson und Simon 1980, 1993). Die Think-Aloud-Protokolle gehören zu den gängigsten Methoden der Usability-Evaluation, da diese helfen, Usability-Probleme zu entdecken und Verbesserungen zu prüfen. Die Methode liefert direkte Informationen über das Denken und die kognitiven Prozesse einer Nutzer:in (Doi 2021). Während der Testung des Prototyps wurden die Proband:innen dazu aufgefordert, ihre Gedanken und Gefühle während der Handlungen zu verbalisieren. Es wurde eine Kombination aus der Think-Aloud Methode und einer anschließenden standardisierten Befragung durchgeführt. Für die Befragung wurde ein Leitfaden entwickelt, welcher die teilnehmenden Personen nach der Nutzung des Prototyps nach Verständlichkeit, Hürden und Nützlichkeit fragt:

- Wie haben Sie sich bei der Nutzung gefühlt?
- Sind Inhalte und Texte verständlich und übersichtlich aufbereitet?
- Wo liegen mögliche Hürden bei der Bedienung des Tools?
- Wie hilfreich sind die Ergebnisse?
- Benötigen Sie weitere Informationen zur Benutzung des Tools?
- Haben Sie Wünsche oder sonstige Anmerkungen zu dem gerade getesteten Tool?

Das Tool wurde daraufhin adaptiert und in die finale Version überführt.

Aus der Literaturrecherche, der quantitativen und der qualitativen Befragung konnten die im Folgenden dargelegten Schlüsse gezogen werden. Zu den relevanten Konditionen für ein missionsorientiertes Innovationsökosystem zählt eine heterogene und diverse Partnerstruktur mit Partnern aus der Zivilgesellschaft, Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Des Weiteren ist die Verwendung von bi- und multidirektionalen Kooperationsformaten ein entscheidender Faktor für effektive Missionsorientierung. Darüber hinaus ist es für missionsorientierte Innovationsökosysteme zur Missionserreichung vorteilhaft, alle Innovationsökosystemrollen zu besetzen (Schwimmbeck 2021). Zuletzt ist die Integration der drei Dimensionen von Nachhaltigkeit nicht nur in die Regelungen und Verträge in missionsorientierten Innovationsökosystemen von hoher Bedeutung, sondern auch in die bilaterale und operative Zielsetzung mit Kooperationspartnern. Dabei handelt es sich um die soziale, ökonomische und ökologische Ebene von Nachhaltigkeit nach dem Triple Bottom Line Modell von Elkington (1994).

4 Kontext der Nutzung

Das „Shaping Missions“-Tool soll Entscheidungsträger:innen in missionsorientierten Innovationsökosystemen dazu anregen, ihren aktuellen Ist-Zustand zu reflektieren, um diesen aus- oder aufbauen zu können. Die Fragebogen-ähnliche Struktur des Tools stellt dabei eine leicht zugängliche und triviale Art dar, Informationen abzufragen. Auf Grundlage der Antworten zum Ist-Zustand werden individuelle Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Ausrichtung auf Missionsorientierung im eigenen Innovationsökosystem aufgezeigt. Bei der Beantwortung geht es insbesondere um den aktuellen Stand des Innovationsökosystems und nicht um zukünftig geplante Entwicklungen. Dies stellt sicher, dass passgenaue Handlungsempfehlungen dargelegt werden können. Die Bearbeitungsdauer für das online kostenlos zur Verfügung gestellte Tool variiert zwischen 30 und 60 Minuten, je nach Intensität der Nutzung. Wird das Tool im Team und nicht als Individuum benutzt und gleichzeitig als Diskussionsgrundlage verwendet, kann die Nutzungsdauer steigen.

Das Tool kann in verschiedenen Phasen und Situationen einen positiven Effekt auf das Innovationsökosystem haben. In der Entstehungsphase eines Innovationsökosystems kann das Shaping Mission Tool sowohl hilfreich im Ausbau als auch im Hinblick auf die Ausrichtung der Mission(en) sein. Des Weiteren kann es auch als Managementinstrument angewendet werden, um strategisch und vorausschauend zu planen und vorhandene Wissenslücken zu schließen. Ebenso kann das Tool in Projektphasen eingesetzt werden, in denen das Projekt stagniert und eine Lösungsstrategie fehlt. Die Impulse aus der Anwendung des Tools können beispielsweise dazu genutzt werden, um in den Dialog mit den Kooperationspartner:innen zu treten und Aktivitäten auf gemeinsam verfolgte Missionen auszurichten. Dies ist besonders vor dem Hintergrund großer gesellschaftlicher Herausforderungen und dem zunehmenden Bedarf an missionsorientierten Kollaborationen von Relevanz.

5 Inhalt

Mit Klick auf die Website www.shaping-missions.de gelangt die Nutzer:in zunächst auf eine Startseite. Auf dieser Startseite werden Hintergründe des Tools und eine Nutzungsanleitung aufgezeigt. Im ersten inhaltlichen Schritt wird die Diversität der Partner im Innovationsökosystem näher betrachtet. Dazu kann die Nutzer:in aus einer Liste von potenziellen Partnern aus den Sektoren Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Wissenschaft wählen, mit welchen sie aktuell bereits kooperieren. Auch die eigene Position im Innovationsökosystem wird mit den gleichen Antwortmöglichkeiten abgefragt. Im zweiten Schritt werden die verschiedenen Kooperationsformate, die in dem Innovationsökosystem mit wirtschaftlichen, wissenschaftlichen, politischen oder gesellschaftlichen Partnern eingesetzt werden, reflektiert. Der Transfer von Wissen, Expertise und Technologien kann in Form von uni-, bi- oder multidirektionalen Formaten erfolgen. Die Nutzer:innen können aus verschiedenen Formaten auswählen, in welcher Form sie mit welchen Akteuren zusammenarbeiten. Zu den

Auswahlmöglichkeiten der Kooperationsformate mit der Wissenschaft zählen beispielsweise Beratung durch Akteure aus der Wissenschaft und Veröffentlichung von Publikationen mit Akteuren aus der Wissenschaft. Zu Kooperationsformaten mit der Politik gehören unter anderem die Politikberatung oder das Erstellen von Gutachten. Die Auswahl zu gesellschaftlichen Kooperationsformaten beläuft sich z.B. auf Dialogformate oder Reallabore und Formate mit Wirtschaftsakteuren sind unter anderem Auftragsforschung oder das Eingehen von Joint Ventures.

Die Innovationsökosystemrollen sowie der Zweck der Kooperation mit den einzelnen Partnern werden im nächsten Schritt bestimmt. Zu den typischen Rollen in missionsorientierten Innovationsökosystemen zählen:

- Unterstützung bei der Umsetzung der Lösung
- Unterstützung bei der Verarbeitung der Lösung
- Unterstützung im Innovations- und Strategieprozess
- Unterstützung bei der Integration von Nachhaltigkeit
- Erweiterung des Wissenstandes
- Schaffung von Ressourcen für Kollaboration/Innovationsaktivitäten
- Koordination und Aufgabendefinition des Ökosystems.

Um die Nachhaltigkeitsorientierung sowie die Verankerung sozialer, ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeitsaspekte in Regelungen, Verträgen oder Abmachungen zu bestimmen, befassen sich Schritt vier und fünf mit Nachhaltigkeit im Innovationsökosystem. Hier ist die Nutzer:in dazu aufgefordert die Ziele in der Zusammenarbeit mit den Partnern aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft zu reflektieren. Die abgefragten Ziele lauten: Wirtschaftswachstum und Innovationsstandort sichern (ökonomische Nachhaltigkeit), Lebensqualität der Menschen erhöhen (soziale Nachhaltigkeit) und zum Umweltschutz beitragen (ökologische Nachhaltigkeit). Der letzte Schritt des Tools fragt nach der Integration der drei Nachhaltigkeitsdimensionen in den Verträgen und Regelungen mit den Kooperationspartnern im Innovationsökosystem. Am Ende der Nutzung werden anhand eines Barometers alle Antworten und Empfehlungen aufgezeigt und anhand einer Punkteskala visualisiert (vgl. Bild 6). Somit kann die Nutzer:in auf einen Blick erkennen, wo die kritischen Elemente in ihrem Innovationsökosystem liegen beziehungsweise wo Punkte fehlen. Dies unterstreicht zusätzlich den gesamten Handlungsbedarf. Darüber hinaus werden die Ergebnisse zum Herunterladen und Weiterverwenden als PDF bereitgestellt.

Um das Tool greifbarer darzustellen, soll an dieser Stelle ein fiktives Beispiel herangezogen werden. In diesem Fall handelt es sich um ein kleines oder mittelständisches Industrie-Unternehmen (kurz: KMU), welches alle Schritte des Tools, wie beschrieben, durchlaufen ist und auf der letzten Seite folgende Zusammenfassungen erhält (siehe Bilder 1-6). Das KMU, welches hier als Beispiel herangezogen wird, befindet sich in einem eher homogenen Innovationsökosystem (vgl. Bild 1). In dem Innovationsökosystem sind Vertreter:innen aus der Wirtschaft und Wissenschaft involviert. Dies ergibt zwei von vier möglichen Punkten, da zwei von vier möglichen Sektoren im Innovationsökosystem vertreten sind. Mit dieser Punktvergabe wird die Diversität dargestellt und das Ergebnis zusammengefasst. Zusätzlich werden bei den Handlungsempfehlungen Inspirationen und Ideen für die Zukunft aufgezeigt. Dabei werden Akteure genannt, die bisher noch nicht im Ökosystem eingebunden sind. In diesem Fall zum Beispiel Think Tanks.

01_Diversität Eurer Partner ^

 2 von 4 Punkten

Ergebnis

Es handelt sich um ein eher homogenes Ökosystem mit einheitlichen Akteuren und weniger Vielfalt.


Handlungsempfehlung:

In Eurem Ökosystem fehlen noch Partner aus der Politik und Gesellschaft. Habt ihr schon mal über den Mehrwert nachgedacht, welchen eine Kooperation mit Gemeinnütziger Think Tank, und einzelne Bürger:innen Euch bringen könnte?

Bild 1: Diversität der Partner

Bei den Kooperationsformaten wird zwischen uni-, bi- und multidirektionalen Kooperationsformaten unterschieden. In diesem Fall erreicht das fiktive Unternehmen einen von vier Punkten (vgl. Bild 2), da es quantitativ mehrheitlich auf unidirektionale Formate im Innovationsökosystem zurückgreift. Hier besteht Verbesserungspotenzial im Bereich der eingesetzten Kooperationsformate. Bisher handelt es sich um weitgehend unidirektional und linear ausgerichtete Formate. Um dies zu ändern, werden einige bi- und multidirektionale Formate als Handlungsempfehlungen aufgezeigt, wie z.B. Citizen Science.

02_Kooperationsformate ^

 1 von 4 Punkten

Ergebnis

Bei den Kooperationsformaten Eures Ökosystems überwiegen eher unidirektionale und linear ausgerichtete Formate in der klassischen „Sender- Empfänger“-Logik.“

Handlungsempfehlung:

Für Euer Ökosystem hat sich insbesondere die Nutzung multidirektionaler Formate als erfolgreich erwiesen. Probiert es doch mal mit Citizen Science, Inkubatorprogramme, F&E-Auftragsforschung oder für die breite Öffentlichkeit zugängliche Vorträge & Veranstaltungen.

Bild 2: Kooperationsformate

Die Vertreter:innen eines Innovationsökosystems können verschiedene Rollen und damit Funktionen einnehmen. In dem Innovationsökosystem des Unternehmens werden bisher nicht alle Ökosystemrollen besetzt, weshalb hier Handlungsspielraum vorhanden ist (vgl. Bild 3). Auf der Punkteskala gibt es nur einen von vier Punkten, da die vorhandenen Rollen in nur einem von vier Sektoren vorkommen. Das Unternehmen müsste weitere Partner akquirieren, die die fehlenden Rollen

übernehmen und somit die Missionsorientierung des Ökosystems stabilisieren. Zusätzlich wird auf ein weiteres Tool verwiesen, welches sich ausschließlich mit den Ökosystemrollen beschäftigt.

03_Ökosystemrollen ^

1 von 4 Punkten

Ergebnis

In Eurem Ökosystem sind die Rollen Unterstützung bei der Umsetzung der Lösung, Unterstützung bei der Verbreitung der Lösung, Unterstützung im Innovations- & Strategieprozess, Erweiterung des Wissensstandes vorhanden. Dabei fehlen Euch die Rollen Unterstützung bei der Integration von Nachhaltigkeit, Schaffung von Ressourcen für Kollaboration / Innovationsaktivitäten, Koordination & Aufgabendefinition des Ökosystems.

Handlungsempfehlung:

Für Euer Ökosystem hat es sich bewährt, alle Rollen im Ökosystem zu platzieren. Wer könnte in Eurem Ökosystem diese Rolle/n zukünftig übernehmen? Solltet Ihr dabei Schwierigkeiten haben, probiert es doch mal mit dem Innovation Ecosystem Strategy Tool. Das Tool unterstützt Euch unter anderem dabei, blinde Flecken zu identifizieren und den Mehrwert noch nicht vorhandener Rollen greifbar zu machen.

Bild 3: Besetzung der Ökosystemrollen

Die Fokussierung auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit sind für missionsorientierte Innovationsökosysteme erfolgskritisch. Die Reflektion der verfolgten Nachhaltigkeitsziele in der Zusammenarbeit mit den Partnern aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft wird in diesem Schritt forciert. Missionsorientierte Innovationsökosysteme sollten sowohl wirtschaftliche, ökologische als auch soziale Ziele mit ihren Partnern aus allen vier Sektoren verfolgen. Das beispielhafte KMU hat hier nur einen von vier Punkten und wird daher aufgefordert, die eigene Zielsetzung zu reflektieren und bei Bedarf mit weiteren Akteuren in Verbindung zu treten, um die fehlenden Perspektiven im Innovationsökosystem einbringen zu können (siehe Bild 4).

04_Nachhaltigkeitsorientierung ^

1 von 4 Punkten

Ergebnis

In Eurem Ökosystem werden die Nachhaltigkeitszielen Wirtschaftswachstum & Innovationsstandort sichern, Lebensqualität der Menschen erhöhen anvisiert.

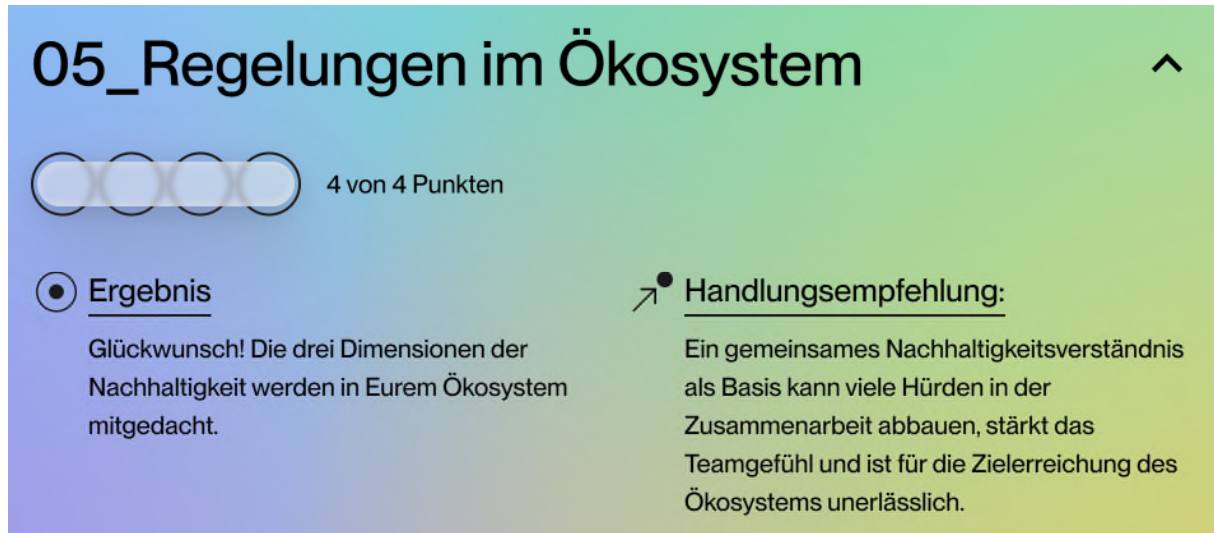
Handlungsempfehlung:

Als missionsorientiertes Ökosystem sind alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in Euren Kooperationen unerlässlich. Beachtet, dass hierfür Kooperationen mit weiteren Akteuren relevant werden können.

Bild 4: Ausrichtung der Nachhaltigkeitsorientierung

Im letzten Schritt erreicht das fiktive Unternehmen die volle Punktzahl da es bereits alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in den bestehenden Regelungen und Vereinbarungen berücksichtigt

(siehe Bild 5). Auf Grundlage der restlichen Ergebnisse, mangelt es augenscheinlich an der praktischen Umsetzung des theoretisch Festgeschriebenen. Hier liegt Handlungsbedarf beim KMU.



05_Regelungen im Ökosystem

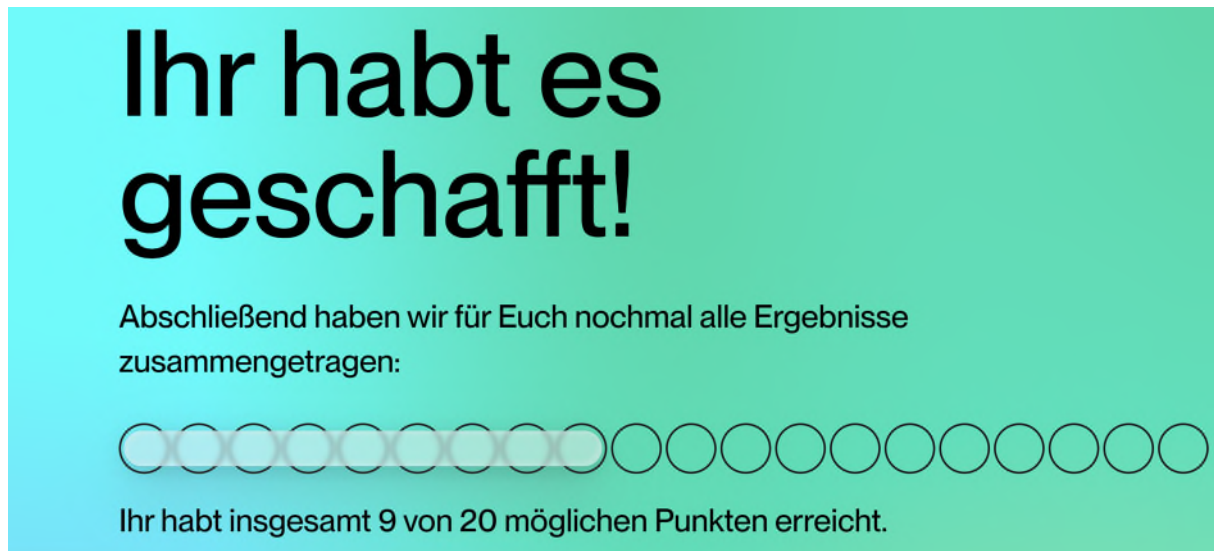
4 von 4 Punkten

Ergebnis
Glückwunsch! Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit werden in Eurem Ökosystem mitgedacht.

Handlungsempfehlung:
Ein gemeinsames Nachhaltigkeitsverständnis als Basis kann viele Hürden in der Zusammenarbeit abbauen, stärkt das Teamgefühl und ist für die Zielerreichung des Ökosystems unerlässlich.

Bild 5: Regelungen im Innovationsökosystem im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Am Ende werden alle Punkte im Ökosystem-Barometer zusammengetragen. Die Organisationen können insgesamt maximal 20 Punkte erreichen. Je mehr Punkte erreicht werden, desto erfolgssicherer ist das missionsorientierte Innovationsökosystem bereits aufgestellt. In Bild 6 ist ersichtlich, dass es noch Verbesserungspotenziale für das KMU gibt. Dieses kann ihre Missionsorientierung im Innovationsökosystem noch optimieren, in dem es die gegebenen Handlungsempfehlungen des Tools umsetzt.



Ihr habt es geschafft!

Abschließend haben wir für Euch nochmal alle Ergebnisse zusammengetragen:

Ihr habt insgesamt 9 von 20 möglichen Punkten erreicht.

Bild 6: Abschlussbarometer

6 Diskussion

Damit das Tool langfristig relevant und hilfreich bleibt, müssen in regelmäßigen Abständen die Inhalte evaluiert und angepasst werden. Dafür müssen zum einen die dem Tool zugrundeliegenden Forschungsgrundlagen in regelmäßigen Abständen auf ihre Aktualität hin überprüft und bei Bedarf die Inhalte des Tools iterativ an den aktuellen Forschungsstand angepasst werden. Eine weitere Validierung neben dem User-Testing mit dem Prototypen des Tools wurde aus Zeitgründen nicht

durchgeführt. Zum anderen werden die Nutzer:innen nach Durchlaufen des Tools um ein kurzes Feedback gebeten, womit ebenfalls auf aktuelle Bedarfe eingegangen werden kann. Es ist zu beachten, dass das Tool keine Substitution zu tiefergehenden Strategieprozessen innerhalb von Organisationen darstellt, sondern lediglich als Reflexionshilfe, Impulsgeberin und Richtungsweiserin fungieren kann. Um nachhaltig und langfristig eine Wirkung zu erzielen, die darüber hinaus geht, müsste das Tool im Zusammenhang mit anderen Methoden und Maßnahmen eingesetzt werden, wie bspw. Workshopformate, empirische Erhebungen oder Einbezug von externer Expertise.

In Bezug auf die eingangs dargelegten Forschungsfragen, lässt sich festhalten, dass die zugrundeliegende qualitative und quantitative Forschung Aufschluss über typische Merkmale missionsorientierter Innovationsökosysteme geben konnte, welche im „Shaping-Missions“-Tool die Grundlage bilden (*Welche Strukturen müssen bei Innovationsökosystemen vorhanden sein, damit sie ihre Mission(en) erzielen können?*). Jedoch kann die erfolgssichernde Komponente lediglich anhand der Existenz der Merkmalskombinationen deklariert werden, da die evaluativen Items im quantitativen Fragebogen zu keinem signifikanten Ergebnis führten. Dies müsste in künftiger Forschung weitergehend untersucht werden. Das „Shaping-Missions“-Tool schafft es jedoch, komplexe Strukturen in missionsorientierten Innovationsökosystemen nutzer:innenorientiert abzufragen und diese visuell aufbereitet zur weiteren Verwertung zur Verfügung zu stellen (*Wie können diese Strukturen in einem Tool für Praktiker:innen nutzbar gemacht werden?*).

7 Fazit und Ausblick

Der Einsatz von digitalen Managementinstrumenten in Innovationsprozessen kann in vielerlei Hinsicht für Organisationen von Bedeutung sein. Sie dienen als Hilfsinstrumente für Entscheidungsträger:innen und erleichtern die Einführung von transformativen Maßnahmen innerhalb der Organisation. Das „Shaping Missions“-Tool hat das Ziel, entscheidungsbefugte Personen in Innovationsökosystemen dabei zu unterstützen, den strategischen Unterbau ihres Innovationsökosystems auf ihre Mission(en) hin auszurichten. In der Initiativphase eines Innovationsökosystems kann das Tool richtungsweisend, unterstützend und sensibilisierend beim Aufbau des Netzwerkes, der Etablierung der Kooperationsformate oder der Einbettung von Nachhaltigkeitsaspekten fungieren. Während es bei bereits bestehenden Innovationsökosystemen eine reflexive Funktion einnimmt, die Entscheidungsträger:innen dabei helfen kann, ihre Mission(en) (wieder) in den Fokus ihres Innovationsökosystems zu stellen, ohne dabei auf Vorerfahrungen zurückgreifen zu können. Das „Shaping Missions“-Tool hilft Entscheidungsträger:innen in missionsorientierten Innovationsökosystemen dabei, ihre Kollaborationen zu analysieren und zu optimieren. Indem es individuelle Empfehlungen zum Auf- und Ausbau von Innovationsökosystemen formuliert, kann die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Wirtschaft zielorientiert, effektiv und letztlich missionsorientiert gestaltet werden.

Innovationsprozesse müssen im Kontext von den großen globalen Herausforderungen missionsorientiert entwickelt werden (Breitinger et al. 2021; Lindner et al. 2021). Damit Innovationsökosysteme ihre Mission(en) zielgerichtet verfolgen können, braucht es Methoden, auf welche Organisationen zurückgreifen können, um sicherzustellen, dass sie in ihrem Innovationsökosystem alle relevanten Merkmale berücksichtigen. Hier setzt das „Shaping Missions“-Tool an. Zukünftige Forschung könnte tiefergehende Transformationsprozesse untersuchen, und beispielsweise die Auswirkung des Tools bei Umsetzung der Handlungsempfehlungen untersuchen. Dies wäre z.B. durch einen Vergleich festgelegter Parameter vor und nach Nutzung des Tools realisierbar.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt allen Projektbeteiligten, meinem Projektvorgänger Malte Jütting und meinen Kolleginnen Sabine Loos, Julia Striepe und Annika Weseloh.

Literaturverzeichnis

- Adner 2007 ADNER, Ron: Match Your Innovation Strategy to Your Innovation Ecosystem. In: *Harvard business review* 84 (2006), Nr. 4, S. 98-107.
- Bowles 2010 BOWLES, Melissa: *The think-aloud controversy in second language research*. New York: Routledge, 2010.
- Breitinger et al. 2021 BREITINGER, Jan; EDLER, Jakob; JACKWERTH-RICE, Thomas; LINDNER, Ralf; SCHRAAD-TISCHLER, Daniel: *Good-Practice-Beispiele für missionsorientierte Innovationsstrategien und ihre Umsetzung*. Gütersloh: Bertelsmann-Stiftung, 2021.
- Carayannis und Campbell 2009 CARAYANNIS, Elias G. und CAMPBELL, David F. J.: 'Mode 3' and 'Quadruple Helix': Toward a 21st Century Fractal Innovation Ecosystem. In: *International Journal of Technology Management* 46 (2009), Nr. 3/4, S. 201-233.
- Doi 2021 DOI, Toshihisa: Usability Textual Data Analysis: A Formulaic Coding Think-Aloud Protocol Method for Usability Evaluation. In: *Applied Sciences* 11 (2021), S. 7047.
- Elkington 1994 ELKINGTON, John: Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. In: *California Management Review* 36 (1994), S. 90-100.
- Ericsson und Simon 1890 ERICSSON, K. Anders; SIMON, Herbert: Verbal reports as data. In: *Psychological Review* 87 (1980), Nr. 3, S. 215–251.
- Ericsson und Simon 1993 ERICSSON, K. Anders und SIMON, Herbert: *Protocol analysis: Verbal reports as data*. 2. Aufl. Boston: MIT Press, 1993.
- Huber 2013 HUBER, Anton S.: Das Ziel Digital Enterprise: die professionelle digitale Abbildung von Produktentwicklung und Produktion. In: SENDLER, U Ulrich (Hrsg.): *Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 111-124.
- Huesig und Endres 2019 HUESIG, Stefan; ENDRES, Herbert: Exploring the digital innovation process: The role of functionality for the adoption of innovation management software by innovation managers. In: *European Journal of Innovation Management* 22 (2019), Nr. 2, S. 302-314.
- Jütting 2020 JÜTTING, Malte: Exploring Mission-Oriented Innovation Ecosystems for Sustainability: Towards a Literature-Based Typology. In: *Sustainability* 12 (2020), Nr. 16, S. 1-28.
- Kuhlmann und Rip 2018 KUHLMANN, Stefan; RIP, Arie: Next-Generation Innovation Policy and Grand Challenges. In: *Science and Public Policy* 45 (2018), Nr. 4, S. 448–454.
- Lindner et al. 2021 LINDNER, Ralf; EDLER, Jakob; HUFNAGL, Miriam; KIMPELER, Simone; KROLL, Henning; ROTH, Florian; WITTMANN, Florian; YORULMAZ, Merve: *Missionsorientierte Innovationspolitik: Von der Ambition zur erfolgreichen Umsetzung. Perspektiven Policy Brief Nr. 2*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2021.
- Mazzucato 2018 MAZZUCATO, Mariana: Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. In: *Industrial and Corporate Change* 27 (2018), Nr. 5, S. 803–815.
- Mazzucato und Dibb 2019 MAZZUCATO, Mariana; DIBB, George: *Missions: A beginner's guide*. UCL Institute for Innovation and Public Purpose. *Policy Brief series Nr. 9*, 2019.

- Ragin 2000 RAGIN, Charles C.: *Fuzzy-Set Social Science*. Chicago: University of Chicago Press, 2000.
- Ragin 2009 RAGIN, Charles C.: Qualitative Comparative Analysis Using Fuzzy Sets (Fsqca). In: Rihoux, Benoît; Ragin, Charles C. (Hrsg.): *Configurational Comparative Methods: Qualitative Comparative Analysis (Qca) and Related Techniques*. SAGE Publications, 2009, S. 87-122.
- Schneider und Wagemann 2007 SCHNEIDER, Carsten Q.; Wagemann, Claudius: *Qualitative Comparative Analysis (QCA) Und Fuzzy Sets. Ein Lehrbuch für Anwender und jene, die es werden wollen*. Opladen: Verlag Barbara Budrich, 2007.
- Schneider und Wagemann 2012 SCHNEIDER, Carsten Q.; WAGEMANN, Claudius: *Set-Theoretic Methods for the Social Sciences: A Guide to Qualitative Comparative Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- Schwimmbeck 2021 SCHWIMMBECK, Sabine: *Mission-Oriented Innovation Ecosystems: Co-Evolving Role Architecture and Socio-Technical Change*. Technische Universität München, Department of Science, Technology and Society an der TUM School of Social Sciences and Technology, Masterarbeit, 2021 (noch unveröffentlicht).
- Schütz 2020 SCHÜTZ, Florian: *Das Geschäftsmodell Kollaborativer Innovation: Eine Empirische Analyse Zu Funktionalen Rollen in Quadruple-Helix-Innovationsprozesse*. Technische Universität Berlin, Fakultät der Geistes- und Bildungswissenschaften, Dissertation, 2020.
- United Nations 2015 UNITED NATIONS: *Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development*, 2015.

Probabilistisch entscheiden in der Produktentwicklung

Probabilistic decision-making in product development

Manfred Dangelmaier¹, Katharina Hölzle²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement
manfred.dangelmaier@iat.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement
katharina.hoelzle@iat.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Produktentwicklung ist eine Abfolge von Entwicklungsentscheidungen. Unter Unsicherheit und in prekärer Datenlage versagen unsere gängigen Verfahren zur Entscheidungsunterstützung. Wir schlagen deshalb ein auf den Kolmogorowschen Axiomen und dem Bayesschen Theorem basierendes Single Pass Bayesian Reasoning (SPBR) vor. Es ordnet die Entscheidungsalternativen anhand der Wahrscheinlichkeit, dass die jeweilige Alternative die beste ist. Dazu werden die vorliegenden Evidenzen gesammelt, und mittels Likelihoodverhältnissen die Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Wir zeigen die Anwendung von SPBR in der Produktentwicklung anhand von User Stories. Wir weisen nach, dass SPBR sowohl bei qualitativen Evidenzen als auch mit parametrisierten Kriterien angewendet werden kann. Es ist für subjektive, kollektive und datenbasierte rationale Entwicklungsentscheidungen geeignet. SPBR unterstützt reife Entscheidungen. Bei volatilen Entscheidungssituationen mit wechselnden Handlungsalternativen, bei abhängigen Evidenzen, bei variierender Bedingtheit und bei sehr geringen Ressourcen für Entscheidungen kommt es an seine Grenzen.

Keywords (deutsch):

Entscheidungstheorie, Single Pass Bayesian Reasoning, Entwicklungsentscheidungen

Abstract (english): Product development is a sequence of development decisions. Under uncertainty and sparse data, our current decision support methods fail. We therefore propose a Single Pass Bayesian Reasoning (SPBR) based on Kolmogorov's axioms and Bayes' theorem. It ranks decision alternatives based on the probability that each alternative is the best. For this purpose, the available evidence is collected, and using likelihood ratios, the probabilities are computed.

We demonstrate the application of SPBR in product development by means of user stories. We prove that SPBR can be applied to qualitative evidence as well as with parameterized criteria. It is suitable for subjective, collective, and data-based rational development decisions. SPBR supports maturing decisions. It reaches its limits in volatile decision situations with changing alternative courses of action, with dependent evidence, with varying conditionality, and with very low resources for decisions.

Keywords (english):

Decision Theory, Single Pass Bayesian Reasoning, Development Decisions

1 Problemstellung

Planungs- und Entwicklungsprozesse in der Produktentwicklung können als eine Abfolge von Entscheidungen verstanden werden. Beispiele sind Entscheidungen in eine bestimmte Technologie zu investieren, Investitionsentscheidungen für Maschinen und Anlagen, die Entwicklung eines Produkts weiter zu verfolgen oder nicht. Häufig entscheiden wir dabei unter Unsicherheit und in einem volatilen Umfeld. Dies gilt insbesondere in Krisensituationen, z. B. durch Pandemien, geopolitische Veränderungen, Handelsbeschränkungen, Lieferengpässe und im wachsenden globalen Wettbewerb, in denen sich die Wirtschaft und auch die Produktentwicklung bewähren muss.

Wir erwarten dennoch, dass die getroffenen Entscheidungen rational sind. Darunter verstehen wir in diesem Beitrag, dass sie begründet und vernünftig sind. Oft sind wir uns dessen intuitiv sicher. In unvertrauten Situationen und unter Unsicherheit müssen wir aber mehr nachdenken und Für und Wider abwägen. Zudem müssen wir in vordefinierten Prozessen Entscheidungen oft genehmigen lassen oder Dritten gegenüber begründen. Dafür wurden in der Vergangenheit deterministische Verfahren zur Entscheidungsunterstützung vorgeschlagen und in der Praxis angewandt. Beispiele sind die Nutzwertanalyse (Zangemeister 1976), der Analytical Hierarchical Process (AHP) (Saaty 2012) oder TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) (Hwang und Yoon 1981). Sie bringen Alternativen durch Aggregation von Bewertungen anhand von Kriterien in eine Rangfolge. Es gibt auch Verfahren, die Unsicherheiten berücksichtigen. Bei der Entscheidung unter Risiko gibt es verschiedene Zukunftszustände, die mit Wahrscheinlichkeit eintreten. Man berechnet dann üblicherweise Erwartungswerte als Produkt aus einem quantifizierten Nutzen für den jeweiligen Zukunftszustand mit dessen Eintrittswahrscheinlichkeit (Laux, Gillenkirch und Schenk-Mathes 2019). Summiert man die Erwartungswerte der Entscheidungsalternativen über alle möglichen Zukunftszustände, erhält man die Erwartungswerte der Entscheidungsalternativen. Die Entscheidung wird anhand der Rangfolge dieser Werte getroffen. Dieses Verfahren erlaubt allerdings keine Unsicherheiten bezüglich der anzuwendenden Kriterien, ihrer Erfüllungsgrade oder der Gewichtung der Kriterien.

Alle genannten Verfahren sind kompliziert. Man benötigt mehrere Schritte, um an das Ziel zu kommen. Dies gilt insbesondere für das Entscheiden unter Risiko, wo eine besonders große Zahl an Einzelwerten festgelegt und anschließend aggregiert werden muss. Dabei bildet ein Durchgang durch das Verfahren jeweils nur genau einen Zeitpunkt im Entscheidungsprozess ab. Das Reifen von Entscheidungen über die Zeit und der verbundene Erkenntnisgewinn wird nicht modelliert. Man könnte zwar die Abschätzungen zu verschiedenen Zeitpunkten wiederholen. Aufgrund des immensen Aufwands verzichtet man häufig darauf.

Gibt es nun ein einfaches rationales Verfahren zur Entscheidungsunterstützung, das in volatilen Situationen unter hoher Unsicherheit eingesetzt werden kann, das Reifen einer Entscheidung angemessen modelliert und effizient in der Anwendung ist?

2 Präferabilität statt Nutzwert

In der deterministischen Entscheidungstheorie vergleicht man Nutzenwerte miteinander. Bei der Entscheidung unter Risiko sind es Erwartungswerte des Nutzens. In volatilen Situationen stehen Kriterien, Anforderungen und Spezifikationen jedoch häufig noch nicht fest oder Messwerte aus dem Versuch liegen noch nicht vor. Insbesondere bei Stabsstellen und Beratern mit Anspruch an wissenschaftlich fundierte Arbeitsweise wirft das eine Frage auf: Wie drücken wir die daraus resultierende Unsicherheit angemessen aus?

Eine naheliegende Antwort ist: durch Wahrscheinlichkeiten. Die Wahrscheinlichkeit ist ein mathematisch gut etabliertes Maß, das den Kolmogorowschen Axiomen genügt. Es kann positive Werte zwischen 0 und 1 annehmen. In der Wissenschaft und in der betrieblichen Praxis wird es auch

häufig angewendet, etwa in der schließenden Statistik oder in der Qualitätssicherung. Wir verwenden deshalb anstelle von Nutzwerten oder Erwartungswerten Wahrscheinlichkeiten für die Bildung von Rangfolgen der Entscheidungsalternativen. Konkret beurteilen wir die Wahrscheinlichkeit, dass eine Alternative die beste ist. Wie bezeichnen diese spezielle Wahrscheinlichkeit im Folgenden als Präferabilität, um auszudrücken, dass wir bestimmen, inwiefern eine Alternative im Vergleich zu den anderen präferabel ist, also vor den anderen bevorzugt werden soll.

Wenn man eine für die Problemstellung vollständige Menge voneinander ausschließenden Entscheidungsalternativen hat, dann muss die Summe der Präferabilitäten nach den Kolmogorowschen Axiomen 1 oder 100% ergeben.

Ordnet man also den Entscheidungsalternativen Präferabilitäten zu, indem man die verfügbaren hundert Prozentpunkte auf die Alternativen verteilt, hat man ein subjektives Maß für die Wahrscheinlichkeit gewonnen, dass die jeweilige Alternative die beste ist. Folgt man der sogenannten bayesschen Auffassung von Wahrscheinlichkeit, ist dieses Vorgehen ohne weiteres zulässig. Denn Wahrscheinlichkeit ist hier definiert als ein Grad von Überzeugung (Tschirk 2014 S. 7ff).

3 Interpretation von Präferabilitäten

Präferabilitäten hängen von der Anzahl der betrachteten Alternativen ab. Entscheiden wir bei einem Münzwurf, ob wir auf Wappen oder Zahl setzen, dann können wir keiner Alternative einen Vorzug geben. Die Präferabilität von Wappen und Zahl ist jeweils $1/2$. Setzen wir auf eine Augenzahl beim Würfeln, so beträgt die Präferabilität für jede Alternative $1/6$. Bei m Alternativen nimmt sie also den Wert $1/m$ an. Das ist ein Unterschied zu den nutzenorientierten Ansätzen, wo der Nutzwert oder Erwartungswert nicht von der Anzahl der Alternativen abhängt. Weicht eine Präferabilität von $1/m$ ab, dann gibt es präferablere und weniger präferable Alternativen. Man entscheidet sich für die Alternative mit der höchsten Präferabilität, wenn eine solche existiert, da sie die höchste Wahrscheinlichkeit besitzt, die beste zu sein.

Übersteigt die Präferabilität einer Alternative den Wert $0,5$, so ist sie zu bevorzugen, da dann keine andere eine höhere Präferabilität haben kann. Man ist sich dabei aber nicht sicher, dass sie die beste Alternative ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür liegt unter Umständen eben sehr nahe bei $0,5$. Es besteht dann nahezu maximale Unsicherheit, ob sie die beste Alternative ist. Allerdings ist sie es nach dem Stand des Wissens bzw. der Überzeugung nach am wahrscheinlichsten im Vergleich zu den anderen (Abbildung 1).

Je höher die Präferabilitätswerte zwischen $0,5$ und 1 sind, desto geringer ist die Unsicherheit und damit der freie Handlungsspielraum für den Entscheider. Während eine Entscheiderin bei einer Präferabilität von $0,5$ die wahrscheinlich beste Alternative aus Sicht ihres Beraters kennt, bleibt es aber unsicher, ob die Alternative die beste ist. Eine Präferabilität von etwas über $0,5$ zwingt also noch nicht, sich für die Alternative zu entscheiden oder gegen sie, auch wenn sie die beste Empfehlung ist. Die Entscheidungsfreiheit, die ihr die Alternative lässt, ist fast maximal. Liegt die Präferabilität dagegen z. B. bei $0,95$ so bedeutet das eine hohe Sicherheit, dass die Alternative die beste ist. Der Entscheiderin verbleibt aus Sicht der Empfehlung noch eine Restwahrscheinlichkeit von weniger als 5% , dass eine andere Entscheidung besser ist und damit ein geringer Spielraum.

Wenn die Präferabilität einer Alternative 1 beträgt, dann ist sie sicher die beste. Man kann sie dann zu Recht als alternativlos bezeichnen. Alle anderen Alternativen besitzen dann nämlich notwendig die Präferabilität 0 .

Hat eine Entscheidungsalternative eine Präferabilität von 0 , dann muss man sie ausschließen, da sie mit Sicherheit nicht die beste ist. Anders ausgedrückt: Die Hypothese, dass diese Alternative die beste ist, ist falsifiziert.

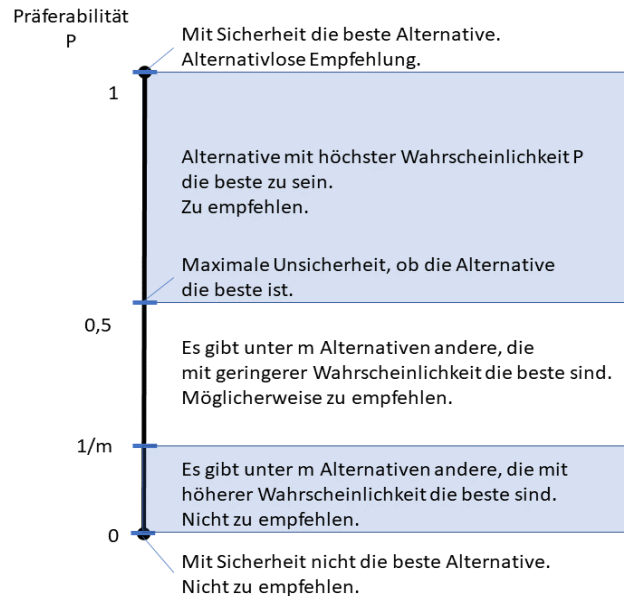


Bild 1: Bedeutung von Präferabilitäten bei m Alternativen

4 Präferabilität aufgrund von Evidenzen

Entscheidungen sind auch unter Unsicherheit keine Glücksspiele wie die oben genannten Beispiele. Es liegen zusätzliche Informationen vor, die die Verteilung der Präferabilitäten zwischen den Alternativen verschieben. Wie kann man diese Verschiebung aus diesen Informationen berechnen? Hier hilft das Bayessche Theorem (Zenker 2013; Bartelborth 2017), das auf Arbeiten von Bayes (Bayes und Price 1763) im 18. und Laplace (Laplace 1814) im 19. Jahrhundert zurückgeht. Es folgt nach heutiger Sicht aus den Kolmogorowschen Axiomen und der Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit. Wir formulieren es anhand zweier Entscheidungsalternativen A und B. Deren Präferabilitäten seien zu Beginn $P(A)$ und $P(B)$. Liegen keine Informationen vor, ist die Situation wie beim Münzwurf und $P(A) = P(B) = 0,5$. Es werde nun eine zusätzliche Information E bekannt. Wir wählen E als Bezeichnung, da bei rationalen Entscheidungen die zusätzlichen Informationen Evidenzen sein sollten, also wissenschaftlich vertretbare Argumente für oder gegen eine Alternative, die auf Beobachtungen und Daten beruhen. Dann kann man das Bayessche Theorem in der Verhältnisform bekanntermaßen wie folgt schreiben

$$\frac{P(A|E)}{P(B|E)} = \frac{P(E|A)}{P(E|B)} \cdot \frac{P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

Auf der linken Seite findet man das interessierende Verhältnis der Präferabilitäten von A und B unter der Bedingung, dass die Evidenz E vorliegt. Ganz rechts steht das Verhältnis der Präferabilitäten, bevor die Evidenz vorliegt. In der Mitte steht ein Verhältnissterm aus zwei Wahrscheinlichkeiten. Man nennt sie Likelihoods. Eine Likelihood ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Evidenz auftritt unter der Bedingung, dass A bzw. B die beste Entscheidungsalternative ist. Das Likelihoodverhältnis LV gibt an, wie sehr die Alternative A im Verhältnis zu Alternative B durch die Evidenz gestützt wird. Die Wahrscheinlichkeiten können definitionsgemäß nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Da man den Bruch aber rechnerisch beliebig erweitern oder kürzen darf, kann man auch andere Werte für das Likelihoodverhältnis LV benutzen. Man könnte also sagen, die Evidenz stützt die Alternative A

doppelt so stark wie Alternative B und das Verhältnis mit 2:1 angeben, z. B. wenn E bedeutet, dass A doppelt so viel einbringt wie B oder wenn A die doppelte Lebensdauer von B aufweist.

Gilt $P(E|A) = 0$, dann heißt das, die Evidenz E kann gar nicht auftreten, wenn die Alternative A die beste ist. Tritt sie doch auf, dann nimmt nach Gleichung 1 auch die Präferabilität $P(A|E)$ den Wert 0 an. Alternative A kann, egal welche anderen Evidenzen für sie sprechen, niemals die beste sein. Die Hypothese, dass A die beste Variante ist, ist mit Sicherheit durch die Evidenz falsifiziert.

Neben Gleichung 1 gilt nach den Kolmogorowschen Axiomen die Normierungsbedingung $P(A|E) + P(B|E) = 1$. Mit beiden Gleichungen kann man die Präferabilitäten $P(A|E)$ und $P(B|E)$ ausrechnen.

5 Bayessche Aktualisierung

Bisher haben wir von einer einzigen Evidenz gesprochen. Wenn mehrere Evidenzen zu berücksichtigen sind, liegt es nahe, den Vorgang iterativ zu wiederholen. Die folgende Schreibweise mit den Evidenzen E_i bringt dies zum Ausdruck.

$$\frac{P(A|E_{i+1})}{P(B|E_{i+1})} = \frac{P(E_{i+1}|A)}{P(E_{i+1}|B)} \cdot \frac{P(A|E_i)}{P(B|E_i)} \quad (2)$$

E_0 steht für das Vorwissen. Es dient der ersten Einschätzung der Präferabilitäten. Danach werden die Evidenzen E_1 bis E_n der Reihe nach berücksichtigt und die Präferabilitäten nach der Formel 2 aktualisiert.

Mit dieser bayesschen Aktualisierung lassen sich bei neu auftretenden Evidenzen die neuen Präferabilitäten in einem Zug sehr schnell und einfach aus ihren Vorgängern berechnen. Bei AHP, TOPSIS oder Nutzwertanalyse dagegen führt jede Iteration zu aufwändigen Neuberechnungen durch zusätzliche Paarvergleiche von Kriterien oder durch Einbeziehung zusätzlicher Koordinaten bei den Abständen der Alternativen.

6 Unabhängigkeit der Evidenzen

Die Reihenfolge der Evidenzen spielt in Gleichung 2 keine Rolle. Die Produkte von Verhältnissen sind kommutativ und assoziativ und können beliebig ausgetauscht und gruppiert werden. Auch die Zeit spielt keine Rolle. Die Evidenzen können gleichzeitig vorliegen oder nacheinander in beliebiger Reihenfolge bekannt werden.

Das bedeutet aber auch, dass die Evidenzen nicht von anderen Evidenzen abhängen, bzw. sich nicht gegenseitig bedingen dürfen. Für die Wahrscheinlichkeiten muss gelten:

$$P(E_i|E_j) = P(E_j|E_i) = P(E_i) \cdot P(E_j) \quad (3)$$

Wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, ist das Verfahren nicht anwendbar. Ähnliches gilt aber auch für die oben genannten deterministischen Verfahren. Unabhängigkeit ist auch dort wichtig. Die Kriterien bzw. Evidenzen, die zur Entscheidung herangezogen werden, müssen sich unterscheiden. Neue Evidenzen, die keine zusätzlichen Informationen enthalten, dürfen die Überzeugung bzw. Entscheidung nicht weiter beeinflussen. Vielmehr verzerrt eine mehrfache Berücksichtigung derselben Aspekte das Ergebnis. Sind Kriterien und Evidenzen abhängig, empfiehlt es sich sie zusammenzufassen bzw. sich für einen Repräsentanten zu entscheiden.

Rational begründet ist eine Überzeugung also dann, wenn sie auf unabhängigen Evidenzen beruht. Das können unabhängige Quellen sein, die denselben Sachverhalt über eine Produkteigenschaft bestätigen oder unabhängige Studien, die zu gleichen oder auch unterschiedlichen Ergebnissen zum

Funktionieren einer Technologie kommen oder Beobachtungen, die einen neuen Aspekt in die Betrachtung einbringen.

Verzerrungen durch abhängige Evidenzen findet man im Alltag häufig. Wachsende Überzeugung wird dabei durch Wiederholung der immer gleichen Aussagen bzw. deren Wahrnehmung erzeugt. Das funktioniert leider auch mit unwahren Behauptungen und Gerüchten anstelle von Evidenzen.

7 Berücksichtigung aller relevanten Evidenzen

Eine qualifizierte rationale Entscheidung erfordert die Berücksichtigung aller relevanter Evidenzen, sowohl solcher, die Alternativen unterstützen als auch solcher, die gegen sie sprechen. Die Beschränkung auf Evidenzen, die Lieblingsalternativen unterstützen, führen zur Verzerrung.

Relevante Evidenzen sind in der Entscheidungspraxis alle zum Entscheidungszeitpunkt verfügbaren Evidenzen, die die Entscheidung beeinflussen können. Die Verfügbarkeit von Evidenzen hängt wiederum von den zur Gewinnung eingesetzten Ressourcen ab sowie von ihrer Zugänglichkeit. Um an Evidenzen zu gelangen, sollte man einen für die Entscheidung angemessenen Aufwand betreiben. Das kritisierte Rosinenpicken wird in der Praxis häufig angewendet, sowohl in persönlichen Entscheidungen als auch im Betrieb. Wenn man genug Gründe für eine Entscheidungsalternative gesammelt hat, entscheidet man sich. Diese einfache heuristische Vorgehensweise vernachlässigt aus Sicht des Bayesschen Theorems neben wichtigen Gegenargumenten auch die Tatsache, dass dieselben Evidenzen für Alternativhypothesen sprechen können.

Beispiel: Im Außenraum tauchen vertrauliche Informationen aus der Entwicklung auf. Als Täter kommen nur Ingenieur A und Ingenieurin B in Frage. Die Indizien sprechen alle gegen A. Man trennt sich schnell entschlossen von ihm und ersetzt ihn durch den weniger erfahrenen Mitarbeiter C. Es werden jedoch weiter Entwicklungsgeheimnisse nach außen getragen. Der Fall wird neu aufgerollt und es fällt auf, dass die Entscheidung gegen A vorschnell war. Die Indizien sprachen genauso gegen Mitarbeiterin B wie gegen Mitarbeiter A.

8 Umgang mit Alternativen

In Entscheidungssituationen sind einander ausschließende und einander ergänzende Alternativen unterschiedlich zu behandeln. So entscheidet man sich z. B. mit einem morphologischen Kasten ausschließlich für eine von mehreren Alternativen, die man im Produkt realisiert. Beim Management eines Produktportfolios verfolgt man jedoch mehrere Produkte parallel. Bei einander ergänzenden Alternativen entscheidet man für jede von ihnen, wenn die Präferabilität größer als 0,5 ist. Falls die Mittel jedoch beschränkt sind, kann man z. B. die Alternativen mit einer Präferabilität größer oder gleich 0,5 in eine Rangfolge bringen und die mit den höheren Präferabilitäten bevorzugen bis die Mittel erschöpft sind. Im Falle sich ausschließender Alternativen ermittelt man hingegen wie oben beschrieben die mit der höchsten Präferabilität.

Treten in einem Entscheidungsprozess neue Alternativen auf, so ändern sich wegen der Normierungsbedingung die Präferabilitäten und müssen neu berechnet werden. Zudem ist zu überlegen, wie sich die vorhandenen Evidenzen im Verhältnis auf die Präferabilität der neuen Variante auswirken.

Bei idealen bayesschen Entscheidern sind die Präferabilitäten wegen der Kolmogorowschen Axiome unabhängig davon, ob man jede Alternative A_i mit allen anderen Alternativen zusammen vergleicht oder mehrere Alternativen einzeln gegeneinander. Bei realen Entscheidern ist das aber nicht der Fall. Wenn er oder sie jeweils unterschiedliche Alternativen vor Augen hat, wird das die subjektive Bestimmung der Likelihoodverhältnisse beeinflussen.

9 Reifende Entscheidungen

Die bayessche Aktualisierung unterstützt reifende Entscheidungen. Diese kann man wie folgt charakterisieren: Aus Wissen über die Welt bzw. ihrer Beobachtung (Evidenzen E_0) kristallisiert sich eine Entscheidungsfrage. Zu dieser entwickelt man als mögliche Antworten Hypothesen zur besten Entscheidung in Form von Entscheidungsalternativen A_i . Im Lauf des Entscheidungsprozesses werden relevante Evidenzen E_i gesucht und iterativ die Präferabilitäten aktualisiert. Dies ist die Phase der reifenden Entscheidung. Mit jeder neu bekanntwerdenden Evidenz verändert sich die Verteilung der Präferabilitäten auf die Alternativen und die Entscheidungsgrundlage wächst. Konvergieren die Präferabilitäten bzw. treten neue Evidenzen nur noch spärlich auf oder ist eine vorgegebene Entscheidungsfrist erreicht, wird die Entscheidung auf der Basis der bis dahin berechneten Präferabilitäten gefällt.

Die einfache iterative Berechnung mittels der bayesschen Aktualisierung unterstützt das Konzept der wachsenden oder reifenden Entscheidung sehr gut. Bei anderen Verfahren der normativen Entscheidungsunterstützung ist der Aufwand bei Berücksichtigung neuer Evidenzen oder Alternativen wesentlich höher.

10 Berücksichtigung von Vorwissen

Bevor die Entscheidung anhand von Evidenzen reifen kann, steht am Anfang der Berechnung nach Formel 2 bei zwei Alternativen ein initiales Präferabilitätsverhältnis $P(A|E_0):P(B|E_0)$, das man zuerst festlegen muss.

Bei m Alternativen muss man ohne Vorwissen jeder Alternative die gleiche Präferabilität $1/m$ zuordnen. Oft ist genau dies das erwünschte Entscheidungsverhalten. Man will ohne Vorurteil an die Auswahl der Varianten herangehen.

Das gilt aber nicht für jede Entscheidung. Manchmal möchte man auch Vorerfahrungen berücksichtigen. Hat sich Funktionsprinzip A nur in 10 Prozent aller Projekte gegen Funktionsprinzip B nach Erprobung durchsetzen können, wählt man ein initiales Präferabilitätsverhältnis von 1:9 zugunsten von Variante B. Man braucht dann starke Evidenzen für die Weiterverfolgung einer Lösung nach dem Funktionsprinzip A. Das Vorwissen oder begründete Vorurteil bremst zwar, verhindert aber bei einer wachsenden Anzahl guter Gründe auf lange Sicht nicht eine Innovation nach Funktionsprinzip A.

11 Fallbeispiel

Anhand eines Fallbeispiels demonstrieren wir unser probabilistisches Entscheidungsverfahren in einer fiktiven, aber realitätsnahen User Journey mit drei User Stories. Im ersten Schritt wird die Anwendung mit qualitativen Evidenzen bzw. Argumenten und subjektiv geschätzten Likelihoodverhältnissen in frühen Phasen gezeigt. Im zweiten Schritt erweitern wir auf eine kollektive Sicht durch Einbeziehung eines Expertenpanels. Im dritten Schritt geht es schließlich um eine Investitionsentscheidung mit vorgegebenen Kriterien und Parametern. Hier werden die Likelihoods nicht geschätzt, sondern über Likelihoodfunktionen präskriptiv bestimmt.

Folgendes Szenario sei gegeben: Herr Müller ist in einem kleineren mittelständischen Unternehmen tätig, das Prüfeinrichtungen für den Anlagenbau entwickelt und produziert. Unter anderem ist er für fertigungsgerechte Entwicklung zuständig. Insbesondere beobachtet er dabei die Entwicklung additiver Fertigungsverfahren A. Die Frage erhebt sich, ob sie bei den Sondenhaltern die bisher angewendeten spanenden Verfahren S ablösen sollen.

11.1 Subjektive Likelihoods im Technologiemonitoring

Herr Müller sucht also Präferabilitäten $P(A|E)$ und $P(S|E)$, die in seinem Alternativenraum A und S zusammen 1 ergeben müssen. Dazu sammelt er qualitative Evidenzen, zu denen er aus seiner Sicht Likelihoodverhältnisse $L(E_i|A):L(E_i|S)$ schätzt. Da er unvoreingenommen an die Sache herangehen will, beginnt er mit gleicher Präferabilität 0,5 für A und S. Mit einer Tabellenkalkulation rechnet er schrittweise die Präferabilitäten nach Gleichung 3 aus. Er erhält als Ergebnis die Tabelle 1.

Tabelle 1: Subjektive Präferabilitäten für additive und spanende Fertigung von Sondenhaltern

$P(A E)$	$P(S E)$	$L(E A)$	$L(E B)$	Evidenz
0,50	0,50	1,2	1	Beliebige Geometrien bei A realisierbar
0,55	0,45	0,9	1	Eingeschränkte Oberflächenqualität bei A
0,52	0,48	0,8	1	Werkstoffhomogenität bei A nicht gewährleistet
0,46	0,54	1,2	1	Maschinenprogrammierung entfällt bei A
0,51	0,49	0,9	1	Teile aus A mechanisch geringer beanspruchbar
0,48	0,52	1,4	1	Werkstoffkosten geringer bei A
0,57	0,43	1	1,2	CAD-Aufbereitung bei A erforderlich (STL)
0,52	0,48	1,3	1	Weniger Umrüstaufwand bei A
0,59	0,41	1,3	1	Werkzeugkosten bei A entfallen
0,65	0,35	1,3	1	A auch mit angelernten Mitarbeitern
0,71	0,29	1	1,2	S ermöglicht wesentlich geringere Toleranzen
0,67	0,33	2	1	A bei kleinen Losgrößen günstiger
0,80	0,86	1,3	1	Weniger Abfall zu recyceln bei A
0,84	0,16			

Als er so weit gekommen ist, fragt ihn der Entwicklungsleiter, wie er denn die Chancen für die additive Fertigung von Sondenhaltern einschätzt. Er antwortet, dass sie 84:16 für die additive Fertigung gegenüber der spanenden Fertigung stehen. Der Produktionsleiter ist erstaunt über die genauen Zahlen und lässt sich erklären, wie Herr Müller darauf gekommen ist. Er ist beeindruckt, würde die Sicht von Herrn Müller aber gern durch andere Fachleute absichern.

11.2 Kollektive Likelihoods zur Abstimmung im Netzwerk

Herr Müller setzt zu diesem Zweck eine kleine Onlineumfrage auf und bittet Kollegen und Kunden aus seinem Netzwerk um Mitwirkung mit dem Versprechen, dass er das Ergebnis der kleinen Übung mit ihnen teilt. Dabei erklärt er die Vorgehensweise und lässt die Mitwirkenden ihre eigenen Einschätzungen der Likelihoods geben. Er rechnet Mittelwerte und Standardabweichungen SD der Likelihoodverhältnisse LV aus und erhält das Ergebnis in Tabelle 2.

Die Präferabilitäten des Kollektivs für die additive Fertigung decken sich mit 90:10 gegenüber 84:16 im Wesentlichen mit denen von Herrn Müller und bestätigen damit seine Einschätzung. Eine große Streuung (SD) in den Einschätzungen gibt es jedoch bei den Likelihoodverhältnissen zu Toleranzen, Oberflächenqualität und Festigkeit. Hierüber könnte man sich durch Versuche jedoch Klarheit verschaffen, meinen Herr Müller und sein Entwicklungsleiter.

Tabelle 2: Kollektive Präferabilitäten für additive (A) und spanende (S) Fertigung von Sondenhaltern mit Mittelwerten der Likelihoodverhältnisse \overline{LV} und Standardabweichungen SD

P(A E)	P(S E)	\overline{LV}	SD	Evidenz
0,50	0,50	1,11	0,20	Beliebige Geometrien bei A realisierbar
0,53	0,47	1,12	0,52	Eingeschränkte Oberflächenqualität bei A
0,55	0,45	0,69	0,23	Werkstoffhomogenität bei A nicht gewährleistet
0,46	0,54	1,21	0,16	Maschinenprogrammierung entfällt bei A
0,51	0,49	1,26	1,02	Teile aus A mechanisch geringer beanspruchbar
0,57	0,43	1,54	0,14	Werkstoffkosten geringer bei A
0,67	0,33	1,07	0,26	CAD-Aufbereitung bei A erforderlich (STL)
0,68	0,32	1,23	0,35	Weniger Umrüstaufwand bei A
0,73	0,27	1,26	0,45	Werkzeugkosten bei A entfallen
0,77	0,23	1,20	0,36	A auch mit angelegerten Mitarbeitern
0,80	0,20	0,84	0,59	S ermöglicht wesentlich geringere Toleranzen
0,77	0,23	1,90	0,31	A bei kleinen Losgrößen günstiger
0,86	0,14	1,47	0,44	Weniger Abfall zu recyceln bei A
0,90	0,10			

11.3 Normative Likelihoods bei der Beschaffung

Man beschließt deshalb zur Durchführung von Versuchen und für den Prototypenbau die Anschaffung eines 3D-Druckers. Eine Marktrecherche ergibt drei Maschinenvarianten A, B und C. Anstatt wie bisher üblich mit Gewichtungen und Erfüllungsgraden Nutzenwerte zu berechnen, soll der Variantenvergleich über Präferabilitäten durchgeführt werden. Sowohl Herrn Müller als auch dem Entwicklungsleiter gefällt der Gedanke, Wahrscheinlichkeiten zu verwenden. Das lässt dem Entwicklungsleiter als Entscheider noch Spielraum und Herr Müller findet es angemessen, Unsicherheiten im Auswahlprozess ausdrücken zu können.

Als zu berücksichtigende Kriterien werden der Preis, die Größe des Aufbauvolumens, die erzielbare minimale Schichtdicke und die Präferenz von Lieferanten aus dem Kooperationsnetzwerk des Unternehmens festgelegt.

Vom Preis wird gefordert, dass er im Budgetrahmen von 4.000 € bis 30.000 € liegen und dass im Übrigen möglichst sparsam gewirtschaftet werden soll. Die erzielbare Schichtdicke soll möglichst gering sein. Das Aufbauvolumen für den 3D-Druck soll möglichst groß sein. Es wird außerdem angestrebt, Lieferanten aus dem Kooperationsnetzwerk des Unternehmens im Verhältnis 6:5 zu bevorzugen. Die Präferabilitäten sollen unvoreingenommen berechnet werden. Die Ausgangspräferabilität liegt also bei 1/3 für alle drei Varianten.

Die Parameter Preis P_r , Aufbauvolumen AV und Schichtdicke SD werden durch Likelihoodfunktionen l (Gleichungen 4 bis 6) auf Likelihoods für die jeweilige Evidenz abgebildet. Der Einfachheit halber kommen lineare oder reziproke Funktionen zum Einsatz. Die Likelihoodverhältnisse entsprechen dabei den Verhältnissen der Parameter bzw. ihrer Kehrwerte. Doppeltes Aufbauvolumen erhöht also die Präferabilität einer Alternative gegenüber einer anderen im Verhältnis 2:1. Dasselbe gilt für den halben Preis, sofern er im Budgetrahmen liegt. Doppelter Preis kann also durch doppeltes Aufbauvolumen wettgemacht werden. Doppelter Preis kann aber auch durch halbe Schichtdicke kompensiert werden. Die Likelihoodfunktionen sind in den Gleichungen 4 bis 6 formuliert. Die Normierung mit dem Maximum ist formal notwendig, weil Likelihoods als Wahrscheinlichkeiten nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen können.

$$l_{AV}(AV) = \frac{AV}{\text{Max}(AV)} \quad (4)$$

$$l_{SD}(SD) = \frac{\frac{1}{SD}}{\text{Max}\left(\frac{1}{SD}\right)} \quad (5)$$

$$l_{Pr}(Pr) = \frac{\frac{1}{Pr}}{\text{Max}\left(\frac{1}{Pr}\right)} \text{ wenn } Pr \in [4.000; 30.000] \quad (6)$$

$$l_{Pr}(Pr) = 0 \text{ wenn } Pr \notin [4.000; 30.000]$$

Herr Müller berechnet die Präferabilitäten wieder in der Verhältnisform, analog zu Gleichung 2. Aber er erweitert sie auf drei Alternativen. Das Ergebnis ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Präferabilitäten $P_{A,B,C}$ dreier Maschinenalternativen A, B und C, berechnet anhand von 4 Kriterien (Evidenzen) über die Likelihoods $L_{A,B,C}$

Evidenz E	A	B	C	L_A	L_B	L_C	P_A	P_B	P_C
Preis in €	5.500	30.000	12.400	1,00	0,18	0,44	0,33	0,33	0,33
Aufbauvolumen in l	27,9	125	90	0,22	1,00	0,72	0,61	0,11	0,27
Schichtdicke in mm	0,01	0,05	0,03	1,00	0,20	0,33	0,31	0,25	0,44
Netzwerklieferant	nein	nein	ja	1,00	1,00	1,20	0,61	0,10	0,29
Ergebnis							0,58	0,09	0,33

In diesem kriterienbasierten präskriptiven Entscheidungsverfahren setzt sich also Alternative A mit einer Präferabilität von 0,58 durch. Ihr kommt zugute, dass keine Muss-Anforderungen an das Aufbauvolumen gestellt wurden und dass sie durch den vergleichsweise niedrigen Preis und die geringe Schichtdicke überzeugen kann. Der Entwicklungsleiter stimmt der Beschaffung zu, auch wenn eine Wahrscheinlichkeit von 0,42 besteht, dass Alternative A nicht die beste ist. Der Entwicklungsleiter überzeugt sich noch, dass es keine Sondenhalter im Portfolio gibt, die ein Aufbauvolumen von 27 l überschreiten. Auch findet er unter den ausgewählten Varianten keine präferablere nach den festgelegten Kriterien und entscheidet sich deshalb für A.

Der Einkauf und das Controlling bezweifeln, dass wirtschaftliche Entscheidungen anhand von Wahrscheinlichkeiten getroffen werden sollten. Der Einkauf bestellt schließlich aber doch A, da es sich um die billigste Alternative handelt. Herr Müller und sein Entwicklungsleiter überlegen nach dieser Erfahrung, unternehmerische Entscheidungen unter Unsicherheit in Zukunft zwar weiterhin probabilistisch zu analysieren, aber bis auf Weiteres wieder zur deterministischen Nutzwertanalyse zurückzukehren, wenn sie mit den Betriebswirtschaftlern kommunizieren.

12 Diskussion und Schlussfolgerungen

Wir haben ein probabilistisches Verfahren für die Entscheidung unter Unsicherheit in der Entwicklung hergeleitet und seine Anwendung an Beispielen demonstriert. Es bringt Entscheidungsalternativen auf der Basis von Informationen, Evidenzen genannt, anhand der Schätzung von Likelihoods und dem Bayesschen Theorem in eine Rangfolge. Zugunsten der Lesbarkeit wurde dabei auf eine mathematisch vollständige Darstellung mit Fallunterscheidungen verzichtet. Das Verfahren hat gegenüber anderen Verfahren den Vorteil unter Unsicherheit selbst bei wenigen, schwachen und qualitativen Evidenzen zu Entscheidungen rational kommunizieren und beraten zu können, auch wenn deterministische Aussagen über Nutzenwerte von Alternativen aufgrund fehlender Kriterien und Parameter noch nicht möglich sind. SPBR brilliert als minimalistische und effiziente Methode unter den rationalen bzw. präskriptiven Verfahren in Entscheidungssituationen unter hoher Unsicherheit.

In der Praxis besteht die Gefahr, dass die Anwender Präferabilitäten aufgrund ihrer Denkgewohnheiten als Nutzenwerte missinterpretieren. Das ist insofern unkritisch, als die Rangfolge für die Entscheidung in beiden Fällen durch die umgekehrte Reihenfolge der berechneten Zahlenwerte gegeben ist.

Im Gegensatz zu anderen Verfahren, die mit Erwartungswerten als Summen von Produkten aus Nutzenwerten und Eintrittswahrscheinlichkeiten operieren, ist unser Verfahren ein einzüiges bayessches Verfahren, das wir deshalb auch als Single Pass Bayesian Reasoning (SPBR) bezeichnen (vgl. Dangelmaier, Bauer und Chen 2022). Es hat durch sein einfaches iteratives Kalkül den Vorteil auch das Reifen von Entscheidungen durch neu gefundene Evidenzen mit minimalem Rechenaufwand modellieren zu können. Dieser Vorteil des Kalküls wird allerdings teilweise hinfällig, wenn sich die Alternativen ändern, was in volatilen Situationen nicht selten ist.

Das Verfahren funktioniert wegen der Universalität des Bayesschen Theorems sowohl für den bayesschen als auch den frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff. Wir haben gezeigt, wie die Ermittlung der Likelihoods sowohl subjektiv durch Einzelne als auch im Kollektiv erfolgen kann. Alternativ zur subjektiven Einschätzung können die Likelihoodverhältnisse auch aus einem Datenbestand durch statistische Analysen gewonnen werden. Das wird man vorziehen, wenn die Datenbasis passend und konsistent ist und die Daten nicht veraltet sind. Man besitzt allerdings selten einen vollständigen aktuellen und konsistenten Datensatz für eine rein frequentistisch basierte Entscheidung, insbesondere bei interdisziplinären Fragestellungen. Daten bilden lediglich die Vergangenheit ab und nicht notwendigerweise die gegenwärtige oder zu erwartende Wirklichkeit. Sie können daher zu konservativ gegenüber den frischen Eindrücken aus aktuellen Informationen sein. Subjektive Einschätzungen sind deshalb nicht grundsätzlich schlechter sind als auf Daten basierende.

Ferner haben wir dargelegt und am Beispiel einer Beschaffung demonstriert, dass das vorgestellte Kalkül auch in deterministischen Entscheidungssituationen mit festgelegten und parametrisierten Kriterien bzw. vorgegebenen Anforderungen eingesetzt werden kann. Auch dort profitiert man von seiner Effizienz. Der Begriff Präferabilität wird hier vermutlich weniger als Wahrscheinlichkeit verstanden werden, sondern eher als ein deterministisches Konstrukt. Es ist damit zu rechnen, dass der probabilistische Ansatz in betriebswirtschaftlichen Disziplinen und auch bei Ingenieuren auf Widerstand stößt, die durch das Nutzenparadigma geprägt sind.

SPBR ist dabei keine völlig neue Methode. Das bayessche Gedankengut hat eine wechselhafte Geschichte (McGrayne 2013), die bis in das frühe 18. Jahrhundert zurück reicht. Das bayessche Argumentieren kann man auf die Prüfung von Hypothesen zu Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft anwenden. In der Entscheidungstheorie wird sie aufgrund deren Fixierung auf den Nutzen als Zielgröße bislang ignoriert, trotz ihrer Universalität und ihrer Fundierung in der Mathematik und der Erkenntnistheorie. Die Anwendung des einzüigen Kalküls in der Entscheidungsunterstützung ist unseres Wissens neu.

Aber SPBR hat auch Grenzen. Obwohl es effizienter ist als die gängigen Verfahren und auch reifende Entscheidungen begleiten kann, ist der Aufwand für viele Entscheidungssituationen noch zu hoch. Hier könnte man stattdessen effiziente Heuristiken aus der deskriptiven Entscheidungstheorie verwenden. SPBR ist auf Konstellationen beschränkt, in denen eine begrenzte Anzahl bekannter Handlungsalternativen mit endlich vielen voneinander unabhängigen Evidenzen bewertet wird. Unter hoher Unsicherheit ist die Menge möglicher Handlungsoptionen aber häufig ebenso volatil wie die verfügbare Evidenz. Ferner modelliert das beschriebene bayessche Kalkül nur Entscheidungssituationen mit unabhängigen Evidenzen korrekt. Bei komplexeren Abhängigkeitsverhältnissen könnte man auf Kosten die Einfachheit und Effizienz des Verfahrens mit Bayesschen Netzen modellieren und rechnen. Verändern sich allerdings die bedingten Wahrscheinlichkeiten, sind die berechneten Präferabilitäten nicht mehr gültig. Invariante Bedingtheit bzw. die Unveränderlichkeit der Likelihoodverhältnisse während der Entscheidung ist also die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methode.

Literatur

- Bartelborth 2017 BARTELBORTH, Thomas: *Die Erkenntnistheoretischen Grundlagen Induktiven Schließens: Induktion, Falsifikation, Signifikanztests, Kausales Schließen, Abduktion, HD-Bestätigung, Bayesianismus. 2.*, überarbeitete und stark erweiterte Auflage. Leipzig: Universität Leipzig Institut für Philosophie, 2017.
- Bayes und Price 1763 BAYES, Thomas, and Richard PRICE. *An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances*. [London]: [publisher not identified], 1763.
- Bell et al 2011 BELL, David E., Howard Raiffa, and Amos Tversky. *Decision Making: Descriptive, Normative, and Prescriptive Interactions*. Cambridge, GBR: Cambridge University Press, 2011.
- Dangelmaier et al 2022 DANGELMAIER, Manfred; BAUER, Wilhelm; CHEN, Zimu: Interdisciplinary Communication and Advice Under Uncertainty in a Pandemic. In *Global Issues: Disease Control and Pandemic Prevention*. AHFE International. AHFE International, <https://doi.org/10.54941/ahfe1001356>, 2022.
- McGrayne 2013 MCGRAYNE, Sharon Bertsch 2013. *Die Theorie, die nicht sterben wollte: Wie der englische Pastor Thomas Bayes eine Regel entdeckte, die nach 150 Jahren voller Kontroversen heute aus Wissenschaft, Technik und Gesellschaft nicht mehr wegzudenken ist*. Berlin: Springer Spektrum, 2013.
- Hwang und Yoon 1981 HWANG, Ching-lai; YOON, Kwangsun: *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-Art Survey*. Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>, 1981.
- Laplace 1814 LAPLACE, Pierre Simon de: *Essai Philosophique Sur Les Probabilités*. Paris: Courcier Imprimeur-Libraire pour les Mathématiques. <https://doi.org/10.14463/KXP:1735451088>, 1814.
- Laux et al 2019 LAUX, Helmut, GILLENKIRCH, Robert M., SCHENK-MATHES, Heike Yasmin: *Entscheidungstheorie. 9.*, vollständig überarbeitete Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin; Heidelberg: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55258-8>, 2019.
- Saaty 2012 SAATY, Thomas, L.: *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. 3. Auflage., 5. Pittsburgh, Pa.: RWS Publ, 2012.
- Tschirk 2014 TSCHIRK, Wolfgang. *Statistik: Klassisch oder Bayes: Zwei Wege Im Vergleich*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflcht-1553393>, 2014.
- Zangemeister 1976 ZANGEMEISTER, Christof: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projekialternativen: Zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1970*. 4. Aufl. München: Wittemann, 1976.
- Zenker 2013 ZENKER, Frank (Hrsg.): *Bayesian Argumentation: The Practical Side of Probability*. Band 362. Synthese Library, Studies in Epistemology, Logic, Methodology, and Philosophy of Science. Dordrecht: Springer, 2013.

DigiTales2GO: Konzept zur Erfassung und Bewertung von Start-ups im Trendmanagement

DigiTales2GO: Concept for Describing and Assessing Start-ups for Managing Trends

Harriet Kasper¹, Daniel Pawlowicz², Felix Scheerer², Monika Kochanowski³

¹Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 70569 Stuttgart, Deutschland
harriet.kasper@iao.fraunhofer.de

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT, 70569 Stuttgart, Deutschland

daniel.pawlowicz@iat.uni-stuttgart.de, felix.scheerer@iat.uni-stuttgart.de

³Duale Hochschule Baden-Württemberg, Lerchenstraße 1, 70174 Stuttgart, Deutschland
monika.kochanowski@dhbw-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Die Beobachtung und Analyse von Start-ups ist eine neue Möglichkeit, um Trends zu erkennen und somit eine Alternative zu der oft sehr allgemeinen und aufgrund der Methodik in der Kritik stehenden Trendliteratur. Der Beitrag beschreibt das Konzept und die prototypische Implementierung einer Anwendung in der Start-up-Daten, aber auch aufkommende Technologien und Trends, dargestellt und durch die Mitarbeitenden eines Unternehmens bewertet werden können. Die Weisheit der Vielen liefert eine Datenbasis, auf deren Grundlage im Trend- oder Innovationsmanagement, Trends identifiziert werden und Handlungsoptionen abgeleitet werden können. Wesentliche Neuerung, im Vergleich zu bestehenden Werkzeugen, ist die einfache Bewertung mittels Wisch-Bewegung (Swipe) auf dem Smartphone. Das Vorgehen ist im Kontext von New Work und dem durch Corona beschleunigten Wandel zu mehr Homeoffice vielversprechend, wie die vorgestellte Evaluation des Prototyps zeigt. Grundsätzliche Überlegungen, wichtige Funktionen und Erweiterungs-möglichkeiten werden diskutiert.

Keywords (deutsch):

Start-up, Trendmanagement, Innovationsmanagement, Kollaboration, New Work

Abstract (english): Observing and analyzing start-ups is a new possibility to identify trends and an alternative approach to generic trend literature which has been criticized for its methodology. The paper describes the concept and prototype of an application which displays start-up data, emerging technologies, and trends and invites employees to rate these items. The wisdom of the crowd generates data that can be used in innovation or trend management to identify trends and derive actions for companies. The interaction by a simple swipe on the smartphone is a novel approach in this area, which has not yet been implemented on similar applications. However, this approach is promising in the context of new work, as the presented evaluation of the prototype shows. General considerations, important functionalities, and possibilities to extend the concept implemented in the prototype, are discussed.

Keywords (english):

startup, trend management, innovation management, collaboration, new work

1 Einführung

Für Unternehmen ist es wichtig zu entscheiden, auf welche Technologien, Geschäftsmodelle und Trends sie setzen sollten. Sich bei der Trenderkennung auf allgemeine Trendliteratur von Drittanbietern oder auf Beratungsunternehmen zu verlassen, entspricht nicht dem Selbstverständnis von Unternehmern, und erfolgt vor allem, weil diese Aufgabe kompliziert erscheint (Gediminas et al. 2008). Die individuelle Abstimmung mit Partnern und Zulieferern birgt oft einen Interessenskonflikt. Hinzu kommt, dass Zusammenarbeit und Kommunikation seit Corona Homeoffice-bedingt verstärkt zunehmend virtuell stattfindet und der informelle Austausch auf den Bürofluren und in Meetingräumen zwischen den Mitarbeitern zurückgeht (Helmold 2021, Lee und Trimi 2021). Deshalb sind, unter anderem, neue Ansätze erforderlich, um die zuvor implizit entstandenen Stimmungsbilder zu aktuellen Trends und Technologien zu erzeugen.

Durch die Corona-Krise hat die Digitalisierung einen großen Schub erfahren und gilt weiterhin als wichtiger Bestandteil zur Lösung anstehender Herausforderungen von Klimakrise bis demografischer Wandel (Klöß 2020). Auch das Trendmanagement bietet Digitalisierungsmöglichkeiten: Dieser Beitrag beschreibt am Beispiel der Versicherungsbranche, wie Daten von durchschnittlich über 60 Start-ups, die pro Woche in Deutschland gegründet werden (startupdetector 2023), in der Trenderkennung eingesetzt werden können, und diskutiert die Vorteile und Herausforderungen eines kollaborativen Vorgehens zur Bewertung von Start-ups. Der vorgestellte Prototyp DigiTales2GO ist eine Software-Anwendung zur Kuratierung (Auswahl und Aufbereitung) von Start-ups, Technologien und Trends und deren kollaborative Bewertung und Weiterentwicklung innerhalb eines Unternehmens (oder Unternehmensnetzwerks).

1.1 Start-ups

Start-ups sind jünger als 10 Jahre, haben ein geplantes Wachstum hinsichtlich Mitarbeitendenzahl und/oder Umsatz und sind vor allem charakterisiert durch den Innovationsgrad ihrer Produkte, Dienstleistungen, Geschäftsmodellen und/oder Technologien (Kollmann et al. 2022). Das Gabler Wirtschaftslexikon verweist in seiner Definition zudem auf Electronic Business, Kommunikationstechnologie und Life Sciences als Hauptbereiche und darauf, dass Start-ups häufig durch Venture Capital finanziert werden (Achleitner 2018).

Start-up-Beobachtung als Teil der Umfeldanalyse ist für Unternehmen heute relevant:

- im Sinne von **Wettbewerbsbeobachtung**, denn vor allem innovative Ideen im Bereich der Digitalisierung können in Kombination mit Wagniskapital schnell skalieren und so zum Risiko für etablierte Unternehmen werden. Zum Beispiel haben Spotify und andere Audio-Streamingdienste physische Tonträger inzwischen komplett verdrängt.
- Start-ups stellen als mögliche **Partner für Unternehmen** eine Chance dar, indem entweder Leistungen des Start-ups in Produkte und Prozesse des Unternehmens integriert werden (Business to Business Beziehung) oder gar das ganze Start-up durch das Unternehmen aufgekauft wird (Becker et al. 2018).
- Die meisten Start-ups stellen aber weder einen ernstzunehmenden Wettbewerb dar, noch sind sie attraktive Partner für ein Unternehmen (Lamper et al. 2023). Die Sichtung dieser jungen Unternehmen mit neuen Geschäftsmodellen oder basierend auf dem Einsatz neuer Technologien kann für etablierte Unternehmen aber **Impulsgeber für Innovationen** sein: Start-up-Beobachtung unterstützt die systematische Ideengewinnung, indem sowohl Ideen gesammelt als auch inspiriert und somit generiert werden (Vahs und Brem 2015). Es handelt sich hier um einen Outside-in-Prozess im Sinne von Open Innovation (Chesbrough 2003).

- Des Weiteren stellen Start-ups, wie in diesem Beitrag ausgeführt, eine **neue Informationsquelle im Trendmanagement** dar, welche ihrerseits das Innovationsmanagement als auch Entscheidungen bezüglich Partnerschaften unterstützen kann.

1.2 Trends

Das Gabler Wirtschaftslexikon definiert einen Trend aus Statistik-Perspektive als Zeitreihenkomponente, von der angenommen wird, dass sie längerfristig und nachhaltig wirkt (Auer et al. 2018). Ein **Trend** besteht also einerseits aus dem, was in der Gegenwart beobachtbar und messbar ist, enthält aber zudem die angenommene Weiterentwicklung in der Zukunft (Pillkahn 2007). Trends sind laut Pillkahn sowohl Kommunikationsmittel, um Veränderungen zu beschreiben, als auch Grundlage für strategische Arbeit bei der Erkennung von Chancen und Risiken, und darüber hinaus auch Marketinginstrument, mit dem sich zum Beispiel Kaufentscheidungen beeinflussen lassen.

Zur **Beschreibung von Trends** in der Trendliteratur wird häufig Storytelling verwendet: Sven Gábor Jánosky, vom ZBAhead Think-Tank vertreibt seine Zukunftsprognosen in Büchern (Jánosky und Abicht 2018) und Veranstaltungen, das Zukunftsinstitut bietet zu seinen Trends jährlich eine Sammlung von Essays, und zieht vereinzelt Marktumfragen heran, die die Thesen unterstreichen (Horx et al. 2021). Demgegenüber bietet die Analyse von Start-ups eine Datenbasis, um Trends abzuleiten. In Unternehmen kommt häufig eine formalisierte Struktur und visuelle Aufbereitung in Form von Radaren zum Einsatz (Pillkahn 2007).

Die Fülle an verfügbarer Information, z. B. im Internet, führt dazu, dass die Aufmerksamkeitsspanne der Menschen sich verringert (Lorenz-Spreen, Mønsted et al. 2019). Deswegen ist es notwendig, Information möglichst einfach und kompakt aufzubereiten: Es gilt dabei, (in Radaren aufbereitbare) Zahlen-Daten-Fakten auf der einen Seite, aber auch den Kern eines Trends als Text (Story) darzustellen.

1.3 Trendforschung und Trendmanagement

Die **Trendforschung** ist einerseits in der Marktforschung, aber auch der Zukunftsforschung angesiedelt und steht in der Kritik einer mangelhaften, da oft nicht transparenten Methodik (Rust 1997), welche in schlecht verstandenen und falsch interpretierten Trends resultiert (Liebl und Schwarz 2009). Nichtsdestotrotz ist Trendforschung mit hohem Anwendungsbezug für Unternehmen heute sehr wichtig und ökonomisch, politisch und sozial gefordert (Pfadenhauer 2004).

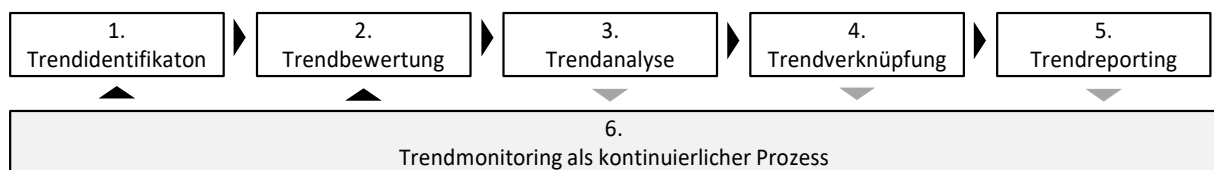


Bild 1: Vorgehensmodell des Trendmanagement, angepasst nach Siebe und Fink 2006

Ziel von **Trendmanagement** im Unternehmen ist es, relevante Trends zu identifizieren, zu bewerten und Handlungsoptionen abzuleiten. Ein Vorgehen dazu ist in Bild 1 dargestellt (Siebe und Fink 2006). Zur **Trendidentifikation (1)** werden sozio-ökonomische Daten sowie oft auch Medienberichte ausgewertet. Die entstehenden Trend-Hypothesen werden validiert und beschrieben. Wichtiges Element dieses ersten Schrittes ist abschließend das sog. *Naming*, also einen passenden einprägsamen Begriff für den Trend zu finden (Zukunftsinstitut).

Die **Trendbewertung (2)** erfolgt anhand verschiedener Kriterien, wie Auswirkungsstärke des Trends auf das Unternehmen, durch interne und/oder externe Experten, z. B. in Form von Workshops. Durst et al. (2010) stellen eine Software für kollaboratives Trendmanagement vor, deren Weiterentwicklung heute als Innovationsmanagementsoftware Itonics angeboten wird. Vom Fraunhofer IAO wurde die TrendArena® als kollaboratives Trendmanagement-Werkzeug erstellt und erprobt (Fischer et al. 2018).

Besonderheit dieses Ansatzes, der auch bei DigiTales2GO zum Einsatz kommt, ist, dass er auf *die Weisheit der Vielen* also Crowdsourcing (Surowiecki 2005) setzt.

In der **Trendanalyse (3)** können schließlich auf Basis der erhobenen Daten Handlungsoptionen abgeleitet werden, welche dann im **Trendreport (5)** zusammengefasst und vom Management entschieden werden: Trends können zum Beispiel aufgegriffen, weiter beobachtet oder auch bewusst ignoriert werden.

Das **Trendmonitoring (6)** verstetigt den Trendmanagement-Prozess: Es liefert aktuelle Trends und ebenfalls neue Informationen zur Bewertung bestehender und aktueller Trends. Trendanalyse (3), Trendverknüpfung (4) und Trendreporting (5) steuern das Trendmonitoring, indem neue Impulse und Fragestellungen formuliert werden. Die **Trendverknüpfung (4)** sehen Siebe und Fink (2006) in ihrem Modell als optional an.

1.4 Start-up-Betrachtung am Beispiel der Versicherungsbranche

Sicherlich ist die Beobachtung von Start-ups, Technologien und Trends in allen Branchen relevant. Da in der Finanzbranche jedoch keine physischen Produkte mit einem industriellen Fertigungsprozess und dadurch bedingten Einschränkungen existieren, spielt für sie die Digitalisierung bei der Innovation heute eine besonders wichtige Rolle. Deutsche Unternehmen sind bei der Digitalisierung jedoch besonders träge (ifo Institut 2021).

Die Finanzbranche kann grob aufgeteilt werden in Banken und Versicherungen und ist eine von drei Branchen deren Start-ups (also FinTechs/InsurTechs) 2022 am meisten Risikokapital eingesammelt haben (Ernst & Young GmbH 2023). Doch der Fintech-Standort Deutschland steht 2023 auf dem Prüfstand, titelt das Handelsblatt (Schwarz 2023).

Banken haben durch Direktbanken, die sich inzwischen als Quasi-Standard neben den Filialbanken etablieren konnten, einen großen Wandel erlebt. Die Versicherungsbranche konnte in den letzten Jahren ein stetiges Wachstum verzeichnen, auch über die Pandemiejahre hinweg. Trotz steigender Digitalisierung in der Pandemie allgemein war auch 2021 der Direktvertrieb, also die Interaktion von Vermittler und Kunde, immer noch der wichtigste Faktor (GDV 2022). Selbst für junge Menschen sind Vermittler wichtiger als Portale (experten.de 2021).

Dennoch bietet die Digitalisierung für Versicherungen Chancen, die langfristig genutzt werden müssen – sei es durch digitale Makler wie Clark.de, rein internetbasierte Versicherungsangebote wie Lemonade.com oder Trends, die einfach zur Verschiebung des Versicherungsbedarf führen wie z. B. E-Bikes statt Fahrräder.

2 DigiTales2GO Konzept

Folgende zwei Annahmen liegen dem hier vorgestellten Konzept DigiTales2GO zugrunde:

1. Es ist für das innovierende Unternehmen von Vorteil, Impulse an einer Stelle aus verschiedenen Quellen zusammenzuführen und einheitlich und kompakt aufzubereiten. **DigiTales** steht dabei für die Idee, diese Inhalte mittels Storytellings besser erfassbar und erinnerbar zu machen.
2. Die Bewertung durch eine hohe Anzahl von Nutzenden identifiziert relevante Impulse und ermöglicht es, auf der Datenbasis Trends abzuleiten. Dazu muss diese Bewertungsfunktion besonders einfach verfügbar und attraktiv sein (**2GO**).

Erläutert und diskutiert wird in diesem Beitrag vor allem der zweite Punkt. Smartphones werden eher für wenig komplexe Tätigkeiten wie Kurznachrichten schreiben, Notizen machen, soziale Netzwerke etc. verwendet (Bröhl 2018). Mit der Realisierung als App nimmt DigiTales2GO diese Interaktionsparadigmen auf. So soll das Swipen/Wischen auf dem Display eine schnelle und spielerische Möglichkeit sein, Elemente, je nach Richtung, in die diese gewischt werden, mit einer Wertung zu versehen. Anschließend wird das nächste Element aus einer Liste dargestellt. Diese

Elemente werden übersichtlich in einem horizontalen Banner aufgearbeitet dargestellt und können auch direkt aufgerufen werden. Jedes Element kann auch mit individuellen oder vorgelegten Tags abgelegt werden. Diese Tags werden dafür genutzt, die Suche für den Nutzer zu vereinfachen, aber auch für den Feed *Für Dich*.

2.1 DigiTales2GO Prototyp

Der Prototyp wurde plattformübergreifend als Webanwendung, Android- und iPhone-App umgesetzt. Bild 2 zeigt den sog. *Feed-Screen*, wo ein zu bewertendes Element ausgewählt werden kann. Der Feed-Screen teilt sich hierbei in drei Feeds auf; *Trending*, *Neu* und *Für Dich*. *Trending* zeigt die Elemente, mit denen am meisten von anderen Nutzern interagiert wurde. Neu hinzugefügte Elemente werden in dem *Neu*-Feed angezeigt. Der *Für Dich*-Feed besteht aus Elementen, welche für die Nutzenden anhand deren Interessen ausgewählt werden. Die Interessen werden bei der Erstellung eines Profils angegeben.

Das Auswählen eines beliebigen Elements aus einem Feed öffnet die in Bild 3 zu sehende *Swipe-Ansicht*. Hier erhalten Nutzende detaillierte Angaben über das ausgewählte Element und können damit interagieren. Eine Interaktion kann das Wischen nach rechts oder links zur Bewertung als relevant oder irrelevant für das Unternehmen sein. Außerdem kann das Element zur Wiederauffindung markiert werden. Für den Fall, dass Nutzende das Element nicht bewerten möchten, kann dieser Vorgang mit dem Skip-Button übersprungen werden.

Neben der Bewertung dient die *Swipe-Ansicht* auch als Detailansicht von Elementen. Es werden hierzu ein sprechender Titel, ein Vorschaubild, Kenndaten des Elements, eine kurze sowie eine ausführliche narrative und somit erinnerbare Beschreibung (DigiTales Storytelling) und Ansprechpersonen angezeigt. Dabei sind relevante Informationen unter Umständen gekürzt direkt aufgelistet. Weiterführende und ausführliche Informationen können, sofern vorhanden, zusätzlich angezeigt werden. Aus der *Swipe-Ansicht* kann außerdem ein direkter Link auf das Element über beispielsweise E-Mail mit anderen geteilt werden.

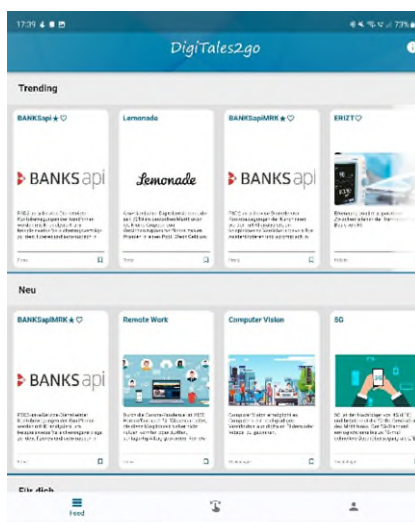


Bild 2: DigiTales2GO Prototyp Feed-Ansicht
Screenshot Samsung Galaxy Z Fold 3 Smartphone

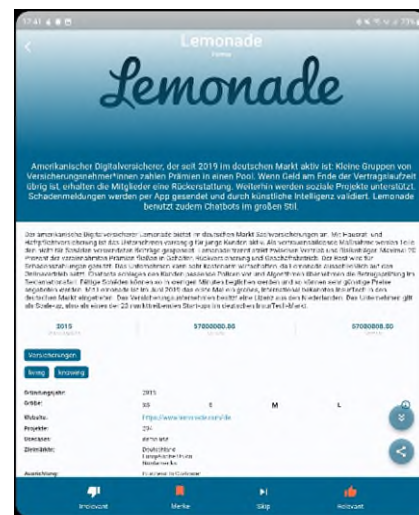


Bild 3: DigiTales2GO Prototyp Swipe-Ansicht
Screenshot Samsung Galaxy Z Fold 3 Smartphone

DigiTales2GO verfügt zusätzlich über eine Ansicht, bei der die hinterlegten Daten des Profils eingesehen und geändert werden und gespeicherte, bewertet und übersprungene Elemente erneut aufgerufen werden können. Ein Kommentarsystem existiert noch nicht, ist jedoch geplant. So können Nutzende sich untereinander zu den Elementen austauschen oder auch Kommentare von anderen bewerten.

2.2 Analysemöglichkeiten bei DigiTales2GO

Mittels DigiTales2GO können Daten erhoben und gespeichert werden, die den Unternehmen heute nicht zur Verfügung stehen: Wie bewerten die eigenen Mitarbeitenden Start-ups und Technologien? Neben den vorgestellten Front-End-Funktionalitäten stellen Analysen mit geeigneten Anwendungen einen wesentlichen Mehrwert des Konzeptes dar:

- Welche einzelnen Start-ups und Technologien werden als besonders relevant wahrgenommen? Die zusätzlich zur Bewertung abgegebenen Kommentare liefern Hinweise darauf, welche Aspekte zu dieser Einschätzung führen.
- Welche Gruppen von Start-ups, also Kategorien und gegebenenfalls dahinterstehende Trends, werden als besonders relevant eingestuft? Wichtig an dieser Stelle ist es, nicht nur vorher festgelegte Kategorien zu betrachten, sondern z. B. auf Basis der Kommentare auch neue Kategorien zu identifizieren.
- Wie schätzen die eigenen Mitarbeitenden Technologien (und Trends) ein?
- Welche Verknüpfungen von Start-ups, Technologien und Trends werden häufig angeklickt? Welche Verknüpfungen tauchen (neu) in den Kommentaren auf?
- Wie häufig nutzen Mitarbeitergruppen DigiTales2GO und wie viele Bewertungen und Kommentare werden pro Session und insgesamt von den Nutzenden durchgeführt?
- Zu welcher Tageszeit, an welchen Tagen und in welchen Monaten nutzen die Mitarbeitergruppen DigiTales2GO?

Die letzten beiden Beispiele liefern Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten in der Datenerhebung und können durch explizite Untersuchungen der Nutzungsart durch Fragebogen (auch in der Anwendung) oder Interviews ergänzt werden.

2.3 Rollenkonzept von DigiTales2GO

Den Nutzenden von DigiTales2GO können verschiedene Rollen zugewiesen werden. Für den Prototypen wurden die Rollen *Administrator*, *Content Moderator*, *Content Creator*, *Registrierter-Nutzer* und *Gast* eingeführt. Ein neuer Nutzender startet in der Rolle des Gasts. Auf der Feedseite wird der Feed *Neu* und *Trending* angezeigt. Eine Bewertung eines Elements ist durch den Nutzer als Gast nicht möglich. Wenn sich der Nutzer registriert, sind die Elemente für die Bewertung freigegeben und der Feed *Für Dich* ist freigeschaltet. Der Content Creator kann über eine dafür bereitgestellte Seite ein einzelnes Element anlegen oder auch mehrere Elemente auf einmal importieren. Diese können vom Content Moderator verändert und auch für alle Nutzer freigeschaltet werden. Der Administrator kann Nutzenden Rollen zuweisen. Unter anderem sind folgende Segmentierungen und abgeleitete Erkenntnisse denkbar:

- Bewertung durch die einzelnen Unternehmensbereiche: Welches Start-up, welche Technologie und welcher Trend sind in welcher Abteilung am populärsten? Auf dieser Basis kann entschieden werden, wo die Führung von neuen Projektinitiativen zum Thema liegen sollte und wer dabei beteiligt sein sollte. Es wird außerdem erkennbar in welchen Bereichen viel oder auch zu wenig Beschäftigung mit den Themen erfolgt.
- Aufteilung in Expertinnen und Experten für bestimmte Technologien oder bestimmte Funktionen versus Mitarbeitende ohne ausgewiesene Expertise oder Funktion: Die Analyse im Unterschied der Bewertungen durch die beiden Gruppen zeigt beispielsweise anderenfalls möglicherweise verpasste Chancen auf. Auch noch unerkannte Experten können so identifiziert werden.

Die Anwendung ist multimandantenfähig. Somit können Inhalte bzw. Elemente spezifisch für eine Benutzergruppe eingestellt bzw. freigeschaltet werden. Die Auswertung kann dann ebenfalls für den jeweiligen Mandanten erfolgen.

3 Evaluation des DigiTales2GO Konzeptes

Das Konzept von DigiTales2GO wurde durch verschiedene Personengruppen anhand eines kurzen Fragebogens bewertet:

- *Gruppe 1* (n=12) sind **Domänenexpertinnen und -experten aus der Versicherungsbranche**, die bis auf einen Teilnehmenden, bereits mit anderen Vorgehensweisen zur Start-up-Beobachtung vertraut sind.
- *Gruppe 2* (n=13) besteht aus sechs **Digitalisierungsexperten** einerseits, sowie den **Entwicklern des DigiTales2GO Prototypen** andererseits.
- *Gruppe 3* (n=3) enthält die Bewertung von **Agilen Coaches**, die mit der Fragestellung der Start-up-Beobachtung keinerlei Berührungspunkte haben, allgemein jedoch Experten für die Umsetzung von neuen Praktiken in den Unternehmen verantwortlich sind.
- *Gruppe 4* (n=13) sind Teilnehmende einer Digitalisierungsveranstaltung, deren Expertise nicht weiter eingeschätzt wurde, sie werden hier allgemein als **Digitalisierungsinteressierte** eingestuft.

Die insgesamt 41 Teilnehmenden beantworteten geschlossene Einschätzungsfragen. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse geben Hinweise darauf, inwieweit das Konzept als sinnvoll erachtet wird, welche Gestaltung des Inhalts präferiert wird und welche Nutzungsart (Webanwendung, Smartphone) für die Befragten in Frage kommt. Die quantitativen Ergebnisse werden im Abschnitt 3.1. in den Grafiken für alle Gruppen zusammengefasst dargestellt. Die Ergebnisse der vier genannten Gruppen weisen überwiegend die gleichen Tendenzen auf. Auf Abweichungen wird besonders eingegangen. Die im Rahmen der Evaluation entstandenen Diskussionen und Antworten auf weitere, auch offene Fragen des kurzen Fragebogens, enthielten darüber hinaus Hinweise dazu, wo und wie das Konzept außerdem eingesetzt werden kann und welche Herausforderungen dabei zu meistern sind. Die gesammelten Informationen fließen in die Interpretation der Ergebnisse in Abschnitt 3.1., die Diskussion des Konzeptes in Abschnitt 3.2, sowie den Ausblick in Abschnitt 4 ein.

3.1 Quantitatives Feedback zum DigiTales2GO Prototypen

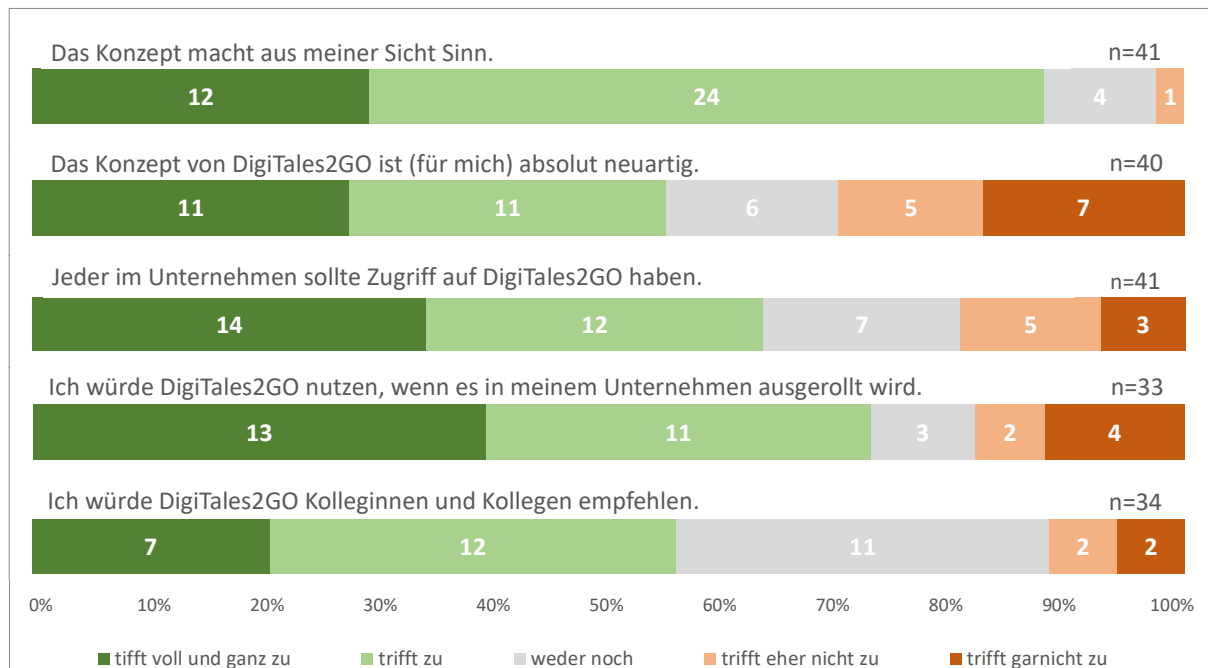


Bild 4: Befragungsergebnisse - Einschätzung des Konzeptes und der Nutzung

Der erste Fragenblock in Bild 4 zeigt in den Antworten eine hohe Zustimmung zum Konzept insgesamt und der Nutzung durch Jede und Jeden im Unternehmen. Vor allem die drei Agile Coaches haben diesen Punkt besonders hoch bewertet. Für die Mehrheit der Befragten war das Konzept außerdem neuartig – was darauf hindeutet, dass ein solcher Ansatz in den Unternehmen der Befragten noch nicht zum Einsatz kommt. Über 70% der Antwortenden würden DigiTales2GO nutzen, wenn es in ihrem Unternehmen ausgerollt wird, und über die Hälfte sind bereit das auch direkt Kolleginnen und Kollegen weiterzuempfehlen. Auffällig ist, dass bei den Domänenexperten aus der Versicherung die Bereitschaft zur Weiterempfehlung sogar höher ist als die Bereitschaft DigiTales2GO selbst zu nutzen. Es muss untersucht werden, für welche Nutzergruppen aus Sicht der Domänenexperten die Nutzung also sogar mehr Sinn macht als für sie selbst.

Die Antworten fallen positiv aus hinsichtlich der Erweiterung des Nutzendenkreises innerhalb einer Branche oder auch über Branchengrenzen hinweg (Bild 5).

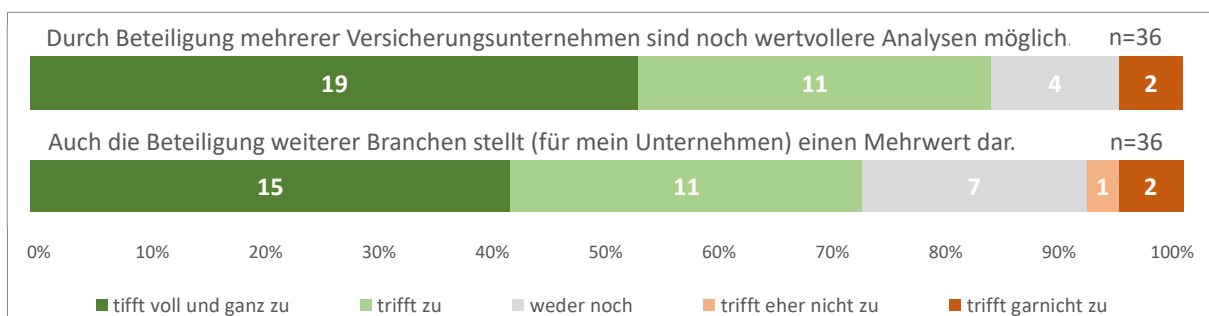


Bild 5: Befragungsergebnisse – Nutzendenkreis

Bezüglich der durch DigiTales2GO angezeigten Inhalte bestätigen 80% der Befragten, dass sie auf eine kurze, prägnante und strukturierte Darstellung von Inhalten, sowie weiterführende Links besonderen Wert legen. Die Gegenfrage, ob so viel Information wie möglich in der App integriert werden soll, wird von ca. 30% mit *trifft voll und ganz zu* bzw. *trifft zu* beantwortet. Fast die Hälfte der Befragten möchte das explizit nicht. Etwa ein Viertel ist in dieser Frage unentschieden. Eine Aufbereitung der Inhalte durch Experten wird von zwei Drittel der Antwortenden als wichtig eingeschätzt.

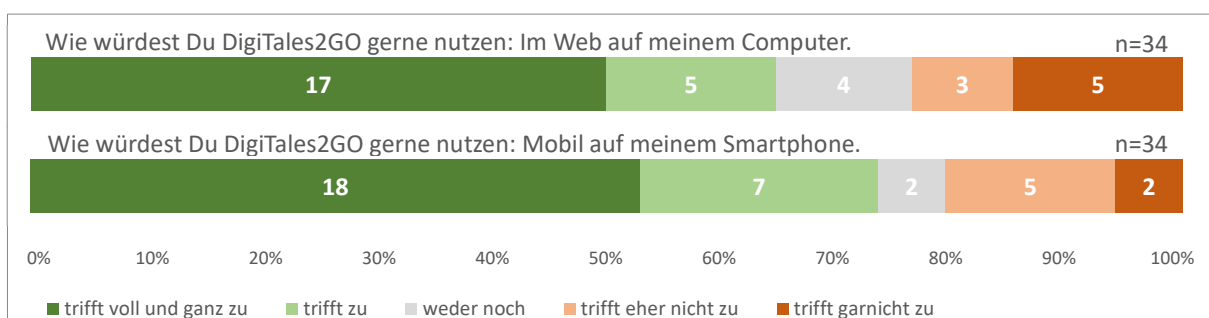


Bild 6: Befragungsergebnisse – Nutzung auf Computer oder auf Smartphone

Die Befragungsergebnisse in Bild 6 unterstreichen den Vorteil der plattformübergreifenden Herangehensweise: Ein Einsatz von DigiTales2GO wird sowohl auf dem Smartphone als auch auf dem Computer gewünscht. In der Versicherung und allgemein von Digitalisierungsinteressierten aus Unternehmen wurde die Nutzung auf dem Computer präferiert, Digitalisierungsexperten und Agile Coaches würden die Anwendung eher mobil auf dem Smartphone einsetzen. Die Aussage, dass lediglich ein Analysebericht ausreicht, wurde überwiegend mit gar nicht zutreffend beantwortet. Das Ergebnis bestätigt abermals das DigiTales2GO Konzept.

3.2 Diskussion des Konzeptes

Das vorgestellte Konzept DigiTales2GO digitalisiert die Bewertung von Start-ups, Technologien und Trends. Es bietet neben einer Desktop-Anwendung auch die Möglichkeit, sich per App auf einfache Art und Weise zu beteiligen. Das quantitative Feedback zu dem Prototyp zeigt, dass eine Desktop-Anwendung notwendig ist, man kann jedoch vor allem bei jüngeren Zielgruppen von einer hohen Akzeptanz der Smartphone-App ausgehen. Die App bietet zudem die Möglichkeit zur orts- und zeitunabhängigen Partizipation und greift so aktuelle Anforderungen von New Work auf (Hofmann et al. 2019).

Als erwartbare Herausforderungen beim Einsatz von DigiTales2GO wurden in den Freitexteingaben und Gesprächen vor allem zwei Bereiche angeführt: Auf der einen Seite geht es dabei um die Inhalte, deren Pflege und Qualität, sowie deren nachhaltigen Einsatz. Auf der anderen Seite stand die Akzeptanz bei Mitarbeitenden und Führungskräften im Vordergrund. Die Robustheit der DigiTales2GO-Anwendung ist dabei vorausgesetzt.

Für einen nachhaltigen Einsatz müssen immer neue Inhalte nachgeliefert werden. Dabei ist abzuwägen, was von den Nutzenden erwartet wird, sowie was leistbar und sinnvoll ist. Die Wichtigkeit der Aufbereitung der Inhalte in hoher Qualität durch Experten geht aus den quantitativen Befragungsergebnissen hervor.

Das DigiTales2GO Konzept basiert auf einer hohen Anzahl an Nutzenden. Aus der Befragung geht hervor (Bild 5), dass der Einsatz in einem Branchennetzwerk oder sogar branchenübergreifend auch aus Sicht der Befragten sinnvoll erscheint.

Es wird angemerkt, dass Anreize für Nutzende geschaffen werden müssen. Dies geht einher mit dem Aspekt der Akzeptanz, dass also Mehrwert und Nutzen (immer wieder) kommuniziert werden müssen. Ein Vorschlag hierzu ist, dass das Reporting auch innerhalb von DigiTales2GO regelmäßig zurückgespielt werden muss und auch in die Arbeit der Fachbereiche eingebunden werden sollte. Bezüglich der Motivation ist es außerdem wichtig, den Nutzenden regelmäßig Feedback zu den von ihnen durchgeführten Bewertungen zu geben. Das kann, z. B. durch Reportings oder Veranstaltungen in denen Erkenntnisse und resultierende Unternehmensentscheidungen offengelegt werden, erfolgen. Es wurde außerdem herausgestellt, dass DigiTales2GO eine *„tolle Option ist Abteilungen näher zusammenrücken zu lassen“*.

Inhalte im DigiTales2GO Konzept sind Start-ups, Technologien und Trends. Während man Start-ups und Technologien datenbasiert erfassen kann, so sind Trends wie in Abschnitt 1.3 beschrieben etwas, was abgeleitet werden sollte. Eine kollaborative Bewertung von Trends ist deshalb abzuwägen.

Letzter wichtiger Punkt sind die Rechte der einzelnen Mitarbeitenden, welche beim Einsatz von DigiTales2GO unbedingt berücksichtigt werden müssen. So schützt z. B. das allgemeine Persönlichkeitsrecht ggf. davor, dass eine Auswertung auf Mitarbeitendenebene erfolgt. Dies sicherzustellen und transparent zu machen, erhöht auch das Vertrauen der Mitarbeitenden und somit die Motivation zur Nutzung von DigiTales2GO.

4 Zusammenfassung und Ausblick

DigiTales2GO bietet Unternehmen die Möglichkeit Start-ups, Technologien und Trends kollaborativ mit ihren Mitarbeitenden zu bewerten. Es wird angenommen, dass Beteiligung den sogenannten Not-Invented-Here-Effekt (Piezunka und Dahlander 2015) reduziert: Das würde bedeuten, dass auf den Bewertungen in DigiTales2GO basierende Unternehmensentscheidungen und Maßnahmen von den Mitarbeitenden besser mitgetragen werden. Auch eine aktuelle repräsentative Befragung in Deutschland zeigt, dass durch Partizipation Ergebnisse von Digitalisierungsprozessen positiver bewertet werden (DGB-Index Gute Arbeit, 2022). Durch die Befragungen zu DigiTales2GO und eigene Recherchen konnten keine weiteren Tools identifiziert werden, die einen ähnlichen Ansatz als Smartphone-App anbieten. Die Interaktionsmöglichkeiten in DigiTales2GO wurden sehr positiv aufgenommen.

DigiTales2GO ist ein Werkzeug, welches im Trendmanagement zum Einsatz kommt, jedoch gibt es diesen Bereich in vielen Unternehmen nicht. Trendmanagement ist häufig Aufgabe des Innovationsmanagements oder auch der strategischen Unternehmensführung. Für eine Ansiedlung von DigiTales2GO im Innovationsmanagement spricht, dass ein breiter Einsatz von DigiTales2GO neben oben beschriebenen Vorteilen auch das Innovationspotenzial aller Nutzenden bzw. der Organisation erhöht: Jede Idee, die in einem Start-up bewertet wird, wirkt auch als Innovationsimpuls für den Einzelnen.

Das Konzept für DigiTales2GO wird stetig weiterentwickelt. Zur Einführung in die Praxis erscheint es sinnvoll, mit einem reduzierten Funktionsumfang wie nur Start-up-Betrachtung, zu starten. Der Fokus auf die Versicherungsbranche wird dabei beibehalten, jedoch hat es sich als sinnvoll erwiesen, auch immer wieder branchenfremde Start-ups einzubringen.

Hauptfokus der weiteren Arbeiten ist die Entwicklung eines Vorgehens, wie aus den erfassten Start-up Daten und Bewertungen zu Trends abgeleitet werden können. Neben Analysten und Experten, die diese Aufgabe übernehmen, sind zum Transfer des Wissens hier auch Workshops zu einzelnen Trends vorgesehen.

Zur Erhöhung der Nutzungsmotivation soll Gamification bei DigiTales2GO eingeführt werden, z. B., indem abgegebene Bewertungen oder Kommentare belohnt werden. Das kann durch ein einfaches Ranking der Nutzenden sein, vielversprechender scheint jedoch den Personen die Möglichkeit zu geben z. B. an obengenannten Trendworkshops mitzuwirken und sich so beruflich weiterzuentwickeln. Die Abbildung von bestehenden Vernetzungen und inhaltlichen Vernetzungen zwischen Start-ups ist eine Erweiterungsmöglichkeit, die DigiTales2GO nicht nur zu einer Datenbasis über Start-ups für das Trendmanagement von Unternehmen, sondern auch zu einer spannenden Ressource für Start-ups selbst macht.

Danksagung

Das Projekt Innovationsnetzwerk Digitalisierung für Versicherungen des Fraunhofer IAO hat es 2016-2022 ermöglicht Start-ups zu betrachten und verschiedene Formate der Informationsaufbereitung für die Versicherungsunternehmen auszuprobieren. Den beteiligten Versicherungsmitarbeitenden danken wir für den Einblick in die Anforderungen an diese Aufgabe und die Evaluation verschiedener Umsetzungsformen. Den Studierenden der Softwaretechnik (Dominik Böhl, Sina Hepözkan, Frederik Horn, Jonas Nasimzada, Dennis Polosow, Noel Khan Uzunbeycan, Markus Walter), die im Rahmen ihres Studienprojektes 2022, bedingt durch Corona auch größtenteils in virtueller Zusammenarbeit, den Prototyp realisiert haben, danken wir für ihren Einsatz.

Literatur

ACHLEITNER, Ann-Kristin: *Start-up-Unternehmen*. URL

<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/start-unternehmen-42136/version-265490>. – Aktualisierungsdatum: 14.02.2018 – Überprüfungsdatum 05.01.2022

AUER, BENJAMIN ; ROTTMANN, HORST ; KAMPS, UDO: *Trend : Definition: Was ist "Trend"?* URL

<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/trend-50522/version-273741>. – Aktualisierungsdatum: 19.02.2018 – Überprüfungsdatum 05.01.2022

BECKER, Wolfgang ; ULRICH, Patrick ; BOTZKOWSKI, Tim ; FIBITZ, Alexandra ; STRADTMANN, Meike: *Kooperationen zwischen Mittelstand und Start-up-Unternehmen*. Wiesbaden, Heidelberg : Springer Gabler, 2018 (Management und Controlling im Mittelstand)

CHESBROUGH, Henry William: *Open innovation : The new imperative for creating and profiting from technology*. Boston, Mass. : Harvard Business School Press, 2006

- DGB-INDEX GUTE ARBEIT: *Report 2022: Digitale Transformation - Veränderung der Arbeit aus Sicht der Beschäftigten* (2022). URL www.dgb-index-gute-arbeit.de – Überprüfungsdatum 05.01.2022
- DURST, Michael ; STANG, Stefanie ; STÖBER, Lena ; EDELMANN, Fritz: *Kollaboratives Trendmanagement*. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 47 (2010), Nr. 3, S. 78–86
- ERNST & YOUNG GMBH: *Rekordjahr vorerst beendet: Weniger Groß-Deals führen zu Rückgang bei Startup-Finanzierungen*. Berlin, 11.01.2023. URL https://www.ey.com/de_de/news/2023/011/weniger-gross-deals-fuehren-zu-rueckgang-bei-startup-finanzierungen – Überprüfungsdatum 16.01.2023
- EXPERTEN.DE: *Versicherungen: Vermittler für junge Leute wichtiger als Portale*. URL <https://www.experten.de/2021/10/versicherungen-vermittler-fuer-junge-leute-wichtiger-als-portale/> – Überprüfungsdatum 16.01.2023
- FISCHER, Thomas ; KORELL, Markus ; HAHNENWALD, Heiko: *TrendArena® - Trendmanagement statt Kristallkugel*. 2018
- GDV, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.: *Fakten zur Versicherungswirtschaft* (2022), S. 23. URL <https://www.gdv.de/gdv/fakten-zur-versicherungswirtschaft-102122> – Überprüfungsdatum 16.01.2023
- GEDIMINAS ADOMAVICIUS, JESSE C. BOCKSTEDT, ALOK GUPTA, AND ROBERT J. KAUFFMAN: *Making Sense of Technology Trends in the Information Technology Landscape*
- HELMOLD, Marc: *New work, transformational and virtual leadership : Lessons from COVID-19 and other crises*. Cham, Switzerland : Springer, 2021 (Management for professionals)
- HOFMANN, Josephine ; PIELE, Alexander ; PIELE, Christian: *New Work. Best Practices und Zukunftsmodelle*. 2019
- HORX, Matthias ; GATTERER, Harry ; BLOCK, Judith ; ERLER, Gisela ; GRABMEIER, Stephan ; HORX, Tristan ; HORX-STRATHERN, Oona ; KIRIG, Anja ; KÜSTENMACHER, Werner Tiki ; MATZIG, Gerhard ; PAPASABBAS, Lena ; PFUDERER, Nina ; SCHULDT, Christian ; SIEGISMUND, Victoria: *Zukunftsreport 2022*. 1. Auflage HORX, Matthias (Hrsg.). Frankfurt am Main : Zukunftsinstitut, 2021
- IFO INSTITUT, Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V.: *Benchmarking Digitalisierung in Deutschland* (2021). URL <https://www.ifo.de/publikationen/2021/monographie-autorenschaft/benchmarking-digitalisierung-deutschland> – Überprüfungsdatum 16.01.2023
- JÁNSZKY, Sven Gábor ; ABICHT, Lothar: *2030 : Wie viel Mensch verträgt die Zukunft?* Leipzig : 2b AHEAD, 2018
- KLÖS, Hans-Peter: *Nach dem Corona-Schock: Digitalisierungspotenziale für Deutschland*. In: *IW-Policy Paper* 14/2020 (2020)
- KOLLMANN, Tobias ; STRAUß, Christina ; PRÖPPER, Anna ; FAASEN, Caroline ; HIRSCHFELD, Alexander ; GILDE, Jannis ; WALK, Vanusch: *Deutscher Startup Monitor 2022*. 2022
- LAMPER, Stefan ; PITZLER, Sebastian ; KESSLER, Anna ; GRAILLOT, Florian : *10 Years of Insurtech in Germany*. By: *InsurLab Germany, Maschmeyer Group, Astorya.io* (2023) URL <https://insurlab-germany.com/en/study-10-years-of-insurtech-in-germany-published/>— Überprüfungsdatum 19.04.2023
- LEE, Sang M. ; TRIMI, Silvana: *Convergence innovation in the digital age and in the COVID-19 pandemic crisis*. In: *Journal of business research* 123 (2021), S. 14–22

- LIEBL, Franz ; SCHWARZ, Jan Oliver: *Normality of the future: Trend diagnosis for strategic foresight*. In: *Futures* 42 (2010), Nr. 4, S. 313–327
- LORENZ-SPREEN, Philipp ; MØNSTED, Bjarke Mørch ; HÖVEL, Philipp ; LEHMANN, Sune: *Accelerating dynamics of collective attention*. In: *Nature communications* 10 (2019), Nr. 1, S. 1759
- PFADENHAUER, Michaela: *Wie forschen Trendforscher? Zur Wissensproduktion in einer umstrittenen Branche*. Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research, Vol 5, No 2 (2004): Qualitative Market, Media and Opinion Research (2004)
- PIEZUNKA, Henning ; DAHLANDER, Linus: *Distant Search, Narrow Attention: How Crowding Alters Organizations' Filtering of Suggestions in Crowdsourcing*. In: *Academy of Management Journal* 58 (2015), Nr. 3, S. 856–880
- PILLKAHN, Ulf: *Trends und Szenarien als Werkzeuge zur Strategieentwicklung : Wie Sie die unternehmerische und gesellschaftliche Zukunft planen und gestalten*. Erlangen : Publicis Corporate Publ, 2007
- RUST, Holger: *Das Anti-Trendbuch : Klares Denken statt Trendgemunkel*. Wien : Ueberreuter, 1997
- SCHWARZ, Dennis ; HANDELSBLATT.COM: *Deutschland befindet sich auf dem Scheideweg: Fintech-Standort 2023 auf dem Prüfstand*. URL <https://www.handelsblatt.com/finanzen/banken-versicherungen/banken/finanz-start-ups-deutschland-befindet-sich-am-scheideweg-fintech-standort-2023-auf-dem-pruefstand/28884614.html>. – Aktualisierungsdatum: 01.11.2023 – Überprüfungsdatum 16.01.2023
- SIEBE, Andreas ; FINK, Alexander: *Handbuch Zukunftsmanagement : Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung*. 1. Aufl. Frankfurt am Main : Campus Verlag GmbH, 2006
- STARTUPDETECTOR: *62 neue Startups werden durchschnittlich jede Woche in Deutschland gegründet*. URL <https://www.startupdetector.de/> – Überprüfungsdatum 16.01.2023
- SUROWIECKI, James: *The Wisdom of Crowds*. Westminster : Knopf Doubleday Publishing Group, 2005
- VAHS, Dietmar ; BREM, Alexander: *Innovationsmanagement : Von der Idee zur erfolgreichen Vermarktung*. 5. überarbeitete Auflage 2015. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2015
- ZUKUNFTSINSTITUT: *Methoden der Trend- und Zukunftsforschung*. URL <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/methoden-der-trend-und-zukunftsforschung/> – Überprüfungsdatum 18.01.2023

Ansatz zur Kollaboration in Wertschöpfungsnetzwerk-zentrierten Innovationsprozessen Smarter Produkte

Approach for collaboration in value network-centric innovation processes of smart products

Damun Mollahassani¹, Yannick Juresa¹, Thomas Eickhoff¹, Jens C. Göbel¹

¹RPTU, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung, Kaiserslautern
mollahassani@mv.uni-kl.de

Abstract (deutsch): Der Wandel traditioneller mechatronischer Produkte hin zu smarten interdisziplinären Produkten führt zu einer erhöhten Komplexität aller Prozesse entlang des Produktlebenszyklus. Um in diesem Kontext Innovationen hinreichend schnell vorantreiben zu können, ist eine effiziente Kollaboration in der Innovationsphase notwendig die sich über alle beteiligten Disziplinen und Innovationspartner (Hersteller, Zulieferer, Forschungspartner) erstreckt. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz zielt auf die Unterstützung einer modellbasierten Innovationsentwicklung von Smarten Produkten innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken ab. Zentraler Bestandteil des Ansatzes ist eine kollaborative Wissensbasis, die den Innovationsprozess in diesem Umfeld unterstützen kann, bzw. welche Anforderungen an diese sich aus den genannten Rahmenbedingungen ergeben. Konkrete Ansätze für eine entsprechende technische Umsetzung werden aufgezeigt. Durch ein graphorientiertes Datenmodell und den Einsatz einer mehrstufigen Tagging-Systematik wird eine effiziente Vernetzung des Wissens aller betroffenen Partner ermöglicht. Die Funktionsweise des Ansatzes wird anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels validiert.

Keywords (deutsch): Model-Based Systems Engineering, Innovationsmanagement, Prozessmodelle, Wissensbasis, Innovationsprozess

Abstract (english): The transformation of traditional mechatronic products to smart, interdisciplinary products leads to increased complexity in all processes along the product lifecycle. In order to be able to drive innovations forward sufficiently quickly in this context, efficient collaboration is required in the innovation phase that extends across all disciplines involved at all innovation partners concerned (manufacturers, suppliers, research partners). The approach presented in this paper aims at supporting a model-based innovation development of smart products within value networks. A central component of the approach is a collaborative knowledge base that can support the innovation process in this environment, or which requirements for this arise from the framework conditions mentioned. Concrete approaches for a corresponding technical implementation are shown. A graph-oriented data model and the use of a multi-level tagging system enable an efficient networking of the knowledge of all partners involved. The functionality of the approach is validated by means of an industrial application example.

Keywords (english): Model-Based Systems Engineering, Innovation Management, Process Models, Knowledge base, Innovation process

1 Einleitung

Klassische Produkte unterliegen einer Transformation zu hochkomplexen Smarten Produkten (Smartifizierung). Ihre physischen Funktionsumfänge werden unter anderem mit Smarten Services erweitert und komplettieren somit die Nachfrage der Kunden (Servitisierung) (Porter und Heppelmann 2014). Eine Erweiterung und Steigerung der Komplexität fordert simultan eine erweiterte und verdichtete Kollaboration zwischen den unterschiedlichen beteiligten Protagonisten. Bei der Entwicklung von Smarten Produkten kommt hinzu, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Disziplinen an einer Entwicklung beteiligt sind und miteinander kollaborieren müssen (Abramovici et al. 2016). Darüber hinaus entwickeln sich bestehende Wertschöpfungsketten zu dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken transformiert, sodass ein Stakeholder meist mehrmals mit unterschiedlichen Rollen innerhalb eines Wertschöpfungsnetzwerkes (WSN) vertreten ist (Ricciotti 2020). Dieser Wandel von Produkte und die Integration von mehr Stakeholdern, Rollen und Anforderungen führt unweigerlich zu einer dramatisch zunehmenden Komplexität der Innovationsprozesse (Müller-Prothmann und Dörr 2020). Der verlustfreie und schnelle Transfer von Innovationen in die konkrete Produktentwicklung ist einer der Key-Performance-Indikatoren (KPI) innerhalb der zukünftigen Konkurrenz zwischen unterschiedlichen Innovationswertschöpfungsnetzwerken. Hierbei spielt die Kollaboration eine sehr wichtige Rolle und ermöglicht einen verbesserten Transfer in nachfolgende Phasen bzw. fördert gleichzeitig die Innovationsentwicklung (Zerfaß und Möslin 2009; Galaso und Kovářik 2018; Geurts et al. 2022; Becker und Dietz 2004). Eine frühzeitige methodische und informationstechnische Unterstützung von Innovations-Kollaborationsprozessen und deren Schnittstellen zu den verteilten Engineering-Prozessen kann dazu beitragen, diese Situation zu verbessern (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2017). Ansätze des Wissensmanagements erlauben das Teilen bzw. den Austausch von Wissen zwischen unterschiedlichen Stakeholdern (Büchel und Raub 2002). Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Innovationsmethode ist es, basierend auf einer Wissensbasis, Kollaborationen der Innovationsentwicklung innerhalb von WSN zu unterstützen. Dieser Ansatz beinhaltet, ausgehend von durchgehend netzwerkorientierten Kollaborationsprozessen, geeignete Kollaborationsmethoden sowie eine integrierte IT-gestützte Wissensbasis zur Unterscheidung spezifischer Compliance-Anforderungen verschiedenster Stakeholder.

2 Innovations-Wertschöpfungsnetzwerke

Durch die Smartifizierung und Servitization von Produkten und der dazugehörigen Innovationsentwicklung kommt es vermehrt zu einer Entwicklung innerhalb von dynamischen und volatilen WSN. Die Entwicklung von hochkomplexen Innovationen erfordert den Austausch von Disziplinwissen und interdisziplinäre Zusammenarbeit (Farhadi 2019; Barczak et al. 2021). Ein Beispiel für eine solche Innovationsentwicklung ist die Funktion des „Wireless Charging“, welche dem Kunden den Service anbietet, während der Fahrt sein Mobiltelefon kontaktlos zu laden (Wireless Power Consortium). Das Smarte Produkt Wireless Charger besitzt eine Vernetzung von Mechanik und Sensoren bzw. kommuniziert mit weiteren Systemen und ist in ein bestehendes Ökosystem integriert worden. Durch einen recht begrenzten Innovationsumfang und Anzahl an beteiligten Stakeholdern bietet es sich an, die Innovation im späteren Verlauf zur Validierung des vorgestellten Ansatzes zu nutzen. Im Falle des Wireless Chargers könnte das Disziplinwissen unter anderem Wissen über Einflüsse auf andere Systeme sein bzw. Simulations- oder Entwicklungswissen. Der Wandel hin zu disruptiven Geschäftsmodellen und Innovationen führt gleichzeitig zu einer größeren Gruppe beteiligter Stakeholder, denen es (vor allem in einer sehr frühen Entwicklungsphase) ermöglicht werden muss, zu kollaborieren (Kohl et al. 2015; Geurts et al. 2022). Der frühzeitige Eingriff und die Förderung der Kollaborationsaktivitäten z.B. innerhalb der Innovationsentwicklung kann somit die Entwicklungszeit und -kosten effizienter machen bzw. es kann eine deutlich bessere Qualität im Hinblick auf das Ergebnis erreicht werden (Man und Duysters 2005). Dabei spielt die Wissenskollaboration eine besondere Rolle bei der gemeinsamen Innovationsentwicklung. Im Forschungsprojektes GENIAL!

wurde festgestellt, dass eine gemeinsame Wissensbasis und Wissenskollaboration die Innovationentwicklung deutlich beschleunigen können (GENIAL! 2018). Gleichzeitig wurde im Kontext des Projektes TRANSFORM die gemeinsame Wissenskollaboration innerhalb von WSN hinsichtlich bestehender Defizite beim Austausch von Wissen zwischen unterschiedlichen Entwicklungspartnern analysiert. Hier kommt es meist nur zu einem bi-direktionalen Austausch und vereinzelt zu einer Wissenskollaboration (TRANSFORM 2021). Das Kaiserslauterer Innovation Roadmap V-Modell (KIRV) fokussiert eine Erweiterung des bestehenden Produktentwicklungsprozesses hinsichtlich der Innovationsphase, welche mit dem Ende der Roadmapping Phase beginnt und in der frühen Produktentwicklungsphase des MVPE-Ansatzes mündet (Mollahassani et al. 2021). Als Basis und Grundmodell für das KIRV-Modell dient das MVPE-Modell, welches durch einen Fokus auf Innovationen erweitert wurde (Eigner et al. 2014). Mit Abschluss des Roadmapping beginnt die KIRV-Methode, welche eine fokussierte Entwicklung der Innovation betrachtet und eine Umsetzung bzw. folgende Produktentwicklung anstrebt. Der nahtlose Übergang zwischen der Innovations- und Produktentwicklungsphase kann damit unterstützt werden. Bestehende Innovationsmethoden betrachten meist weder die Aspekte einer Wissensbasis oder die dazugehörige Wissenskollaboration noch den benötigten Entwicklungsfokus auf Smarte Produkte. Ansätze wie in (Amati et al. 2020) repräsentieren eine interne Innovationsentwicklung bzw. Roadmapping und den Austausch von Wissen zwischen unterschiedlichen Abteilungen bei der Reifenentwicklung von Pirelli. Durch ein Rahmenwerk wird es den Protagonisten ermöglicht, das Roadmapping zu verwalten. Der Wissensaustausch wird durch eine Datenbasis realisiert, jedoch ist der gesamte Ansatz für die interne Verwendung in einem Unternehmen ausgelegt und betrachtet somit keine gemeinsame WSN-entwicklung mit mehreren unterschiedlichen Stakeholdern. Im Ansatz von (Kage et al. 2016) wird die Entwicklung von Smarten Produktinnovationen in WSN fokussiert. Die Entstehung des WSN ist im Vordergrund, um zu garantieren, dass die Innovation umgesetzt werden kann. Unterstützt wird der Ansatz durch einen Prozess bei der Stakeholder-Auswahl. Aspekte wie eine gemeinsame Wissenskollaboration auf Basis einer Wissensbasis werden nicht betrachtet. Der Wissensmanagement-Ansatz von (Büchel und Raub 2002) beschreibt die Wissensverteilung in WSN. Fokus ist es, ein Wissensnetzwerk aus bestehendem Wissen von einzelnen Unternehmen zu erschaffen, und dieses Wissen intern zugänglich zu machen. Hierfür wird unter anderem eine Wissensbasis genutzt, um zukünftige Innovationsentwicklungen mit bestehendem internem Wissen zu unterstützen. Eine gemeinsame Wissenskollaboration oder eine Methode zu Innovationsentwicklung bzw. Wissensförderung werden nicht beleuchtet. Für die zukünftige gemeinsame Innovationsentwicklung innerhalb von WSN wird eine ganzheitliche Innovationsmethode benötigt, die die Aspekte der Kollaboration und dem Wissensaustausch miteinander kombiniert und fördert. Gleichzeitig muss allen beteiligten Stakeholdern ermöglicht werden, modellbasiert nach potenziellem Wissen zu suchen und auf Grundlage dessen mit weiteren Stakeholdern zu kollaborieren.

3 Methode zur Unterstützung von Innovationsprozessen Smarter Produkte

3.1 Kaiserslauterer Innovation Roadmap V-Modell

Ein koordiniertes Vorgehen bei der Entwicklung von Innovationen erfordert entsprechende methodische Unterstützung. Die Übergänge zwischen den einzelnen Phasen im Lebenszyklus eines Produktes oder der Austausch mit weiteren Stakeholdern sind potenzielle Gefahrenstellen für Wissens- und Informationsverluste (Mazloomi Khamseh und Jolly 2008). Das KIRV-Modell stützt sich hierbei auf einen methodischen Ansatz, der sogenannten KIRV-Methode, und fördert somit die Innovation mit einem sechsstufigen Innovationsprozess, siehe Abbildung 1 (Mollahassani et al. 2022b). Der Fokus der KIRV-Methode liegt auf der Schaffung von WSN und der Förderung der Kollaboration zwischen den einzelnen Stakeholdern innerhalb dieser. Jede Innovationsprozessphase wird durch ein dazugehöriges Methodenmodul unterstützt. Das Methodenmodul beinhaltet wiederum vier weitere Prozessschritte und verfeinert somit den übergeordneten Innovationsprozessschritt. Man

unterscheidet bei den Methodenmodulen zwischen internen und externen Innovationsprozessschritten. Interne Prozessschritte werden von jedem Stakeholder innerhalb des WSN abgehalten und stehen dabei in Kollaboration mit anderen Stakeholdern. Während des externen Prozessschrittes sind es meist innerbetriebliche Aktivitäten der jeweiligen Stakeholder und es bedarf keiner Kollaboration zu weiteren Stakeholdern. Die Ergebnisse der externen Prozessschritte werden wiederum innerhalb des WSN geteilt. Für den Austausch von Wissen zwischen den unterschiedlichen Stakeholdern nutzt die KIRV-Methode eine kollaborative Wissensbasis, welche in Kapitel 3 näher beschrieben wird (Mollahassani et al. 2022a). Innerhalb der KIRV-Methode gibt es unterschiedliche Rollen und Funktionen sowie einen Innovationstreiber, der als Ideengeber eine leitende Rolle innerhalb des WSN einnimmt. Innovationsingenieure werden von jedem Stakeholder gestellt und vertreten diese innerhalb des WSN. Sie vertreten die jeweiligen Interessen des Unternehmens bzw. Stakeholders und sind für die initiale Kollaboration zu weiteren Stakeholdern verantwortlich. Sie werden von weiteren Ingenieuren aus ihrem Unternehmen unterstützt, z.B. durch Entwicklungs- oder Produktingenieure. Der WSN-Supporter, stellt die Wissensbasis und die benötigte Infrastruktur zur Verfügung und sorgt für einen reibungslosen technischen Ablauf. Der Innovationsprozess in der KIRV-Methode beginnt mit einer internen Phase, der Technologie- und Ideensammlung, zuvor hat der Innovationstreiber die Innovation initial ausgearbeitet und den nötigen Innovationsbedarf detektiert. Innerhalb der ersten Innovationsprozessphase wird die Innovation mithilfe einer Innovationsplattform, welche vom WSN-Supporter bereitgestellt wird, gepitcht. Informationen bzgl. Subsysteme und Gesamtsystem werden zusätzlich zur Verfügung gestellt und komplementieren die initiale Informationsverteilung innerhalb der Wissensbasis. Im nächsten Schritt werden Anforderungen an die zukünftigen Stakeholder gestellt. Alle diese erstellten Informationen werden nun der Innovationsplattform zugeführt und ermöglichen dann die Durchführung eines Crowd-Engineering Ansatzes, wodurch das Maximum an potenziellen Lösungen erreicht werden kann. Mit Abschluss des Crowd-Engineering Ansatzes, endet auch die erste Phase der KIRV-Methode. In der zweiten Phase liegt der Fokus auf der Technologie- und Ideenbewertung. Diese findet extern statt, bzw. in diesem Fall nur beim Innovationstreiber. Erst wenn eine Phase in zufriedenstellender Qualität abgeschlossen ist, ist es möglich die nächste Phase zu beginnen. Die vorgeschlagenen Lösungsmöglichkeiten innerhalb der

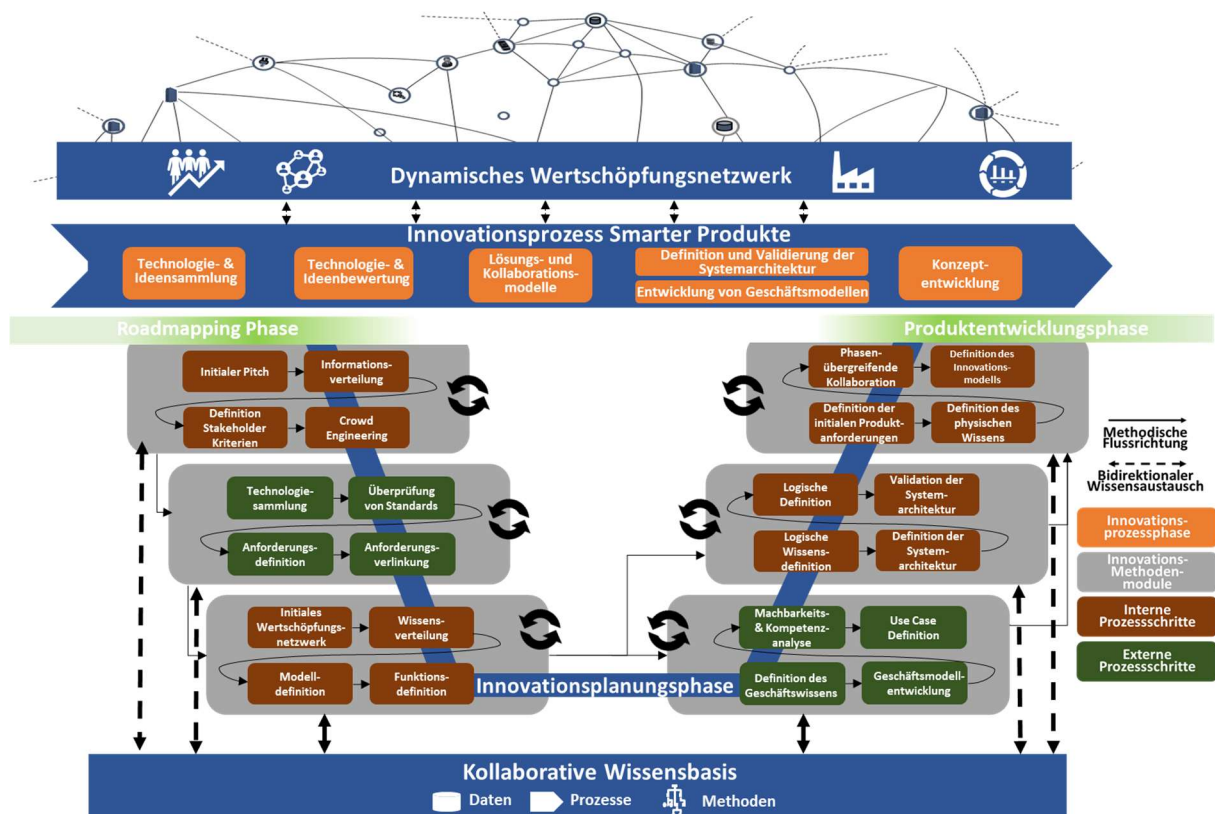


Abbildung 1 Kaiserslauterner Innovation Roadmap V-Modell (KIRV) Methode (Mollahassani et al. 2022b)

Wissensbasis werden vom Innovationstreiber eingesammelt, gesichtet und hinsichtlich bestehender Standards oder Lösungen gegengeprüft. Des Weiteren werden die Anforderungen bzgl. der Innovation weiter konkretisiert, um den möglichst maximalen Lösungsraum abzudecken. Ermittelte Lösungsmöglichkeiten werden mit den bestehenden Anforderungen verglichen und gleichzeitig verlinkt, somit findet simultan eine Stakeholder-Auswahl statt. Mit der Festlegung der Stakeholder schließt die zweite Phase des Innovationsprozesses ab. Mit dem Beginn der dritten Phase und dem Erstellen von Lösungs- und Kollaborationsmodellen ergeben die zuvor ausgewählten Stakeholder das erste initial geschlossene WSN der Innovation. Unterschiedliche Stakeholder treffen womöglich das erste Mal aufeinander oder haben zuvor noch nie untereinander kollaboriert bzw. kennen die unterschiedlichen Wissensstände weiterer Stakeholder hinsichtlich der Innovation nicht. Initiale Lösungsmöglichkeiten innerhalb der Wissensbasis werden von den jeweiligen verantwortlichen Stakeholdern konkretisiert und mit weiterem Wissen angereichert, gleichzeitig wird das Gesamtsystem mit den zugehörigen Subsystemen innerhalb der Wissensbasis abgebildet und den verantwortlichen Stakeholdern zugewiesen. Beziehungen zwischen unterschiedlichen Stakeholdern werden durch die Definition der Subsysteme initial definiert. Weitere Kollaborationsmöglichkeiten können mithilfe der Suche innerhalb der Wissensbasis geschaffen werden, näheres dazu ist in Kapitel 3 beschrieben. Durch die intensive Kollaboration der Stakeholder untereinander können die definierten Anforderungen und die initialen Lösungsmöglichkeiten bzw. Subsysteme in konkretere funktionale Lösungen überführt werden. Mit der Definition der funktionalen Architektur schließt die dritte Phase des Innovationsprozesses ab. Die darauffolgenden Phasen laufen parallel ab, sowohl intern als auch extern. Zunächst erarbeiten alle Stakeholder extern persönliche Geschäftsmodelle, ohne jegliche Kollaboration zu weiteren Unternehmen im WSN. Hierfür wird mithilfe der zuvor gewonnenen Erkenntnisse und Wissensstände das eigene Geschäftswissen angereichert und erweitert. Aus diesen Erkenntnissen entstehen persönliche Geschäftsmodelle für jeweils unterschiedliche und weiter konkretisierte Subsysteme. Für einen garantierten wirtschaftlichen Erfolg, sowie die Möglichkeit der technischen Umsetzung, unter den konkreteren Anforderungen, werden Machbarkeit- und Kompetenzanalysen durchgeführt. Nach erfolgreichem Resultat werden unterschiedliche Use Cases für die unterschiedlichen Subsysteme der Stakeholder definiert. Gleichzeitig entsteht in der internen Phase eine Definition der Systemarchitektur und deren Validierung. Hierzu werden zunächst die bestehenden Wissensmodelle um weitere logische Wissens Elemente erweitert und der Wissensbasis hinzugefügt. Im Anschluss wird die initiale Innovationsystemarchitektur definiert und mithilfe des zuvor definierten Wissens der logische Aufbau definiert. Mit der Validierung der Resultate bzw. der Systemarchitektur endet auch diese Phase. Innerhalb der letzten Phase, der sogenannten Konzeptentwicklung, liegt der Fokus auf der Transformation der Innovation in die frühe Produktentwicklung. Hierbei werden auch Produktentwicklungsingenieure zu dieser Phase hinzugezogen, um einen nahtlosen Übergang zu garantieren. Initiale Produktanforderungen werden definiert, welche im weiteren Verlauf der Produktentwicklung verfeinert und konkretisiert werden. Neu entstandenes bzw. entwickeltes Wissen hinsichtlich der physikalischen Realisierung wird definiert und festgehalten. Vor der endgültigen Definition des Innovationsmodells, welches an die Produktentwicklung übergeben wird, müssen alle Stakeholder ihre Subsysteme miteinander abstimmen und gemeinsam am Innovationsgesamtmodell kollaborieren bzw. es integrieren. Durch die gemeinsame und subsystemübergreifende Kollaboration soll vermieden werden, dass es zu Verlusten in der Innovationsmodelldefinition kommt oder Wissen verloren geht. Ausgehend vom Ansatz der KIRV-Methode ergeben sich folgende Forschungsfragen für die Entwicklung einer unterstützenden Wissensbasis:

- RQ1: Wie kann eine Gesamtarchitektur einschließlich der erforderlichen Subsysteme für die benötigte Wissensbasis modelliert werden.
- RQ2: Wie können Wissensmodelle und -elemente innerhalb der benötigten Wissensbasis semantisch vernetzt werden?
- RQ3: Wie können Import und Export von Wissensmodellen in bzw. aus der Wissensbasis ermöglicht werden?

- RQ4: Wie können technisch und prozessual erforderliche Intellectual Property (IP) Aspekte bei der Modellierung des Wissensaustauschs und der Wissenskollaboration sichergestellt werden?
- RQ5: Wie kann eine Integration einer Innovationswissensbasis in bestehende IT-Ökosysteme ermöglicht werden?

3.2 Wissensbasis zur Förderung der Innovationskollaboration

Zur Förderung der Kollaboration innerhalb der KIRV-Methode ist der Einsatz einer Wissensbasis erforderlich (Mollahassani et al. 2022a). Dabei muss sie ganzheitlich zum Einsatz kommen und die Anwender während der gesamten Innovation unterstützen, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Sie ist verantwortlich für die Sicherstellung des gemeinsamen Wissensaustauschs und der dazugehörigen gemeinsamen Innovationsmodellierung bzw. fördert sie die benötigte Kollaboration innerhalb der Innovationsphase. Die Wissensbasis repräsentiert einen Explorationsraum, welcher es einem ermöglicht, nach relevantem Wissen zu suchen. Eine wichtige Frage hierbei ist, welche Arten von Wissensquellen betrachtet werden müssen. Das Wissen bzw. die Wissensquellen, welche von den Stakeholdern genutzt werden, stammen unter anderem aus vorherigen Entwicklungen, eigenen wissenschaftlichen Ergebnissen bzw. Forschungsergebnissen und repräsentieren z.B. Komponentenwissen, System- bzw. Architektur-, Prozess- oder Simulationswissen. Im Kontext der Innovation und der zuvor genannten Wissensquellen findet die Modellierung unter anderem in SysML mit Systemstrukturen, BPMN mit Geschäftsprozesswissen, in PLM mit Produktstrukturen und -modellen oder in Modelica mit Simulationen statt. Nachdem die Wissensmodelle importiert wurden, müssen diese innerhalb einer Datenbank gesichert werden. Dabei bietet es sich an, diese in einer graphenbasierten Datenbank oder z.B. einer SQL-Datenbank zu sichern. Jeder einzelne Stakeholder besitzt mindestens eine private und persönliche Gruppe innerhalb der Wissensbasis. Simultan sind weitere Gruppen vorhanden, welche sich mit einzelnen Subsystemen beschäftigen oder aufgrund von Kollaborationsbedürfnissen entstanden sind. Diese realisieren somit die Abbildung der Gesamtarchitektur innerhalb der Wissensbasis. Jedes einzelne Subsystem verfügt somit über eine Gruppe innerhalb der Wissensbasis (RQ1). Wie können die importierten Wissensmodelle miteinander vernetzt werden und zwischen einander ausgetauscht werden? Die Vernetzung findet dreistufig statt und mithilfe eines Tagging-Systems. Eine Ontologie wird nicht genutzt, da bei jeder neuen Innovation eine neue erstellt werden muss oder eine bestehende erweitert. Gleichzeitig kann der Einsatz eines Tagging-Systems auch von nicht-informatikaffinen Personen ausgeübt werden. Das Tagging realisiert einen ähnlichen Kontext wie eine Ontologie. Der Innovationstreiber stellt ein Spektrum an Tags zur Verfügung, an denen sich die Innovationsingenieure bedienen können, jedoch können auch weitere Tags definiert werden. Diese neuen Tags benötigen eine Bestätigung des Innovationstreibers, sodass es zu keinem Überfluss an Tags kommt. Zunächst benötigen die Wissensmodelle eine konsistente und durchgängige Sprachregelung hinsichtlich der Benennungen. Mithilfe einer Harmonisierung durch das Tagging kann initial Wissen miteinander vernetzt werden. Beim ersten Schritt des Taggings, wird der konkrete Wissensinhalt der Modelle nicht betrachtet. Der Fokus liegt ausschließlich auf der Nomenklatur und repräsentiert somit die Anwendung eines Thesaurus-Ansatzes. Im zweiten Tagging Schritt wird der Inhalt der Modelle fokussiert und somit das vorhandene Wissen miteinander vernetzt. Dabei nutzt der Innovationsingenieur wieder die vorhandenen Tags oder erstellt neue und versieht seine Gruppen, welche die Wissensmodelle beinhalten, mit diesen Tags. Gleichzeitig können die importierten Modelle extern analysiert werden, um deren Wissensinhalt zu analysieren. Basierend auf der Analyse kann ein erweitertes und ergänzendes Tagging stattfinden. Nun sind alle Gruppen bzw. Wissensmodelle hinsichtlich ihrer Nomenklatur und Wissensinhalts miteinander vernetzt. Durch die Schritte eins und zwei des Taggings, findet eine Vernetzung der Tags bzw. des Wissens untereinander statt. Komponenten oder Subsysteme können untereinander Einfluss nehmen. Dieser Einfluss besteht nicht nur auf der physischen Ebene, sondern auch auf der Modellierungsebene. Für eine komplette Vernetzung der Wissensmodelle und dem gleichzeitigen Miteinbeziehen der Einflüsse müssen die Einflüsse auch durch die Tags repräsentiert werden. Hierzu gibt es die Auswahlmöglichkeit innerhalb der Tags, hinsichtlich „has Influence“ oder „has Part“, um somit die Tags in Relation zueinander zu

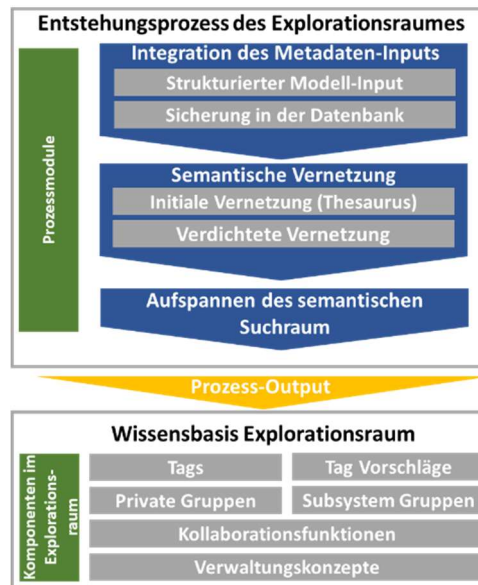


Abbildung 2 Prozess zur Exploration von Wissen

stellen. Mit Abschluss der dritten Tagging Stufe ist auch die semantische Vernetzung der Wissensmodelle abgeschlossen. Durch das Erstellen von Relationen werden die Eigenschaften des Taggings hinsichtlich einer Ontologie um den Aspekt der semantischen Tripple erweitert. Nach Abschluss der Vernetzung wird ein semantischer Suchraum erschaffen, welcher die Wissensbasis und deren Wissensinhalte repräsentiert. Innerhalb des Suchraumes können nun die Stakeholder des WSN nach relevanten Tags suchen und dann mit den dazugehörigen Verantwortlichen kollaborieren bzw. Wissensmodelle austauschen. Gleichzeitig schlägt die Wissensbasis, bei der Suche nach Tags, weitere interessante Tags vor. Diese Vorschläge basieren auf vorangegangene Suchen anderer Stakeholder (RQ2). Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, befinden sich innerhalb des Explorationsraumes nur Wissensmodelle, die ein strukturiertes Format besitzen. Das bedeutet, dass Wissensmodelle auf Exporte in Extensible Markup Language (XML), Standard for the exchange of product model data (STEP) oder JavaScript Object Notation (JSON) basieren müssen. Wissensmodelle stellen dabei eine Repräsentation von relevantem Wissen hinsichtlich der Innovation dar. Durch die Beschränkung soll ein einfacher Import und Export der Wissensmodelle gegeben sein (RQ3). Es muss eine initiale Kollaboration und Wissensaustausch ermöglicht sein. Innerhalb der Gruppen kann gemeinsam Wissen geteilt und gleichzeitig an Wissensmodellen modelliert werden. Durch die gemeinsame Modellierung innerhalb eines geschützten Bereichs, kann der Austausch von Wissen gefördert werden. Durch den beschränkten Zugriff soll das geistige Eigentum der Stakeholder geschützt werden, da nur durch eine Einladung Zugriff erfolgen kann. Innerhalb dieser Gruppen ist es für die Nutzer möglich, ihre Wissensmodelle abzulegen und diese im Gesamtkontext zu vernetzen (RQ4). Der einfache Zugang, und gleichzeitig die einfache Integrationsmöglichkeit in bestehende Ökosysteme ist webbasiert realisiert worden und ermöglicht den Import von Modellen in einer standardisierten und strukturierten Sprache und muss somit nicht in bestehende Ökosysteme integriert werden (RQ5).

4 Anwendung der Innovationsmethode Use Case „Wireless Charger“

Als Validierung des vorgestellten Ansatzes wurde wie in (Mollahassani et al. 2022b) die innovative Funktion des Wireless-Chargers genutzt, dem kabellosen Laden des Mobiltelefon während der Fahrt. Der zuvor vorgestellte Innovationstreiber innerhalb der KIRV-Methode beginnt mit der ersten Phase des Innovationsprozess, der sogenannten Technologie- und Ideensammlung, welcher ein interner Prozessschritt ist und weitestgehend innerhalb des WSN stattfindet. Hierfür wird die Innovationsidee aus seinem Fokus, hinsichtlich Ziele und Umfang, definiert. Intern gesammeltes Wissen, Informationen

oder Erkenntnisse von Innovationstreiber müssen aufbereitet werden für den Pitch gegenüber den zukünftigen potenziellen Stakeholdern. Der Innovationstreiber beschreibt hierfür umfangreich die gesamte Innovation und die dazugehörigen Subsysteme. Diese dient den potenziellen Stakeholdern, als Orientierung bei der persönlichen Lösungsfindung. Gleichzeitig werden intern beim Innovationstreiber initiale Anforderungen an die benötigten Stakeholder definiert, welche im Nachgang bei der Stakeholder Auswahl genutzt werden. In dem hier betrachteten Fall nutzt der Innovationstreiber unter anderem eine SysML-Umgebung für die Modellierung der Innovation. Dadurch sind auch die benötigten Informationen bzw. Anforderungen in einem SysML-Modell definiert. In Abbildung 3 sieht man einen Ausschnitt der Anforderungen an die Sensoren der Innovationsidee, solche Anforderungen hat der Innovationstreiber initial für alle Subsysteme in seinem SysML-Modell definiert. Das Modell wurde dabei intern beim Innovationstreiber von mehreren Abteilungen gemeinsam erstellt, dabei sind unter anderem Wissens-, Innovations-, Prozess- oder auch Produktentwicklungsingenieure beteiligt. Anschließend wird dieses Modell bei einem Crowd Engineering Ansatzes genutzt, um die potenziellen und relevanten Stakeholder zu kontaktieren. Der Crowd Engineering Ansatz wird genutzt, um das Maximum an möglichen Lösungsmöglichkeiten zu erhalten. Ist das Ergebnis nicht zufriedenstellend oder die Beteiligung zu gering, wird diese Phase im Loop-Verfahren wiederholt, wie bereits in Kapitel 3 erwähnt. Der Innovationstreiber nutzt bestehende Innovationsplattformen, aufgrund des innovativen Umfeldes und der Bereitschaft der Beteiligten, für die Informationsverteilung des SysML-Modells bzw. dem initialen Inhalt der Wissensbasis. Die Innovationsplattform und die dazugehörige Wissensbasis werden vom WSN-Supporter bereitgestellt. Potenzielle Stakeholder können nun diese Informationen von der Innovationsplattform abrufen. Besteht weiteres Entwicklungsinteresse, so nutzt der Stakeholder mit seinen Innovationsingenieuren die Wissensbasis, um eigenes relevante Wissen abzulegen. In dem hier vorliegenden Fall nutzt man beim Import von Wissensmodellen ausschließlich den XML-Standard, wie zu sehen in Abbildung 4, aus dem Grund, dass das abschließende Innovationsmodell und vor allem die fortlaufende gemeinsame Modellierung in einer SysML Umgebung stattfinden soll. Hierbei ist zu beachten, dass die Stakeholder einen Umfang ihres bestehenden Wissens dort einpflegen, da die Inputs in der nächsten Innovationsphase vom Innovationstreiber gesichtet und bewertet werden, wie zu sehen in Abbildung 4. Mit Abschluss des Crowd Engineering Ansatzes endet auch die Phase Technologie- und Ideensammlung. Die nächste Phase im Innovationsprozess ist die Technologie- und Ideenbewertung, welche extern vom WSN stattfindet, in die andere Partner aus dem WSN nicht eingebunden sind und somit nur intern beim Innovationstreiber vorstättengeht. Der Innovationstreiber wird von eigenen Ingenieuren aus relevanten Abteilungen unterstützt, sodass das maximale Spektrum der Innovation abgedeckt ist. Der Input der Stakeholder wird gesichtet und die Wissensmodelle in der Wissensbasis untersucht. Gleichzeitig untersucht der Innovationstreiber die Ergebnisse hinsichtlich bestehender Standards und Patente, sodass keine Verletzung vorliegt. Die zuvor durch den Innovationstreiber definierten Anforderungen werden nun weiter konkretisiert mithilfe interner Abteilungen. Durch die verfeinerten Anforderungen ist es nun möglich diese mit den bereitgestellten Lösungsmöglichkeiten der Stakeholder zu vergleichen. Es findet eine Verlinkung der verfeinerten Anforderungen mit den

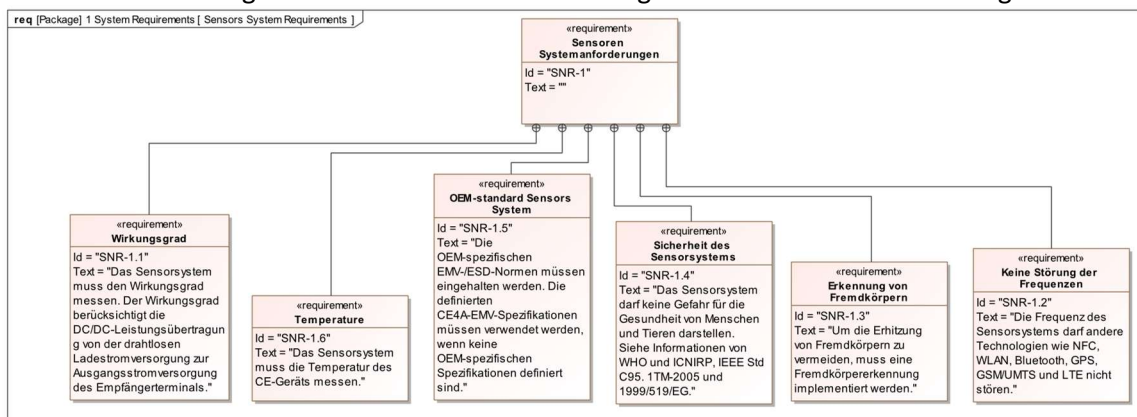


Abbildung 3 Initiale Innovationsanforderungen für potenzielle Stakeholder

potenziellen Lösungen statt. Auf Grundlage dieser Verlinkung werden bereits initiale Subsystemgruppen innerhalb der Wissensbasis erstellt, welche mit Verlauf der Innovation erweitert bzw. ergänzt werden. Gleichzeitig bieten diese Subsystemgruppen einen Raum für zukünftige potenzielle Kollaborationen. Des Weiteren findet durch die Anforderungsverlinkung eine Auswahl der Stakeholder statt und nicht relevante Stakeholder sind nicht mehr Teil der Innovationsentwicklung. Ist jede Anforderung mit einer Lösungsmöglichkeit gedeckt, so kann die zweite Phase abgeschlossen werden. Die dritte Phase beschäftigt sich mit den Lösungs- und Kollaborationsmodellen. Es stellt eine sehr wichtige Phase im Prozess dar, da nun eine vermehrte Kollaborationsfunktion stattfindet. Durch die Auswahl der Stakeholder etabliert sich das konkrete WSN, welches sich mit der Entwicklung der Innovationsidee beschäftigt. Der WSN-Supporter hat basierend auf der Stakeholder-Auswahl des Innovationstreibers persönliche Gruppen und erste Subsystemgruppen innerhalb der Wissensbasis angelegt, siehe Abbildung 4. Jeder Stakeholder des WSN besitzt eine persönliche Gruppe und mindestens eine Subsystemgruppe, basierend auf der zuvor ausgeführten Anforderungsverlinkung. Somit kann spezifisches Wissen in den konkreten Gruppen abgelegt werden und basierend darauf kollaborieren, statt das gesamte Wissen zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig kann in den Gruppen gemeinsam modelliert bzw. entwickelt werden. Für die benötigte Wissensverteilung muss zunächst Wissen von dem jeweiligen Stakeholder in die Gruppen importiert sein und dieses initial vernetzt werden. Das Innovationswissen, im Falle des Wireless Charger, kann unter anderem Entwicklungswissen zu einzelnen Komponenten sein, Wissen bzgl. vorherigen Entwicklungen und Produktionen oder auch Wissen hinsichtlich der Konstruktion bzw. von Einflüssen auf weitere Bauteile. Die Vernetzung des Wissens, welche bereits im Kapitel 3 beschrieben wurde, ist ein kontinuierlicher Prozess und begleitet die Innovationsidee bis zur Innovationsmodelldefinition, jegliches neues Wissen wird mit den Tags innerhalb der Gruppe versehen. Der Nutzen des Taggings ist, dass Wissen abrufbar wird und es entsteht neues Wissen durch die neue Verknüpfung von bestehendem Wissen. Eine Übersicht zu den bestehenden Tags und der dazugehörigen Vernetzung ist in Abbildung 4 zu sehen. Eine ausführliche Beschreibung der Vernetzung und dem Tagging ist in Kapitel 3 zu sehen. Nach der ersten Recherche für weitere Kollaborationspartner innerhalb der Wissensbasis, siehe Abbildung 4, kann die konkretere Modelldefinition stattfinden. Diese Suche nach Kollaborationspartnern ermöglicht das Schließen von Wissenslücken oder dem Kompensieren von fehlenden Entwicklungskompetenzen. Durch die neu erlangten Erkenntnisse durch die semantische Vernetzung, können weitere benötigte Subsysteme bzw. deren Gruppen in der Wissensbasis erstellt werden. Innerhalb der Gruppen findet die weiterlaufende Entwicklung der Innovation statt, hierbei kann

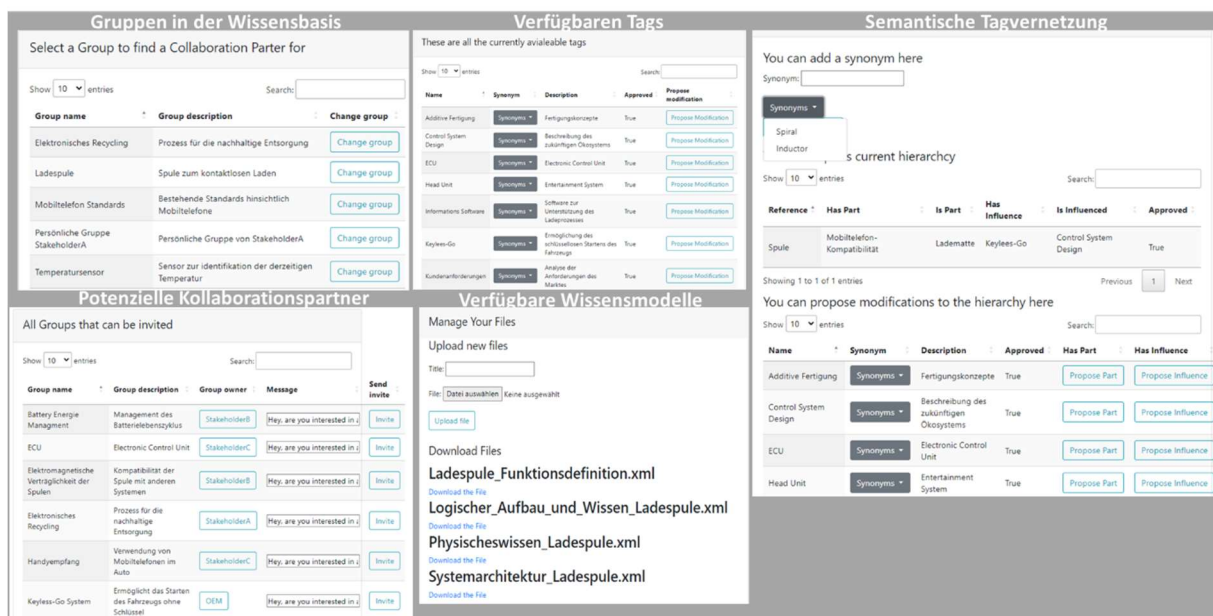


Abbildung 4 Aufbau der kollaborativen Wissensbasis

gemeinsam in den Gruppen Wissen ausgetauscht und gleichzeitig modelliert werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine separate Betrachtungsweise erschaffen wird, da stets eine gemeinsame Struktur der Innovation innerhalb der Wissensbasis besteht und die Subsysteme miteinander korrelieren. Somit werden auch als Abschluss der Lösungs- und Kollaborationsmodelle, die jeweiligen Funktionen der einzelnen Subsysteme definiert und in die Modelle integriert. Dies schließt die dritte Phase ab. Die darauffolgenden Phasen bzgl. der Definition und Validierung der Systemarchitektur und die Entwicklung von Geschäftsmodellen laufen parallel ab. Die einzelnen Geschäftsmodellphasen werden ohne Einbezug der WSN-partner entwickelt und analysiert, da von jedem Stakeholder unter Beachtung der neuen Erkenntnisse nochmals entschieden werden muss, ob ihre Lösung intern noch wirtschaftlich vertretbar ist. Hierzu wird zunächst bestehendes Geschäftswissen intern gesammelt und mit den neuen Erkenntnissen bzw. Marktprognosen kombiniert, somit definiert man das spezifische Geschäftswissen. Auf Grundlage des neuen Geschäftswissens können nun eigene Geschäftsmodelle definiert werden und vor allem Machbarkeits- und Kompetenzanalysen durchgeführt werden. All diese Aufgaben werden beim jeweiligen Stakeholder durch den Innovationsingenieur koordiniert. Dieser führt das neue Wissen aus der Wissensbasis in die einzelnen Fachabteilungen seines Unternehmens und reichert es dort an. Nachdem eine positive Rückmeldung erhalten worden ist und die Innovation für den jeweiligen Stakeholder sich als sinnvoll und wirtschaftlich bestätigt hat, kann abschließend der persönliche Use Case definiert werden. Dieser umfasst den persönlichen initialen zukünftigen Entwicklungsaufwand mit den dazugehörigen Schnittstellen zu anderen Systemen. Das ist kein finaler Stand, da mit Fortlauf der Entwicklung noch weiterer Aufwand hinzukommen kann. All diese Modelle werden auch wieder der Wissensbasis hinzugefügt und mit Tags versehen bzw. semantisch vernetzt, sodass weitere Kollaborationspartner hierauf ggf. Zugriff haben. Wie bereits erwähnt, findet parallel zu Geschäftsmodellentwicklung die Entwicklung der Systemarchitektur statt, diese wiederum intern im WSN. Die zuvor definierte Modelldefinition und die dazugehörige Funktionsdefinition müssen konkretisiert und in eine Systemarchitektur überführt werden. Zunächst wird von allen Stakeholdern das logische Wissen in Modellen abgebildet und abgelegt, hierfür wird auch die SysML genutzt. Auf Basis dieses Wissens kann die initiale Systemarchitektur entwickelt werden. Dies erfolgt für jede einzelne Komponente bzw. Subsystem. Die Stakeholder innerhalb der Wissensbasisgruppen sind für den Fortschritt verantwortlich und können jederzeit weitere Stakeholder einladen, sich zu beteiligen oder nach fehlendem Innovationswissen suchen. Dabei kann nach Tags gesucht werden oder die Vernetzung der eigenen Tags untersucht werden. Die definierte Systemarchitektur wird bzgl. der Anforderungen definiert und an die nächste Phase übergeben. Innerhalb der letzten Phase findet die Konzeptentwicklung statt. Sie bereitet die Übergabe zur Produktentwicklungsphase vor und einen nahtlosen Übergang. Innerhalb dieser Phasen werden, ergänzend zu den beteiligten Innovationsingenieure, auch die jeweiligen Produktentwicklungsingenieure der Stakeholder mit einbezogen. Zunächst werden initiale Produkthanforderungen definiert, die in der Produktentwicklungsphase konkretisiert werden. Das bis dato gesammelte und erschaffene Wissen bzgl. der physischen Umsetzung der Komponenten wird in einem extra Wissensmodell definiert. Dies ist in diesem Fall ein SysML-Modell, ein Ausschnitt des Modells ist in Abbildung 5 zu sehen, das den Aufbau beschreibt und die dazugehörige Systemarchitektur. Alle erarbeiteten Subsysteme mit den dazugehörigen Innovationsmodellen bzw. -wissen müssen zusammengeführt werden. Die Subsysteme

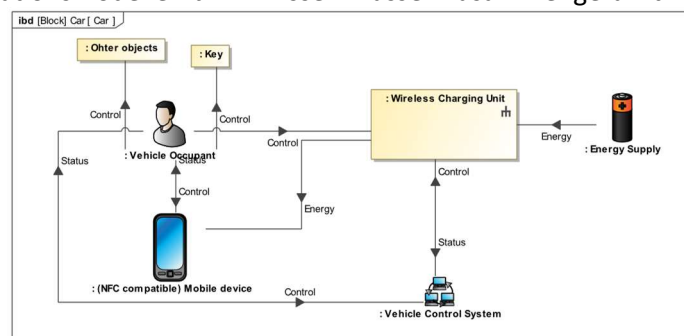


Abbildung 5 Ausschnitt der Systemarchitektur der Innovation

standen bereits zuvor in Relation zueinander, durch die Wissensbasis und der semantischen Vernetzung und werden in einem gemeinsamen SysML-Modell vereint. Dies ergibt dann das Innovationsmodell, das an die Produktentwicklungsphase übergeben wird. Mit der Definition des Innovationsmodells schließt auch die Innovationsphase bzw. die KIRV-Methode ab.

5 Ausblick

Bei der interdisziplinären Entwicklung von Smarten Produkten spielt der Aspekt der gemeinsamen Kollaboration und der Wissensaustausch eine sehr große Rolle. Hiermit ist es möglich, die Innovationentwicklungsdauer zu beschleunigen und vor allem die Transformation in die Produktentwicklungsphase zu verbessern. Steigende Komplexität bei den Produkten und der dazugehörigen Entwicklung erfordert die Integration neuer Rollen und Stakeholder und gleichzeitig die gemeinsame Entwicklung in WSN. Die im Beitrag vorgestellte KIRV-Methode ermöglicht es den Nutzern, die Innovation strukturiert mithilfe des dazugehörigen sechsstufigen Innovationsprozesses zu entwickeln. Weiterhin wird die explizite Bildung von WSN und die Integration aller Stakeholder mit diesem Ansatz ermöglicht und ganzheitlich gefördert. Die Kollaboration in der KIRV-Methode wird durch die dazugehörige Wissensbasis unterstützt und ermöglicht es, unterschiedlichste Stakeholder miteinander zu vereinen, aufgrund von gleichen Wissensinteressen. Zukünftige Aspekte, die betrachtet werden müssen, sind weitere Validierungen an industriellen Anwendungsfällen. Des Weiteren sollte technisch an der Wissensbasis eine automatische Taggenerierung ermöglicht werden, um den Einsatz für die Nutzer zu vereinfachen. Eine ergänzende Ontologie zur Beschreibung Smarter Produkte könnte die Wissensbasis bei der Vernetzung der Wissensmodelle unterstützen und wird Bestandteil zukünftiger Veröffentlichungen sein.

Literaturverzeichnis

- | | |
|---|--|
| Abramovici et al. 2016 | Abramovici, Michael; Göbel, Jens Christian; Dang, Hoang Bao Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems. In: CIRP Annals 65 (2016), Nr. 1, S. 185–188 |
| Amati et al. 2020 | Amati, Guido; Motta, Virna; Vecchiato, Riccardo Roadmapping for innovation management: evidence from Pirelli. In: R&D Management 50 (2020) |
| Barczak et al. 2021 | Barczak, Gloria; Hopp, Christian; Kaminski, Jermain; Piller, Frank; Pruschak, Gernot How open is innovation research? – An empirical analysis of data sharing among innovation scholars. In: Industry and Innovation (2021) |
| Becker und Dietz 2004 | BECKER, Wolfgang; Dietz, Jürgen R&D cooperation and innovation activities of firms—evidence for the German manufacturing industry. In: Research Policy 33 (2004), Nr. 2, S. 209–223 |
| Büchel und Raub 2002 | Büchel, Bettina; Raub, Steffen Building Knowledge-creating Value Networks. In: European Management Journal 20 (2002), Nr. 6, S. 587–596 |
| Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | Kollaboration als Schlüssel zum erfolgreichen Transfer von Innovationen: Handlungsempfehlungen für Forschung und Entwicklung. München, Berlin, Brüssel: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2017 (acatech Position) |
| Eigner et al. 2014 | Eigner, Martin; Dickopf, Thomas; Apostolov, Hristo; Schaerfer, Patrick; Faißt, Karl-Gerhard und Keßler, Alexander: System Lifecycle Management: Initial Approach for a Sustainable Product Development Process Based on Methods of Model Based Systems Engineering, 2014 |
| Farhadi 2019 | Farhadi, Noah: Cross-Industry Ecosystems: Grundlagen, Archetypen, Modelle und strategische Ansätze. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler, 2019 |

- Galaso und Kovářik 2018 Galaso, Pablo; Kovářik, Jaromír Collaboration Networks and Innovation: How to Define Network Boundaries, 2018
- GENIAL! 2018 GENIAL!: Gemeinsame Elektronik-Roadmap für Innovationen der automobilen Wertschöpfungskette (GENIAL!). URL: <https://www.edacentrum.de/genial/> – Überprüfungsdatum 24.10.2022
- Geurts et al. 2022 Geurts, Amber; Geerdink, Tara; Sprenkeling, Marit Accelerated innovation in crises: The role of collaboration in the development of alternative ventilators during the COVID-19 pandemic. In: Technology in society 68 (2022),
- Kage et al. 2016 Kage, Martin; Drewel, Marvin; Gausemeier, Jürgen; Schneider, Marcel Value Network Design for Innovations: Developing Alternative Value Network Drafts. In: Technology Innovation Management Review 6 (2016)
- Kohl et al. 2015 Kohl, Holger; Orth, Ronald; Riebartsch, Oliver; Galeitzke, Mila; Cap, Jan-Patrick Support of Innovation Networks in Manufacturing Industries Through Identification of Sustainable Collaboration Potential and Best-Practice Transfer. In: Procedia CIRP 26 (2015), S. 185–189
- Man und Duysters 2005 Man, Ard-Pieter de; Duysters, Geert Collaboration and innovation: a review of the effects of mergers, acquisitions and alliances on innovation. In: Technovation 25 (2005), Nr. 12, S. 1377–1387
- Mazloomi Khamseh und Jolly 2008 Mazloomi Khamseh, Hamid; Jolly, Dominique R.: Knowledge transfer in alliances: determinant factors. In: Journal of Knowledge Management 12 (2008)
- Mollahassani et al. 2022a Mollahassani, Damun; Eickhoff, Thomas; Eiden, Andreas; Göbel, Jens Christian: Wissensbasis zur Förderung von Innovationen Smarter PSS innerhalb eines Wertschöpfungsnetzwerkes Tag des Systems Engineering. 2022
- Mollahassani et al. 2021 Mollahassani, Damun; Forte, Sven; Göbel, Jens C. Integration von Mission Profiles in die modellbasierte Systementwicklung zur Förderung der Kollaboration in automobilen Wertschöpfungsnetzen.: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021: Stuttgart, 20. Mai 2021
- Mollahassani et al. 2022b Mollahassani, Damun; Gries, Jonas; Forte, Sven; Göbel, Jens C. Supporting Collaborative Innovation Processes in Smart Product Value Creation Networks. In: Procedia CIRP 109 (2022), S. 349–355
- Müller-Prothmann und Dörr 2020 Müller-Prothmann, Tobias ; Dörr, Nora Innovationsmanagement: Strategien, Methoden und Werkzeuge für systematische Innovationsprozesse. 4. Auflage. München: Hanser, 2020 (Hanser eLibrary)
- Porter und Heppelmann 2014 Porter, Michael E.; Heppelmann, James E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. URL: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>. – Überprüfungsdatum 06.01.2023
- Ricciotti 2020 Ricciotto, Francesco From value chain to value network: a systematic literature review. In: Management Review Quarterly 70 (2020), Nr. 2,
- TRANSFORM 2021 TRANSFORM Trusted European SiC Value Chain for a greener Economy. URL: <https://sic-transform.eu/en> – Überprüfungsdatum 24.10.2022
- Wireless Power Consortium WIRELESS POWER CONSORTIUM. URL: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/> – Überprüfungsdatum 04.01.2023
- Zerfaß und Möslein 2009 Zerfaß, Ansgar; Möslein, Kathrin M. Kommunikation als Erfolgsfaktor im Innovationsmanagement. Wiesbaden: Gabler, 2009

Semantische Modellierung des Produkts und Produktumfelds mithilfe von Text Mining zur Initiierung des Innovationsprozesses

Semantic modelling of product and product environment using text mining to trigger the innovation process

Hendrik Lauf¹, Michael Riesener¹, Maximilian Kuhn¹, Christoph Luckhaus¹, Günther Schuh^{1,2}

¹RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Produktionssystematik, 52074 Aachen
h.lauf@wzl.rwth-aachen.de

²Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, 52074 Aachen

Abstract: Für den Erhalt der eigenen Wettbewerbsfähigkeit müssen Unternehmen bestehende Produkte unter Berücksichtigung eines multidimensionalen Umfelds innovieren. Ein Potenzial zur Analyse dieses Produktumfelds bieten Textdaten, die bereits heute in großen Mengen öffentlich verfügbar sind. Dieses Potenzial wird bisher nicht vollumfänglich für den Innovationsprozess ausgeschöpft, da eine holistische Methode zur produktbezogenen Auswertung und Rückführung der Ergebnisse fehlt. Die vorliegende Methode schließt diese Lücke, indem Textdaten aus dem Produktumfeld mit Text Mining analysiert und die Ergebnisse in einem semantischen Netz verknüpft werden. Dazu wird zunächst das bestehende Produkt semantisch modelliert. Anschließend werden die relevanten Einflussdimensionen des Umfelds abgeleitet. Textdaten aus den zugehörigen Datenquellen werden vorverarbeitet und mit Hilfe von Text Mining analysiert, um die relevanten Informationen zu extrahieren. Schließlich werden die Informationen zu einem semantischen Netz verknüpft, die das für die Produktinnovation relevante Produktumfeld modelliert.

Keywords:

Produktinnovation, Produktumfeld, Einflussdimensionen, Semantische Netze, Text Mining

Abstract: To maintain their own competitiveness, companies must innovate existing products while taking into account a multidimensional environment. Text data, which is already publicly available in large quantities, offers a potential for analyzing this product environment. So far, this potential has not been fully exploited for the innovation process because a holistic method for product-related evaluation and feedback of the results is missing. The present method closes this gap by analyzing text data from the product environment with text mining and linking the results in a semantic network. For this purpose, the existing product is first semantically modelled. Then the relevant dimensions of influence of the environment to be analyzed are derived. Text data from these data sources is preprocessed and analyzed using text mining to extract the relevant information. Finally, the information is linked to form a semantic network that models the product environment relevant to product innovation.

Keywords:

product innovation, product environment, influence dimensions, semantic network, text mining

1 Motivation and current challenges

Innovation is the foundation of the competitiveness of manufacturing companies (Carbon et al. 2021, p. 25). Due to the globalization and the resulting increase in competition, sellers' markets are turning into buyers' markets (Schuh 2017, p. 200). In order to avoid competition on price in these markets, innovation in non-price-related factors (e.g. product design) can be used (Weber et al. 2018, p. 394). In a study, 78% of participating companies state that innovation is more important now than in the past, and 73% of them are under greater pressure to innovate (Romberg 2016, p. 7).

This competitive situation requires companies to implement innovation activities faster and in a more targeted manner. According to a study by Deloitte, 43% of participating companies see the identification of the trends and technologies as a success factor for innovation (Andersen et al. 2019). In this context, various influence dimensions of the corporate environment, such as market and society, must be considered in isolation as well as in interaction (VDI 2221 Part 1 2019, p. 22). A study on market intelligence shows that a success factor in the required information gathering is the use of different sources of information that complement each other (Schuh et al. 2022, p. 16).

Yet, companies face uncertainty due to the observation of their multidimensional environment, particularly its volatility. Reducing this uncertainty requires comprehensive collection, analysis, and processing of external data and information to identify innovation potential in the environment. However, the holistic manual processing and analysis of the external influence dimensions requires a significant amount of human resources due to the large amount of data (Kölbl et al. 2019, p. 901). Despite this, only 10% of the participating companies in a study have so far resorted to computer-assisted methods from the field of data mining or big data to monitor their own market potential or competitor products (Theobald 2019, p. 4). Although prior research has shown the potential of using text mining for the evaluation of environmental data to identify innovation potential (Riesener et al. 2022a), these approaches have not yet been widely applied.

Another challenge in the identification of innovation potentials is not only the procurement and evaluation of information, but also the linking of the collected knowledge. It has been shown that 80% of all innovations are a combination of existing knowledge (Enkel and Horváth 2010). By transferring known patterns into new fields of application, successful innovations can be identified (Hope et al. 2017, p. 235). However, this requires creativity and the ability to think in networked systems (VDI 2221 Part 1 2019, p. 22). One way to support this ability is by creating a semantic network to model both the product and its environment. Accordingly, a semantic network of the product and its environment could be used to derive contextual innovation potentials for the further development of the product under consideration.

The presented challenges call for a method that supports companies in the targeted identification of product innovation potentials in their multidimensional environment to secure their competitiveness. Methods from text mining and semantic networks were identified as promising fields for potential solutions that are investigated for the analysis and visualization of the results.

2 State of the art

In the following, the theoretical foundations of this work will be considered. First, the basics of technical product innovation are explained. Subsequently, the basics of the two method areas text mining and semantic networks, which are in the focus of this investigation, are summarized.

2.1 Innovation of technical products

The concept of innovation in its current meaning was initially coined by Schumpeter, who defined innovation as "doing things differently in the realm of economic life" (Schumpeter 1939, p. 80). While an innovation is always based on an invention (Pleschak and Sabisch 1996, p. 6), it differs from a pure invention by its economic effect, which may not necessarily be attributed to a scientific novelty

(Schumpeter 1939, pp. 80-82). Rather, an innovation must also be sold or used (Hauschildt et al. 2016, p. 5).

Regarding the object of an innovation project, a distinction can be made between product, process, service, business model or system property innovation (Hauschildt et al. 2016, p. 6). Nevertheless, a clear assignment to one of these types is not always possible or meaningful (Tidd et al. 2021, p. 25). Furthermore, their intensity or novelty differentiates innovations (Hauschildt et al. 2016, p. 12) into basic innovations, improvement innovations, adaptation innovations, imitations and pseudo-innovations (Pleschak and Sabisch 1996, p. 4).

The innovation process can be understood as a control loop in which the output generated by the company, the innovation, is evaluated based on its performance in the environment (Schuh et al. 2012, p. 254) in order to derive insights into possible process adjustments (Brown and Svenson 1988, p. 12). The innovation process is therefore also embedded in an overall corporate context of political, social, or cultural environmental factors (Utterback 1971, p. 78). In the linked-chain model, the existence of a potential market is the central driver and trigger of the innovation process (Kline 1985, p. 36). In the context of this work, such innovation potential must be derived from the totality of environmental factors.

2.2 Text mining

Data mining originated in the field of Knowledge Discovery in Databases (KDD), as a "non-trivial process of identifying valid, novel, potentially useful, and ultimately understandable patterns in data" (Fayyad et al. 1996, p. 83). Data mining is a component of KDD for "applying data analysis and discovery algorithms that, under acceptable computational efficiency limitations, produce a particular enumeration of patterns over the data" (Fayyad et al. 1996, p. 83).

The main difference between data and text mining is the underlying database. While KDD usually accesses structured data, the information in text data is available in unstructured form, so that the data must first be given an application-specific structure (Feldman and Dagan 1995, p. 112). Therefore, data preprocessing in the context of text mining has the central task of transforming "raw input data into an appropriate format for subsequent analysis" and cleaning the data (Tan et al. 2019, p. 25). In this data preparation, however, the trade-off between a simple structure and the associated loss of information must be found (Feldman and Dagan 1995, p. 112). The key criterion here is to describe the documents contained in the corpus by the same attributes (Žižka et al. 2019, pp. 79-80) and to effectively reduce the dimensionality of the analysis space (Bramer 2007, p. 242). For this purpose, the documents to be analyzed can be transformed into a bag-of-words model as a representation in the vector space (Žižka et al. 2019, p. 79).

2.3 Semantic networks

In order to map the relationships found by the data analysis methods, a model of the product environment must be created. A model is an object that allows statements to be made about a modeled object (DIN SPEC 40912 2014, p. 8).

Graphs are a type of model consisting of nodes and edges (Nitzsche 2009, p. 2), where each edge connects two nodes (Büsing 2010, p. 2). A graph G with n nodes can be represented by an $n \times n$ matrix, the adjacency matrix $A(G)$, where each entry $a_{i,j}$ equals 1 if there is an edge from node i to node j (Turau 2009, p. 20). For valued or weighted graphs, the matrix entries can also be used to represent the edge weights (Turau 2009, p. 30).

A special kind of graphs are semantic networks, whose purpose is to store information or knowledge (Lehmann 1996). Semantic networks also consist of nodes and edges, with nodes representing concrete or conceptual objects and edges representing the relationship between these objects (Lehmann 1996). Only in this way of connecting nodes and thus concepts can information and knowledge be stored in the semantic network in an explicit and implicit language-like manner. Semantic networks are free of redundancies, so that each object appears only once in the network

(Schubert 1976). Objects that appear multiple times under different names must be consolidated into one node according to the object identity (Reichenberger 2010, p. 7).

3 Method

During their previous research, Riesener et al. were able to prove on the one hand the need for and the potential of the combination of methods from the fields of text mining and semantic modelling (Riesener et al. 2022b). On the other hand, they already demonstrated singular methods for the semantic modeling of existing products (Riesener et al. 2022c) and the identification of innovation potentials by the application of text mining methods (Riesener et al. 2022a). However, a method that combines these singular approaches and demonstrates how an innovation-centered modelling of the product environment by aid of text mining can be done is still missing. Based on the presented challenges and deficit in theory the following research question was formulated:

How can relevant innovation potentials in the product environment be identified with the help of a product-specific semantic network and the application of text mining?

This deficit is addressed by the following method for modelling the product environment, which enables users to derive direct and indirect influences on specific product aspects. In the first step, an existing product is modeled by describing its innovation-relevant elements in a semantic network. In the second step, the text data necessary for the environment analysis is collected. In the third step, the influence factors contained in the product environment are described. In the fourth step, influences on the product are identified by linking the original product network and external influence factors.

3.1 Semantic product modeling

The basis for this step is the understanding of a technical product as a system. As such, a product interacts with the product environment via one or more functions that are implemented by its subsystems and components (Ropohl 2009, pp. 7577). The subsystems and components of a product are product elements that can be both tangible and intangible. However, while subsystems can be decomposed into further elements, components are defined as the smallest function-bearing product elements (Krause et al. 2021, pp. 33637). Since functions can also be decomposed, the depth of consideration depends on the modeling task.

Hypothetically, all aspects of a product can be the object of an innovation project. In order to focus innovation activities by neglecting insignificant product aspects, the initial modeling focuses on functionally relevant product aspects whose changes are responsible for product innovations. In addition to functions and corresponding subsystems and components, these include features such as performance, cost, and design parameters (Pleschak and Sabisch 1996, p. 4) as well as the principles of function fulfillment and the linkage of product elements (Henderson and Clark 1990, pp. 1112).

The specification of these aspects for an existing technical product is carried out on hierarchical levels according to the principle of decomposition. At each hierarchical level, the subsystems and components as well as their functions and functionally relevant features are included in the system model as product elements and linked together. Users check whether each specified product element is relevant to innovation according to two criteria: it must be perceptible to external stakeholders and modifiable. Product elements that do not meet these criteria are removed. If every product element of the current hierarchical level meets both criteria, the specification of the next hierarchical level is initiated by decomposing the subsystems. This process is repeated until no product element of any further hierarchical levels meets the criteria.

The naming of the product elements is of particular importance for the application of the method. Therefore, a different rule applies to each type of product element (see Figure 1). For the modeled product, its subsystems, and its components, a distinction is made between proper names as model-specific terms and generic names as product category terms. Ideally, each product element is

represented by both a proper name and a generic name, so that both model-specific and model-unspecific associations with the product element are included in the system model. When choosing names, two criteria must be met to ensure that the product element is perceptible to external stakeholders. A proper name must be chosen that is also used in the corporate environment to represent the element. Furthermore, the generic name should be chosen in such a way that the functional principle of the product element is also associated with the generic name. For example, the generic name for a racing bike should be the bicycle and not the vehicle. All the names chosen for a product element according to these two criteria are linked together in the system model. However, only one of them serves as an interface to linked product elements in order to preserve the principle of object identity (Reichenberger 2010, p. 7). Functions of a product should be designated by a solution-neutral "verb+noun" combination to distinguish them from the associated features such as the function principles. The method of figurative abstraction can be used for this purpose (VDI 2803 2019, p. 24). The functionally relevant features of the product should be designated by a single noun.

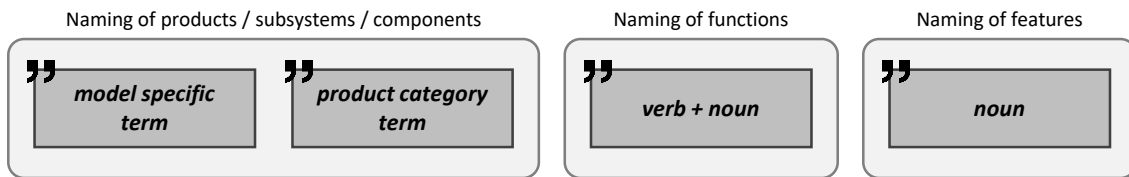


Figure 1: Naming of product elements

Finally, the created system model is transformed into an initial semantic network whose nodes and edges are weighted (see Figure 2). The nodes represent the product elements and the edges their links to each other. The associated weights express probabilities and can therefore take values between zero and one. While the weight of a node indicates the probability that the associated product element is relevant to innovation, the weight of an edge indicates the direction-independent probability that an interaction exists between the two associated product elements. Because the object of modeling is an existing product to be innovated, all product elements and their links are assigned a weight with the maximum value of one. The resulting semantic network is stored in a symmetric adjacency matrix and a list of node weights to be available for computer-aided orientation of the further innovation process.

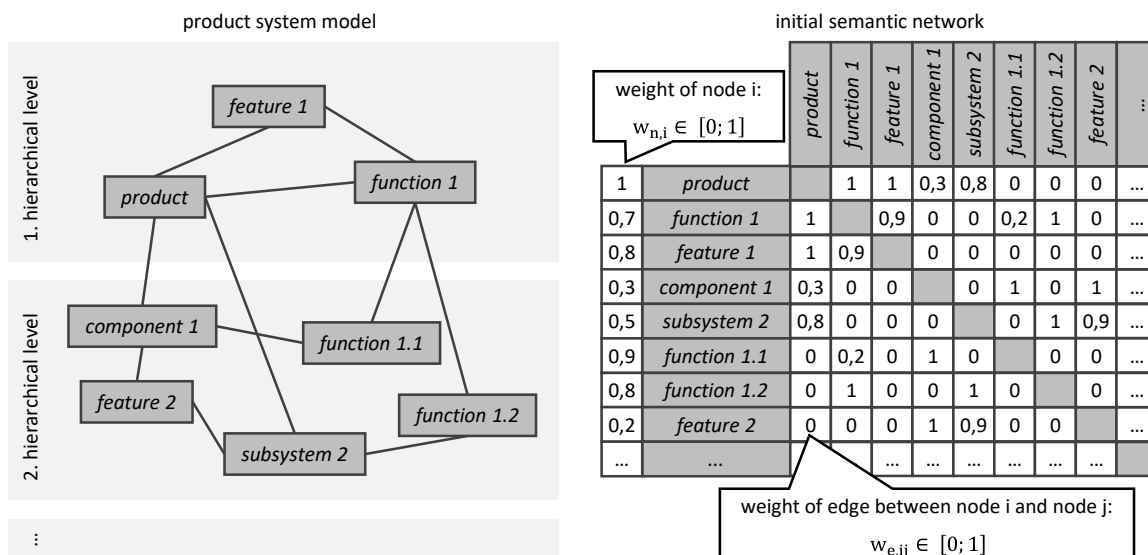


Figure 2: Comparison of an exemplary product system model and its semantic network

3.2 Collection of external text data

The next step after modeling the product is to collect text data that describes the product environment and its interrelationship with the product. Stakeholders outside the company mainly shape the product environment. It is therefore necessary to first identify the stakeholders that influence the product innovation process. For this purpose, the environment is divided into five influence dimensions: politics, society, customers, competitors, and suppliers (Albright 2004). The stakeholders in each dimension are identified by determining which actors directly or indirectly influence the product. Subsequently, specific sources of text data are identified from which relevant information can be collected. Similar to the previous step, these sources are derived from seven general types: scientific publications, patents, news sites, organization websites, social media, encyclopedias, and reviews, concluding research of Mühlroth (2018, pp. 65253) and Ayele (2021, p. 749). The specific text data sources are identified according to three criteria. First, they must be used by the identified stakeholders to limit the amount of data collected. Second, they must be monolingual to allow consistent application of evaluation methods. Third, they must be regularly updated to encourage the generation of an innovative product through new stimuli. Figure 3 illustrates the process of identifying stakeholders and text data sources in the product environment.

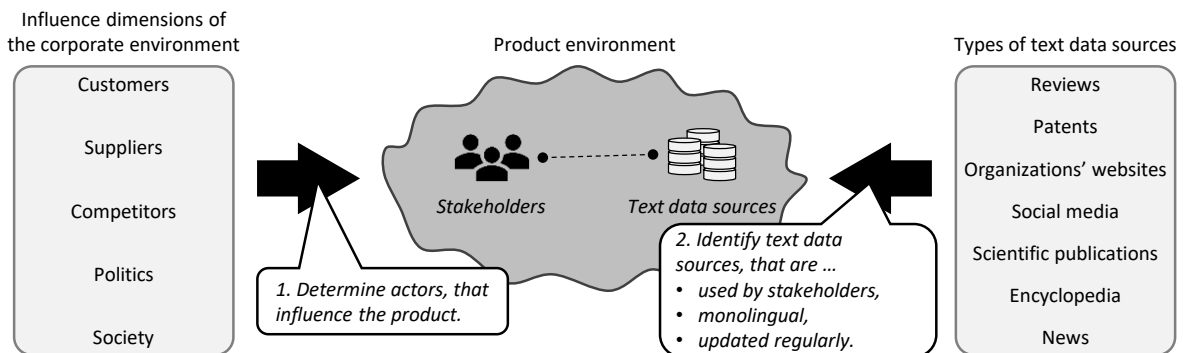


Figure 3: Identification of stakeholders and text data sources in the product environment

Finally, the desired text data is collected from the identified sources using a product-specific search query. To prepare the formulation of the search query, synonymous terms are determined for each element of the initial semantic network using an electronic thesaurus. This expands the vocabulary of the semantic network and makes the search independent of the language usage of the users. The search query is then created (see Figure 4). For this purpose, all terms in the extended vocabulary are linked via a logical OR operator and the allowed publication date is limited to the period after the market launch of the modeled product. This collects the maximum amount of text data that can address the product after its creation and thus provide new stimuli for innovation.

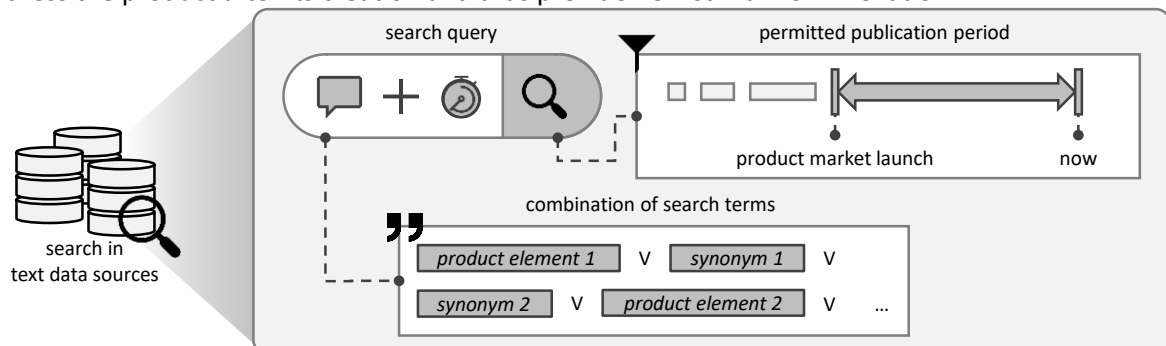


Figure 4: Composition of the search query to collect text data in identified data sources

3.3 Identification of product-specific influence factors

In this step, the goal is to determine the influence factors contained in the product environment by modeling the topics of the collected text data. Since the text data is in unstructured form and contains irrelevant data, it must be prepared for topic modeling. This is done in three phases.

In the first phase, the contained words are extracted and normalized to transform the unstructured text data into bags-of-words models with reduced word variance. This includes removing boilerplate information, tokenizing the text, correcting spelling errors, performing PoS tagging, lemmatizing the words, and removing stop words.

In the second phase, the synonyms found in the text data set are consolidated to reduce its size (see Figure 5). To do this, the text data is first transformed into an $M \times V$ document-term matrix (DTM), where M documents are plotted in the rows and V words are plotted in the columns. Each entry in the DTM is weighted according to the term frequency tf_{mv} (Roelleke and Wang 2008, p. 436), which is the number of occurrences of a word v divided by the total number of words in the respective document m . Next, synonyms in the DTM are identified, ideally using the same thesaurus that was used to expand the initial vocabulary when collecting text data. For each set of synonyms, a favorite term is selected based on a criterion. Here, two cases are distinguished. In the first case, a set of synonyms contains a name for a product element that was used by the users during semantic product modeling. This name is then selected as a favorite in order to promote the interpretability of the results for the users. In the second case, the set of synonyms consists exclusively of names that have been used by external stakeholders. Here, the most frequently used term is selected as the favorite to reflect the language usage in the product environment. In the DTM, this is done by selecting the column vector with the largest Euclidean norm. Finally, each set of synonyms is consolidated by summing the column vectors of the contained terms, storing the result in the column vector of the favorite, and deleting remaining column vectors from the DTM.

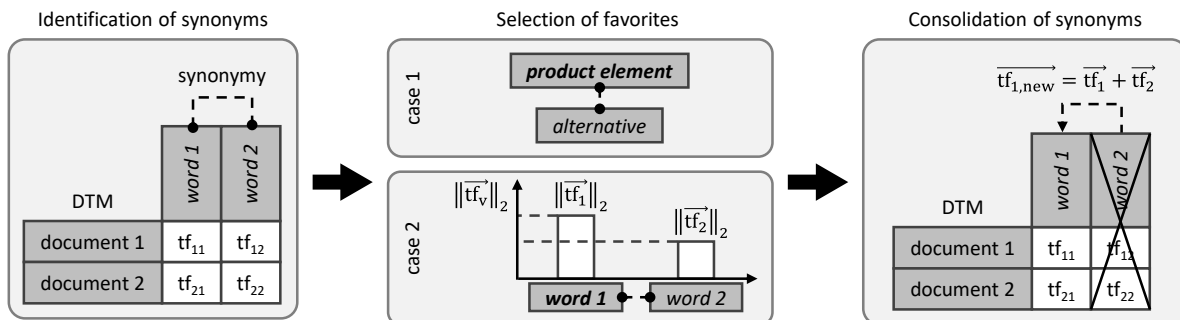


Figure 5: Consolidation of synonyms in collected text data

In the third phase, the entries of the consolidated document-term matrix are weighted using the term frequency-inverse document frequency (Roelleke and Wang 2008, p. 436). This weighting method gives disproportionate weight to concise niche terms and thus promotes the identification of distinct areas of innovation potential (Riesener et al. 2022a, p. 284). After preparing the text data, the topics it contains are modeled through an iterative process (see Figure 6). The main step of the modeling is the application of Latent Dirichlet Allocation (Blei et al. 2003). This stochastic method assumes that topics are word clusters and computes the most likely probabilistic distributions topic-words $\varphi \in \mathbb{R}_{>0}^{K \times V}$ and document-topics $\theta \in \mathbb{R}_{>0}^{M \times K}$ that form the given DTM. To perform the Latent Dirichlet Allocation, in addition to the DTM, the parameter vectors $\alpha \in \mathbb{R}_{>0}^K$ and $\beta \in \mathbb{R}_{>0}^V$ as well as the number of topics K must be specified. These are set according to a fixed scheme based on recommendations from the literature. Thus, the entries of the parameter vectors should each correspond to the inverse number of topics (Řehůřek 2011, p. 75). This constraint effectively reduces the necessary parameters to K , so that users only need to set one parameter. This can be helped by the recommendations of Wei and Croft (2006), who suggest a general range of values from 50 to 300 topics, with larger amounts of text data tending to include more topics. For the initial run, the mean of the recommended values is adopted. The topic coherence is used as an indicator of the quality of

the results. This is calculated after performing the Latent Dirichlet Allocation using the measure c_v according to Roeder et al. (2015). The whole process is repeated until an asymptotic approximation of the coherence measure c_v to a saturation value can be detected.

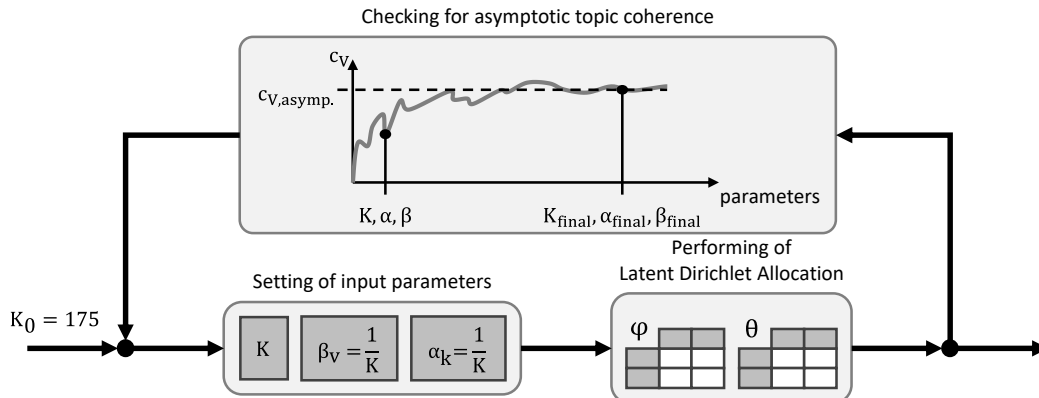


Figure 6: Modeling of influence factors as topics in text data

3.4 Identification of innovation-relevant influences

In this step, the influences on the product are determined by linking the initial semantic network with the influence factors present in the product environment. However, since the influence factors are available in the form of word clusters after the evaluation of the text data and the principle of object identity must be upheld in semantic networks (Reichenberger 2010, p. 7), they are first reduced to a single representative term (see Figure 7).

The search for suitable terms is subject to two assumptions. First, it is assumed that nouns have the greatest potential for meaningful naming. Second, it is assumed that a large amount of text data has been collected, and consequently, manual evaluation of word clusters is not practical. Therefore, the goal is to find the noun with the highest membership probability in each word cluster. To do this, all nouns and their associated column vectors in the topic-word matrix φ are first identified using the PoS tagging results. These are stored in the topic-noun matrix (TNM). Then, the desired terms are selected by finding the maximum entry for each row of the matrix and reading the corresponding noun.

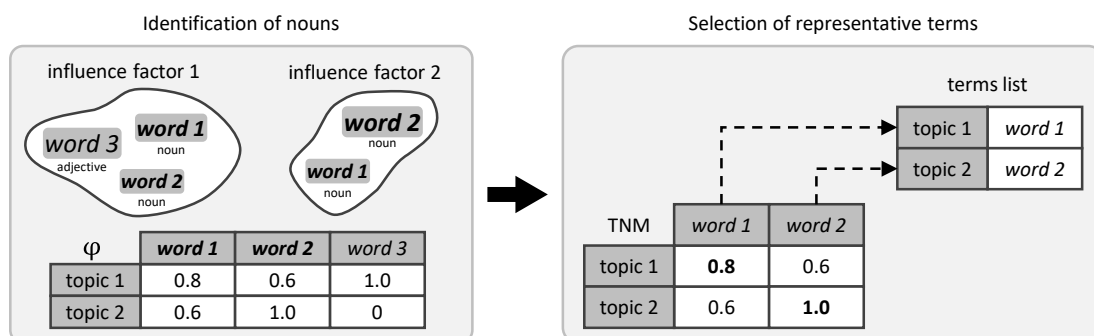


Figure 7: Reduction of influence factors to representative terms

In the last step of the method, the initial semantic network is extended by the influence factors of the product environment (see Figure 8). To do this, these influence factors are first included as nodes by adopting the selected names and calculating their weights. The weight of an influence factor results from the Euclidean norm of the corresponding column vector of the document-topic matrix θ . This value is normalized to the maximum of the distribution in order to compare the weights of the influence factors across different applications.

After the influence factors have been included, they must be linked to the initial nodes of the semantic network by calculating the missing edge weights. Here, a distinction is made between two cases. The weight of an edge between an influence factor and a product element is determined by reading their

membership probability from the corresponding entry of the topic-word matrix φ . The weight of an edge between two influence factors is determined by calculating their probability-based co-occurrence. Here, it is assumed that the occurrence of two influence factors in a document is stochastically independent of each other. Therefore, the co-occurrence of two influence factors in a document can be calculated by multiplying the respective entries in the document-topic matrix θ . If the co-occurrence of a pair of influence factors is computed for all documents and the results are summed, this yields the co-occurrence in the document collection. Finally, this is normalized to the maximum value of the distribution to obtain the edge weights.

Thus, the data structure is completely populated and the influences of the product environment on the product can be identified by visualizing the final semantic network. Here, the direct influences can be identified as a triple of an influence factor, a product element, and the linking edge. The indirect influences result from the linkage of these triples with further product elements and/or influence factors. The significance of these influences is conveyed by the sizes of the nodes and edges, which are directly proportional to their weights. To support the identification, the visualization of the semantic network can be adjusted to focus on certain influences. For this purpose, two value ranges are defined, that determine which influence factors of the product environment and associated links are displayed.

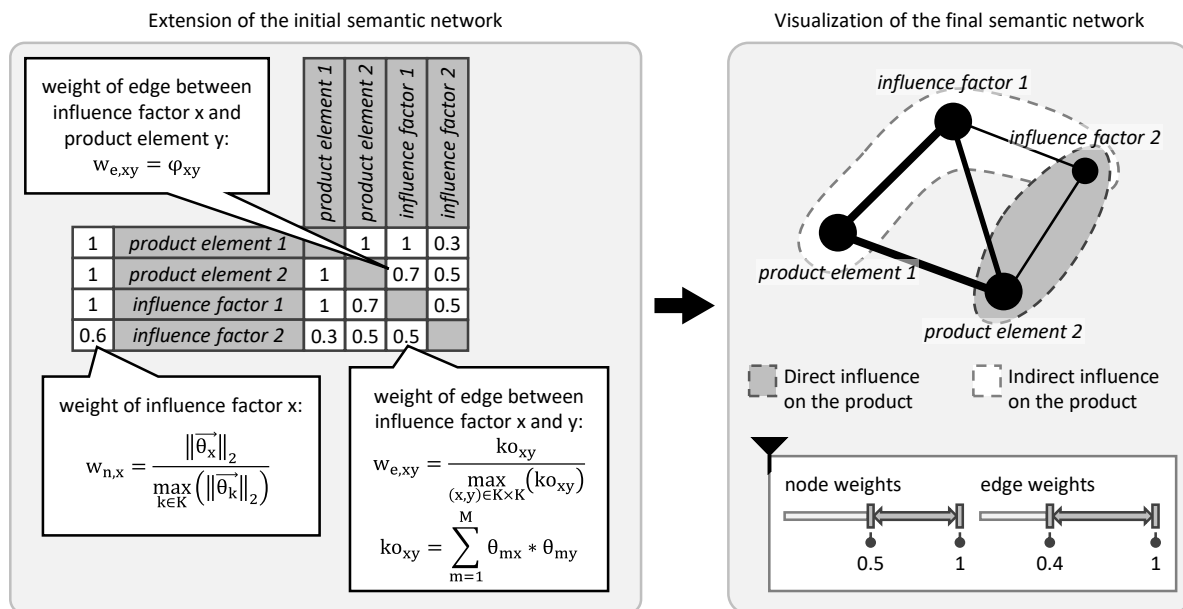


Figure 8: Identification of influences from the product environment on a product

4 Discussion and conclusion

The presented method supports manufacturing companies in overcoming the current challenges of product innovation through an integrated approach using text mining and semantic networks. In four superordinate steps, this approach enables to identify innovation-relevant influences of the product environment of an existing product. First, the existing product is modeled in a semantic network. Second, text data describing the product environment is collected based on the initial semantic network. Third, this text data is evaluated using text mining with respect to the influence factors it contains. Finally, the initial semantic network is extended by the identified influence factors and their links.

Deficits of existing approaches are addressed in each of the four steps. The semantic product modeling focuses on a minimum of innovation-relevant product aspects and considers commonalities with its product category. This enables an efficient alignment of the entire process. In addition, the product-specific collection of text data promotes linkage to previous innovation processes. The evaluation of the text data is also designed to consider the language use of different stakeholders. In the final step, an examination of direct and indirect influences on the product is made possible.

The evaluation of the method is not validated, but purely theoretical. Therefore, future research should aim to conduct practical experiments in collaboration with manufacturing companies to validate the method. To this end, a measure of effectiveness should first be developed. The presented method can then be extended, for example by integrating product-service systems and cyber-technical systems.

Acknowledgment

Funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany's Excellence Strategy – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.

References

- Albright 2004 ALBRIGHT, Kendra: *Environmental Scanning: Radar for Success*. In: *The Information Management Journal* 38 (2004), no. 3, p. 38-44.
- Andersen et al. 2019 ANDERSEN, Nicolai; BOERSCH, Alexander; BLOHMKE, Julian: *Innovation in Europe: A Deloitte survey on European companies and how digital technologies can strategically enhance innovation*. 2019 (Deloitte Insights).
- Ayele and Juell-Skielse 2021 AYELE, Workneh; JUELL-SKIELSE, Gustaf: *A Systematic Literature Review about Idea Mining: The Use of Machine-Driven Analytics to Generate Ideas*. In: ARAI, Kohei (ed.): *Proceedings of the Future of Information and Communication Conference*. 2nd ed. Cham: Springer, 2021, p. 744-762.
- Blei et al. 2003 BLEI, David; NG, Andrew; JORDAN, Michael: *Latent Dirichlet Allocation*. In: *Journal of Machine Learning Research* 3 (2003), p. 993-1022.
- Bramer 2007 BRAMER, Max: *Principles of Data mining*. Vol. 1. London: Springer, 2007.
- Brown and Svenson 1988 BROWN, Mark; SVENSON, Raynold: *Measuring R&D Productivity*. In: *Research Technology Management* 31 (1988), no. 4, pp. 11-15.
- Büsing 2010 BÜSING, Christina: *Graphen- und Netzwerkoptimierung*. 1st ed. Heidelberg: Springer, 2010.
- Carbon et al. 2021 CARBON, Claus-Christian; FAIX, Werner; KISGEN, Stefanie; MERGENTHALER, Jens; MURALTER, Fabian; SCHWINN, Alisa; WINDISCH, Liane: *Steinbeis-Innovationsstudie*. 2nd ed. Stuttgart: Steinbeis-Edition, 2021.
- DIN SPEC 40912 2014 DIN SPEC 40912 November 2014. Kernmodelle - Beschreibung und Beispiele.
- Enkel and Horváth 2010 ENKEL, Ellen; HORVÁTH, Anette: *Mit Cross-Industry-Innovation zu radikalen Neuerungen*. In: Ili, Serhan; ALBERS, Albert (eds.): *Open Innovation umsetzen: Prozesse, Methoden, Systeme, Kultur*. 1st ed. Düsseldorf: Symposium Publishing, 2010, p. 293-314.
- Fayyad et al. 1996 FAYYAD, Usama; PIATETSKY-SHAPIO, Gregory; SMYTH, Padhraic: *Knowledge Discovery and Data mining: Towards a Unifying Framework*. In: SIMOUDIS, Evangelos; HAN, Jiawei; FAYYAD, Usama (eds.): *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data mining*. Portland: Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 1996, p. 82-88.
- Feldman and Dagan 1995 FELDMAN, Ronen; DAGAN, Ido: *Knowledge Discovery in Textual Databases (KDT)*. In: FAYYAD, Usama; UTHURUSAMY, Ramasamy (eds.): *Proceedings of the First International Conference on Knowledge Discovery and Data mining*. Montréal: Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 1995, p. 112-117.

- Hauschildt et al. 2016 HAUSCHILDT, Jürgen; SALOMO, Sören; SCHULTZ, Carsten: *Innovationsmanagement*. Vol. 6. München: Vahlen, 2016.
- Henderson and Clark 1990 HENDERSON, Rebecca; CLARK, Kim: *Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms*. In: *Administrative Science Quarterly*. 35 (1990), no. 1, p. 9-30.
- Hope et al. 2017 HOPE, Tom; CHAN, Joel; KITTUR, Aniket; SHAHAF, Dafna: *Accelerating innovation through analogy mining*. In: MATWIN, Stan; YU, Shipeng; FAROOQ, Faisal (eds.): *KDD '17: Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York: Association for Computing Machinery, 2017, p. 235-243.
- Kline 1985 KLINE, Stephen: *Innovation is not a linear process*. In: *Research management* 28 (1985), no. 4, p. 36-45.
- Kölbl et al. 2019 KÖLBL, Laura; MÜHLROTH, Christian; WISER, Fabian; GROTTKE, Michael; DURST, Carolin: *Big Data im Innovationsmanagement: Wie Machine Learning die Suche nach Trends und Technologien revolutioniert*. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 56 (2019), no. 5, p. 900–913.
- Krause et al. 2021 KRAUSE, Dieter; VIETOR, Thomas; INKERMANN, David; HANNA, Michael; RICHTER, Timo; WORTMANN, Nadine: *Produktarchitektur*. In: BENDER, Beate; GERICKE, Kilian (eds.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9th ed. Berlin: Springer Vieweg, 2021, p. 335-393.
- Lehmann 1992 LEHMANN, Fritz: *Semantic networks*. In: *Computers & Mathematics with Applications* 23 (1992), no. 2-5. p. 1-50.
- Mühlroth and Grottke 2018 MÜHLROTH, Christian; GROTTKE, Michael: *A systematic literature review of mining weak signals and trends for corporate foresight*. In: *Journal of Business Economics* 88 (2018), no. 5, p. 643-687.
- Nitzsche 2009 NITZSCHE, Manfred: *Graphen für Einsteiger*. 3rd ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- Pleschak and Sabisch 1996 PLESCHAK, Franz; SABISCH, Helmut: *Innovationsmanagement*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.
- Reichenberger 2010 REICHENBERGER, Klaus: *Kompendium semantische Netze*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- Řehůřek 2011 ŘEHŮŘEK, Radim: *Scalability of semantic analysis in natural language processing*. Masaryk University, PhD thesis, 2011.
- Riesener et al. 2022a RIESENER, Michael; KUHN, Maximilian; LAUF, Hendrik; MANOHARAN, Sathish; SCHUH, Günther: *Concept for the identification of product innovation potentials by the application of text mining*. In: *Procedia CIRP* 109 (2022), p. 281–286.
- Riesener et al. 2022b RIESENER, Michael; KUHN, Maximilian; LAUF, Hendrik; SCHUH, Günther: *Method for the Semantic Modelling of the Product Context Using Text Mining for the Derivation of Innovation Potentials*. In: *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (2022), p. 1242–1246.
- Riesener et al. 2022c RIESENER, Michael; KUHN, Maximilian; LAUF, Hendrik; SCHUH, Günther: *Concept for the development of an innovation focused semantic product model*. In: *10th International Conference on Mass Customization and Personalization* (2022), p. 130–137.
- Roeder et al. 2015 ROEDER, Michael; BOTH, Andreas; HINNEBURG, Alexander: *Exploring the space of topic coherence measures*. In: CHENG, Xueqi; LI, Hang; GABRILOVICH, Evgeniy; TANG, Jie

- (eds.): *Proceedings of the eighth ACM International Conference on Web Search and Data mining*. New York: ACM Press, 2015, p. 399–408.
- Roelleke and Wang 2008 ROELLEKE, Thomas; WANG, Jun: *TF-IDF uncovered: A Study of Theories and Probabilities*. In: CHUA, Tatseng; LEONG, Munkew; MYAENG, Syunghyon; OARD, Douglas; SEBASTIANI, Fabrizio (eds.): *Proceedings of the the 31st annual international ACM SIGIR conference*. New York: ACM Press 2008, S. 435-442.
- Ropohl 2009 ROPOHL, Günter: *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. 3rd ed. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2009.
- Romberg 2016 ROMBERG, Andreas: *Innovation 2016*. In: Staufen, 2016, <https://www.staufen.ag/documents/studie-industrie-monitor-innovation-2016/>, (retrieved on 20.10.2022).
- Schubert 1976 SCHUBERT, Lenhart: *Extending the expressive power of semantic networks*. In: *Artificial intelligence* 7 (1976), no. 2, p. 163-198.
- Schuh et al. 2012 SCHUH, Günther; ARNOSCHT, Jens; SCHIFFER, Michael: *Innovationscontrolling*. In: SCHUH, Günther (ed.): *Innovationsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- Schuh 2017 SCHUH, Günther. *Lebenszyklusorientierte Produktentwicklung*. In: SPATH, Dieter; WESTKÄMPER, Engelbert; BULLINGER, Hans-Jörg; WARNECKE, Hans-Jürgen: *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, p. 195-210.
- Schuh et al. 2022 Schuh, Günther; Kuhn, Max; Becker, Annika; Keuper, Alexander: *Market Intelligence - Konsortial-Benchmarking Studie*. In: 2022, https://complexity-academy.com/site/assets/files/2498/08_kbm_wzl_broschuere_a4_2022-02-24_esa_einzelseiten.pdf, (retrieved on 18.11.2022).
- Schumpeter 1939 SCHUMPETER, Joseph: *Business cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. 1st ed. New York: Mcgraw-hill, 1939.
- Tan et al. 2019 TAN, Pang-Ning; STEINBACH, Michael; KARPATNE, Anuj; KUMAR, Vipin: *Introduction to Data mining*. 2nd ed. New York: Pearson, 2019.
- Theobald 2019 THEOBALD, Elke: *Marketing Intelligence Studie 2018 in deutschen B2B-Unternehmen, 2019*.
- Tidd and Bessant 2021 TIDD, Joe; BESSANT, John: *Managing innovation. Integrating technological, market and organizational change*. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2021.
- Turau 2009 TURAU, Volker: *Algorithmische Graphentheorie*. 3rd ed. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009.
- Utterback 1971 UTTERBACK, James: *The process of technological innovation within the firm*. In: *Academy of Management Journal* 14 (1971), no. 1, p. 75-88.
- VDI 2221 Part 1 2019 VDI-Standard VDI 2221 Part 1 2019. Design of technical products and systems.
- VDI 2803 2019 VDI-Standard VDI 2803 2019. Function analysis. Fundamentals and method.
- Weber et al. 2018 WEBER, Wolfgang; KABST, Rüdiger; BAUM, Matthias: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*. 10th ed. Wiesbaden: Springer, 2018.
- Wei and Croft 2006 WEI, Xing; CROFT, William: *LDA-based document models for ad-hoc retrieval*. In: EFTHIMIADIS, Efthimis; DUMAIS, Susan; HAWKING, David; JARVELIN, Kalervo (eds.): *Proceedings of the 29th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. New York: ACM Press, 2006, p. 178–185.
- Žižka et al. 2019 ŽIŽKA, Jan; DAŘENA, František; SVOBODA, Arnošt: *Text mining with Machine Learning. Principles and Techniques*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung – Semantische Technologien für die Prozesskettenplanung

Method for reference-based manufacturing cost estimation – using semantic technologies for process planning

Fynn Hellweg^{1,2}, Simon Haneke¹, Ardian Cacaj¹, Simon Rapp², Albert Albers²

¹Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Campus 1, 71272 Renningen
Fynn.Hellweg@de.bosch.com

²Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, 76131 Karlsruhe

Abstract (deutsch): In schwierigen Marktsituation müssen Unternehmen ihre Produktkosten aktiv steuern. Herstellkostenschätzungen bieten dabei eine solide Grundlage für Design- und Managemententscheidungen. Während diese die Profitabilität eines Unternehmens sichern, ist ihre Erstellung aufwendig und erfordert fundiertes Wissen an der Schnittstelle zwischen Konstruktion, Fertigung und Kosten. Die erforderlichen Informationen sind dabei häufig unstrukturiert und nicht maschinenlesbar gespeichert.

In dieser Studie wird eine Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung unter Verwendung semantischer Technologien vorgestellt. Dazu wurde eine Ontologie entwickelt, die sich am Modell der PGE - Produktgenerationsentwicklung orientiert. Die Methode führt durch die Herstellkostenschätzung eines Bauteils. Zusätzlich wurde ein Prototyp entwickelt und initial evaluiert. Dieser verwendet eine STEP-Datei mit Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) als Eingabe und liefert einen Kostenwert als Ausgabe. Die Studie veranschaulicht das Automatisierungspotenzial der Methode, zeigt aber auch ihre Grenzen auf. Schließlich wird eine breitere anwendungsbezogene Evaluierung der vorgeschlagenen Methode ermöglicht.

Keywords (deutsch):

Herstellkostenschätzung, Modell der PGE, Referenzsystemelement, Ontologie, Wissensgraph

Abstract (english): In today's challenging market situations, companies need to actively manage their product costs. Manufacturing cost estimation provides a basis for sound design and management decisions. While this secures a company's profitability, manufacturing cost estimation is a high-effort activity and requires in-depth knowledge of the intersection of design, manufacturing and costs. Required information is often stored in an unstructured, not machine-readable way.

This research presents a method for reference-based manufacturing cost estimation using semantic technologies. Therefore, an ontology was developed guided by the model of PGE – Product Generation Engineering. The user-centered method contains six steps leading through a manufacturing cost estimation of a component. Also, a prototype was developed and initially evaluated in a case study. It uses a STEP-file including product manufacturing information (PMI) as input and returns a cost value as output. The study illustrates the proposed method's automation potential, but also highlights its limitations. Finally, this study enables a broader application-based evaluation of the proposed method.

Keywords (english):

Manufacturing cost estimation, model of PGE, reference system element, ontology, knowledge graph

1 Introduction

Profitability is a major success factor for companies. Rising cost pressure, especially in difficult market situations incentivizes companies to actively manage their product costs. One example is the electromobility market, where manufacturing cost estimation serves multiple purposes. First, product development is supported early on to develop cost efficient products. Second, the quality of target costing estimates is strengthened. Third, the basis for negotiation with suppliers and customers is improved. The availability of profound product and manufacturing information and the knowledge of its correspondence is essential.

The required information is often of bad quality and not available in a structured way. Examples are local documents stored non-machine-readable and without connection to the product. The knowledge of its interaction is often limited to experienced domain experts. To mitigate the presented issues, semantic technologies and the model of PGE - product generation engineering were used to develop a method for reference-based manufacturing cost estimation. The method was then applied to a use case scenario with the help of a prototype. This research presents the reference-based method, a prototype implementing the method and an initial evaluation of the prototype. The validation of the method has started but is not included in this publication.

2 State of research

2.1 Reference-based manufacturing cost estimation

Reacting to cost pressure, companies and organizations actively manage their costs. In the context of product development, cost engineering is known as methodology to predict costs incurred (Stewart et al. 1995). Cost estimation is a predicting method based on preliminary data and assumptions (Mörtl and Schmied 2015). Niazi et al. (2006) give an overview of cost estimation techniques including advantages and limitations for each proposed category. Manufacturing cost estimation calculates the sum of material costs and manufacturing costs (Horsch 2018). These metrics have a major cost influence on product level, especially with high quantities.

Case-based qualitative techniques: As the largest part of costs is set during development and design, cost estimation should happen early on (VDI 2235). Therein lies a strength of case-based qualitative techniques, where costs are estimated by comparison to previous designs and their costs (Niazi et al. 2006). According to the model of PGE (Albers et al. 2015) most products are developed in generations (Albers et al. 2017) and new products and product generations can be classified according to the share of carryover, embodiment and principle variation. Considering this, case-based techniques are in alignment with the model of PGE – Product Generation Engineering. In the Model of PGE, the reference system is a system containing elements from already existing or planned systems and their documentation. The elements of the reference system are named reference system elements functioning as basis and information source for development (Albers et al. 2019). The identification of suitable reference system elements within case-based qualitative techniques is effortful, especially if data availability and quality are low (Hellweg and Behrendt 2021). Xu et al. (2012) identify improved sharing of product, manufacturing and cost information as crucial. Another difficulty is the low calculation depth of case-based qualitative techniques, that leads to a lack of transparency and high deviations of cost estimations (Niazi et al. 2006).

Operation-based quantitative techniques: Operation-based quantitative techniques on the other hand provide more detailed estimations. In most cases, this is achieved by linking the manufacturing process chain with high accuracy process specific calculations (Niazi et al. 2006). A drawback however is, that those in-depth calculations require detailed information on the product design and manufacturing processes as well as in-depth knowledge about their correlation.

Combination: Case-based qualitative techniques and operation-based quantitative techniques are the most common cost estimation techniques (Xu et al. 2012). Weustink et al. (2000) describe a framework combining both for detailed estimation in early phases of development. A product structure describes the embodiment of a product as a combination of elements and their relation. Therefore, it is possible to map cost information to corresponding elements. The framework can be adapted to different manufacturing processes, e.g. injection molding (Khosravani and Nasiri 2020) or turning (Ben-Arieh and Qian 2003). While those approaches demonstrate the potential of combining case-based and operation-based approaches, they do not directly address the lack of expert knowledge as well as product, manufacturing and cost information, as those are not available in a connected, machine-readable way (Hellweg and Behrendt 2021). Here, the method for reference-based manufacturing cost estimation presents a solution (Figure 1).

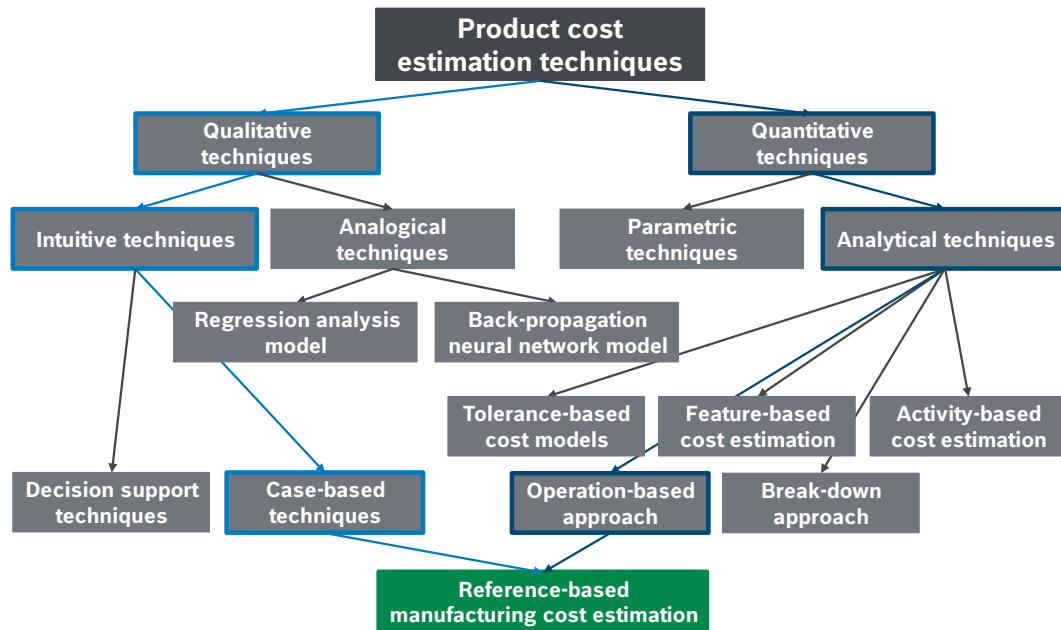


Figure 1: Reference-based manufacturing cost estimation in accordance to Niazi et al. (2006)

2.2 Computer aided process planning

In most cases process planning is an experience-based task (Lundgren et al. 2014). Two stages can be distinguished, the definition of the technology chain and the manufacturing sequence. Fallböhrer (2000) describes a technology chain as abstract, sequential series of manufacturing and assembly technologies without definition of operation equipment. He presents a method supporting technology chain planning in early product development through product and technology data models as well as an interconnection matrix. Trommer (2001) expands the research to define manufacturing concepts, extending the technology chain by operating equipment, storage, handling and testing. Accordingly, he adds three types of analysis. A rough analysis of the data models, a fine analysis of technological and geometric feasibility and an analysis considering the means of production. Knoche (2005) further expands the research by a generic model for manufacturing concepts, considering changes and complex interconnection between technologies. Schindler (2014) adds technology strategy and technology readiness levels into consideration. Jacob (2021) then developed a product model as well as a manufacturing technology model to iteratively optimize technology chains by multi-criteria decision procedures. This enables product and production technology adaptations for optimized technology chains.

In this research, the two-stage approach of technology chains and manufacturing concepts is adopted, safe for a slight change in terminology to better represent its application to the domain of manufacturing cost estimation. The term ‘technology chain’ is redefined as ‘process chain’. The second step – defining operating equipment and machines – is expanded upon by connecting the

process specific definition with cost models. These cost models require product, manufacturing and cost information that usually exceeds the cost engineer's personal knowledge (Hellweg and Behrendt 2021). As more manufacturing technologies emerge and others are being further developed, the overview remains incomplete (Leo Kumar 2019). Thus, a need for computer aid emerges.

2.3 Semantic technologies

Analogous to cost estimation, there are case-based and operation-based reasoning techniques for knowledge based systems (Leo Kumar 2019). Semantic technologies can be used for modelling the information and to identify reference system elements (Mabkhot et al. 2019).

According to Gruber (1993) "An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization". Studer et al. (1998) further explain the definition:

- Formal: machine-readable
- Explicit: unambiguous description of the concepts
- Shared: the ontology represents common knowledge of a group
- Conceptualization: an abstract model of real-world phenomenon through relevant concepts

Instantiating an ontology with information leads to a knowledge graph. In other words, "a knowledge graph is a graph-theoretic representation of human knowledge such that it can be ingested with semantics by a machine." (Kejriwal 2019) Knowledge graphs have been used in different domains to improve identification and automatic processing (e.g. Dibowski and Schmid 2020). Chhim et al. (2019) developed an ontology connecting concepts of product design and manufacturing process knowledge. The ontological cost estimation approach by Voltolini et al. (2019) even addresses costs in early stages of product development, but not in correlation with individual design features. Mandolini et al. (2020) describe a framework for analytical cost estimation of mechanic components based on formal manufacturing knowledge.

Reference system elements can be identified by different techniques:

- SPARQL-Queries (Zheng et al. 2016)
- Search algorithms (Yan et al. 2019)
- Structural comparison (Maillot and Bobed 2018)
- Reasoning (Chen et al. 2020)

3 Research design

3.1 Research gap and question

Concluding the state of research, the model of PGE and case-based techniques show an alignment. In combination with operation-based techniques further potential is seen. For detailed cost estimation a two-stage process including process planning and process specific cost models is suggested. A research gap is seen as suitable references need to be identified out of an extensive knowledge base. Here, a combination of semantic technologies and reference system elements shows potential.

This research is guided by the following research question: **How can semantic technologies support the identification and use of reference system elements for manufacturing cost estimation of gear components?**

The research design is based on the Design Research Methodology (DRM) (Blessing and Chakrabarti 2009). It contains the steps of a comprehensive prescriptive study:

- **Conceptualization** describes the concept development with definition of functions and possible solution paths.

- In **elaboration** existing solutions are reviewed and the intended support and an introduction plan fully described. Therefore, an initial impact model is used.
- In **realization** the actual support is developed.
- In **support evaluation** the support is initially evaluated, modified if necessary and an evaluation plan is outlined for use in a following more in-depth descriptive study.

An initial impact model according to DRM (Blessing and Chakrabarti 2009) was built based on earlier research (Hellweg and Behrendt 2021; Hellweg et al. 2022), observation and expert workshops (Figure 2). The initial impact model defines three measurable success factors influencing four success factors, all leading to profitability as high-level success factor. Automation is seen as key factor for the measurable success factor estimation effort within different companies. Another measurable success factor is the transparency of manufacturing cost estimations. Transparency means that further information on where the cost value results from is accessible if needed. The third measurable success factor is the availability of product, manufacturing and cost information as well as the knowledge of connection between those. Semantic technologies, for example ontologies and knowledge graphs are seen to have high potential to improve the overall profitability through the three measurable success factors. Therefore, the method as developed support and the prototype as possible implementation apply the concepts of ontology and knowledge graph to the field of manufacturing cost estimation.

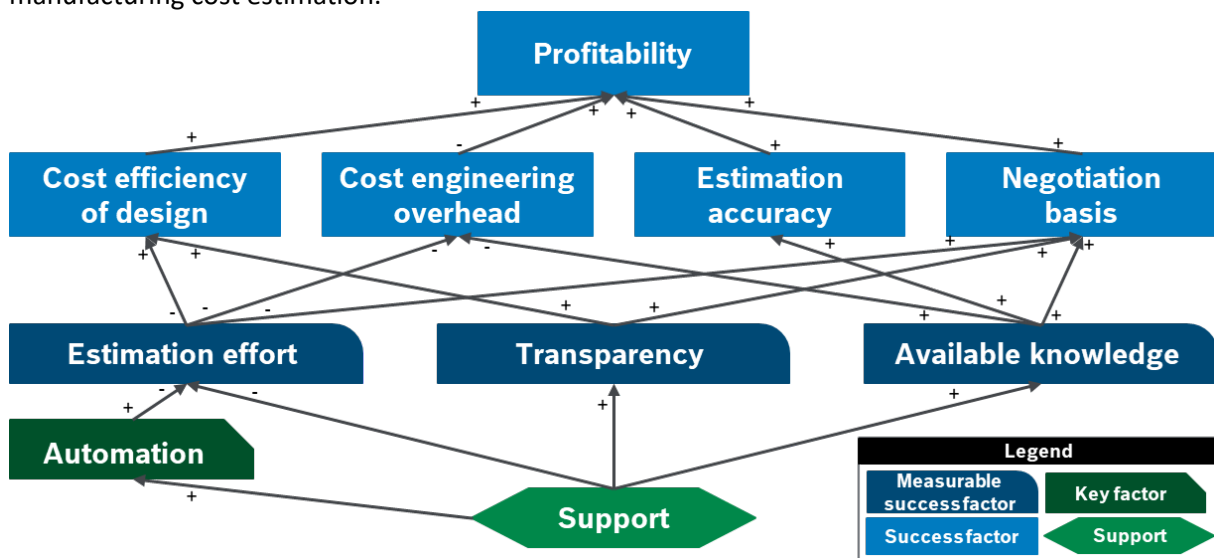


Figure 2: Initial impact model to clarify the intended impact of the support through three measurable success factors on profitability according to Blessing and Chakrabarti (2009).

3.2 Research environment

This research was carried out within a cost estimation department of a large German automotive supplier. Vast knowledge on product, manufacturing and cost level as well as exemplary information on nine different components from transmissions for electric axles was available. The method is based on findings of a descriptive study 1 (Hellweg and Behrendt 2021) and an initial proposal for an ontology and a knowledge graph implementation in the field of cost engineering (Hellweg et al. 2022). Moreover, the understandings of reference system elements according the model of PGE play a key role (Albers et al. 2015). This enabled the development of the method and prototype in the field of gear components for e-mobility. The method's development comprised input from experienced cost and design engineers and three final theses (Brückmann 2021; Haneke 2022; Cacaj 2022).

4 Method and prototype

The method for reference-based manufacturing cost estimation contains six steps. While the method can be applied flexibly to wide-ranging use cases and product types, the prototype is restricted to gear components for e-mobility. The method focusses on the user (4.1). Moreover, it is based on an ontology in the cost engineering domain (4.2). Figure 3 gives an overview of the six method steps, further explained in this section (4.3). Each step is explained in two paragraphs, the first for the method, the second for the prototype.

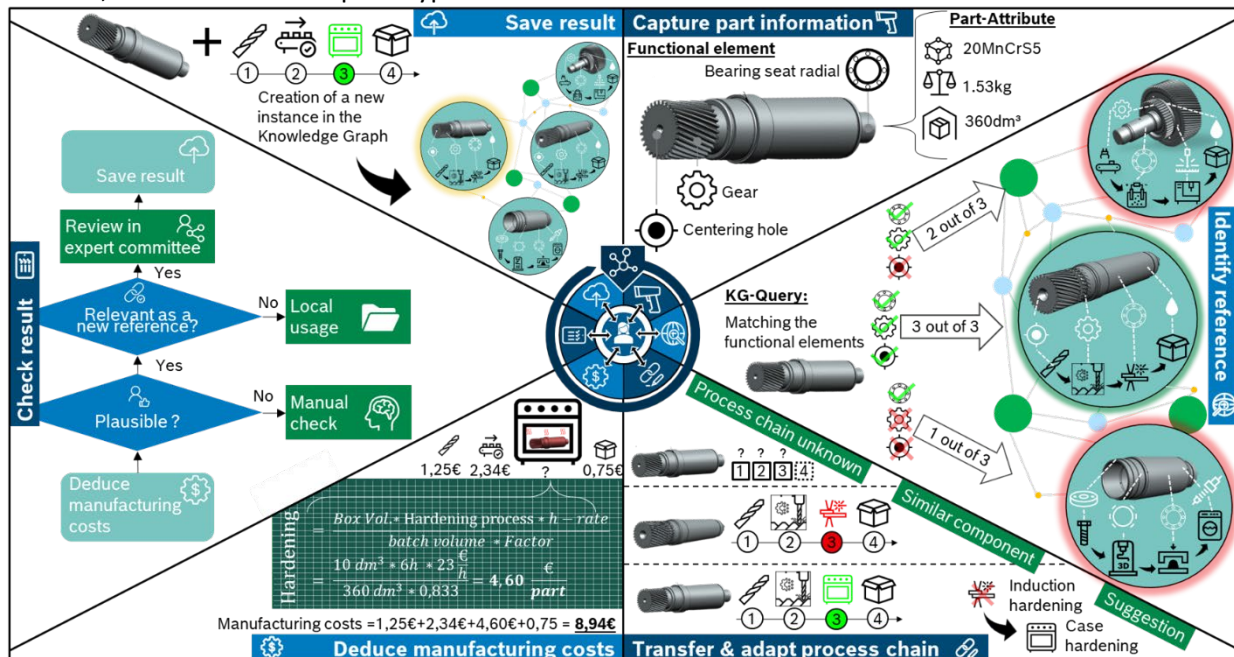


Figure 3: Method for reference-based manufacturing cost estimation.

4.1 User

The intended users are cost engineers. They interact continually with the method. Their expert knowledge and experience ensure the quality in the understanding of human-centered product development (Lohmeyer 2013).

For evaluation a software prototype was developed with python. It helps the study's participants imagining how a possible method application could look like. At the same time an increased detail level enables the identification of difficulties and further effort needed. The graphic user interface (GUI) was developed with the tkinter package to enable an improved user experience.

4.2 Ontology and knowledge graph

A domain-specific ontology is a prerequisite for reference-based manufacturing cost estimation. It ensures the use of semantic technologies and associated benefits. The knowledge graph as a data repository offers the possibility to store product and manufacturing information of earlier product generations in a precisely queryable way. Thus, an initial data set based on already manufactured product generations serves as the basis for the application of the method.

For the prototype the ontology from Hellweg et al. (2022) was used in a partly adapted manner (Figure 4). The ontology was modified with the software TopBraid EDG. The knowledge graph was instantiated with nine gear components of electric axles via the software Stardog. It can be accessed through the prototype by the pystardog package.

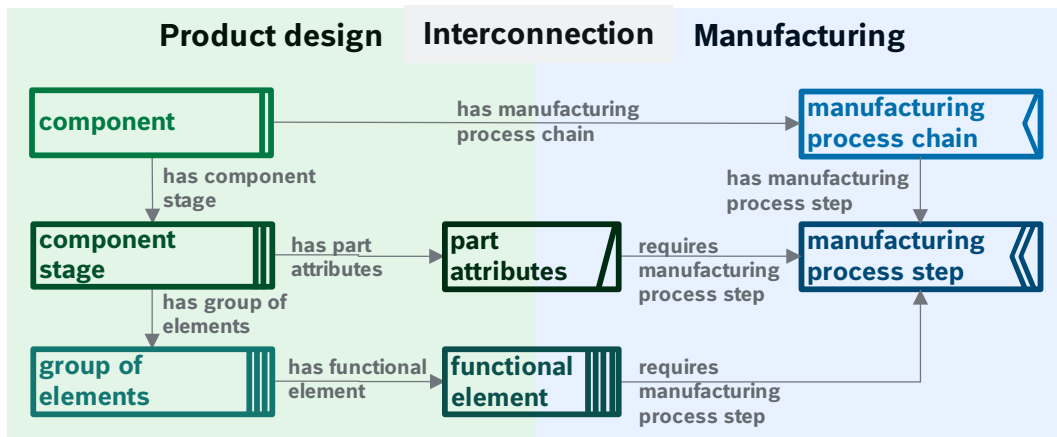


Figure 4: Main concepts of the adapted ontology based on Hellweg et al. (2022).

4.3 Method steps

Capture part information:

To identify a suitable reference system element, a precise description of the component in development is essential. This includes all product information required to fulfill its function and other cost relevant information (e.g. material, weight). The information needs to be accessible in a machine readable and structured form.

Within the prototype the required product information is read automatically from an enriched STEP-file (Figure 5). These files encompass information (e.g. tolerances) which is usually only included on the technical drawing.

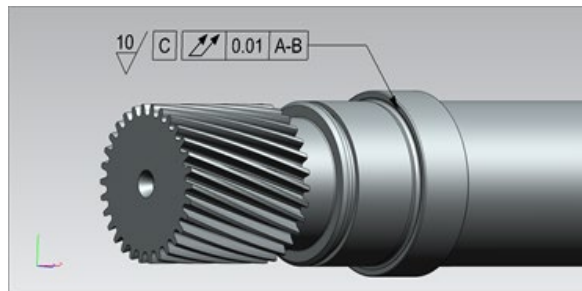


Figure 5: Enriched STEP file of exemplary rotor shaft with the active view of an axial bearing seat.

Identify reference:

Assuming that geometrically similar components are also manufactured in a similar way, a reference system element is to be identified. The similarity criteria used is up to the respective implementation of the method.

Within the prototype, a knowledge graph query is used to identify a reference system element. As similarity criteria the number of matching active surfaces according to the C&C² approach (Matthiesen 2020) is used. For the knowledge graph query SPARQL is used as query language and stardog as knowledge graph access engine (KGAE) and storage location.

Transfer and adapt process chain:

The manufacturing process chain of the reference system element is retrieved from the knowledge graph and serves as starting point for the manufacturing process chain of the component in development. Significant deviations between the components are corrected in this method step. Additionally required manufacturing process steps are added while unnecessary ones are removed.

The prototype uses a describe query to retrieve relevant product and manufacturing information from the knowledge graph. Figure 6 displays the active surfaces and the corresponding manufacturing process chain from the exemplary gear component. The active surface (Gearing) here requires the highlighted manufacturing process steps (hobbing, hardening, honing). If the component

in development would not contain an active surface gearing, the corresponding process steps of the reference system element could be removed, if not also required to manufacture other active surfaces. If an active surface from the component in development is missing from the reference system element, the knowledge graph is searched for a similar active surface with corresponding manufacturing process.

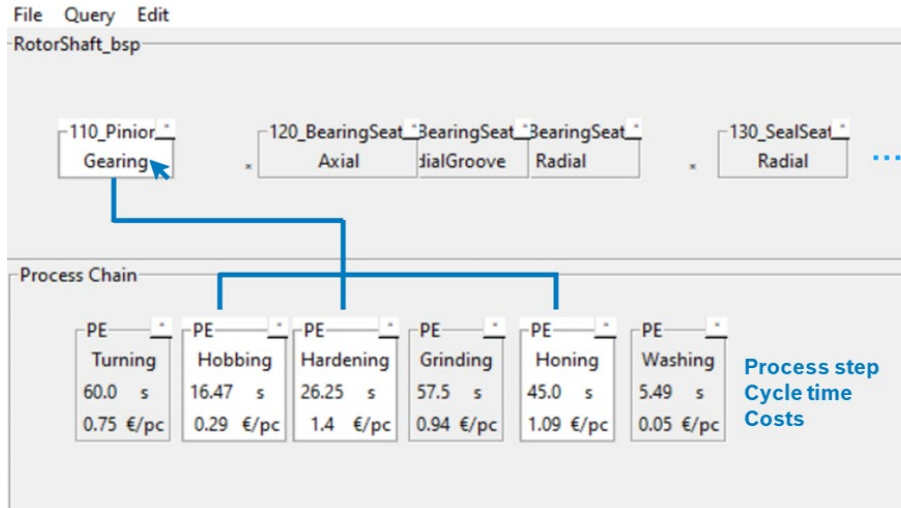


Figure 6: Graphical user interface of the developed prototype shows active surfaces and corresponding manufacturing process steps of an exemplary gear shaft.

Deduce manufacturing costs:

To estimate manufacturing costs based on the process chain, process-specific cost models are required. For estimation the available product and manufacturing information can be used.

Within the prototype a modular approach was implemented. Different processes are calculated in different detail based on an excel integration or implemented directly in python. Due to capacity restraints and the cost impact, the process models are in varying levels detail. For example, the gear hobbing process is calculated in high detail based on gear data (Hellweg et al. 2022), while estimation models for other processes are rudimentary calculations or fixed values based on experience.

Check result:

Due to the automated, reference-based approach occasional inaccuracies when creating the process chain are unavoidable. Therefore, it is essential to check the proposal for correctness and plausibility. In the first instance this can be done by the cost engineer as user. Furthermore, alternative cost estimation tools or manual estimations can be used to check on for discrepancies and make corrections if necessary.

This method step is kept manual within the prototype implementation.

Save result:

After the review process the proposed process chain linked with the component representation can be stored in the knowledge graph. This adds a new reference, so that the knowledge graph and the quality of results is growing continuously through the use phase.

For the last method step the possibility to upload the manufacturing process chain with its corresponding component information was implemented with an insert query.

5 Initial evaluation

The reference-based method for manufacturing cost estimation integrates the concepts of reference system elements and semantic technologies into manufacturing cost estimation. The applicability of the method is shown by the prototype implementation. A manufacturing cost estimation of a new component can easily take several hours when no suitable reference is known to the cost engineer. The collection of information and discussions with domain experts to gain knowledge in specific

manufacturing processes or component types is one aspect, the other the manual calculation in unautomated software. The developed prototype identifies suitable reference system elements and calculates manufacturing and material costs within a minute. In this section the prototype is initially evaluated with focus on calculation quality.

Figure 7 shows which component identifies which component as reference system element. There are bi-directional similarity pairs, which means they identify each other as reference system element [C1-C5], [C3-C4], [C7-C8]. Another objection is the identification of C8 as reference system element for three components [C0, C6, C7].

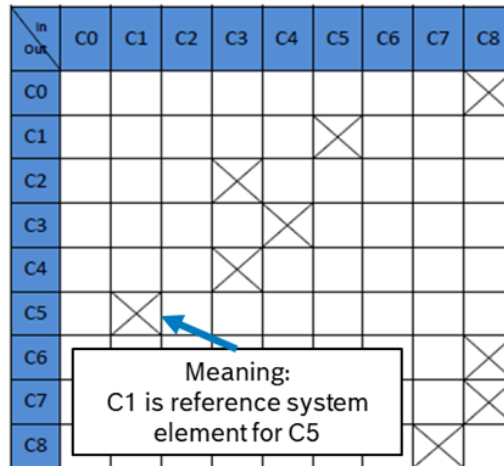


Figure 7: Assignment of components by the similarity query. Row: Component to be designed - Column: Reference system element.

Table 1 shows a comparison of the original with the generate process chains from the prototype. The bottom additionally shows deviations of cost estimation values (Table 1, bottom). The quality criterion for acceptance of estimation values is set to 25% based on expert proposal. The number of different types (e.g. gear grinding vs. gear honing) between the original and the generated process chain (Varied type) has a maximum of 4, while the mean value is 2. As components can be manufactured by different processes the measure has only a limited meaning, yet it still indicates that the prototype can generate alternative process chains. Since the estimated values are company-internal, sensitive data, only relative numerical values are displayed. The evaluation procedure follows Ben-Arieh and Qian (2003). For cost estimation comparison three estimations are distinguished:

- Prototype estimation with generated process chain PG.
- Prototype estimation with original process chain PO.
- Detailed expert estimation with Teamcenter Product Cost Management and original process chain DO. This estimation is set as ground truth, as the components are within development.

Table 1: Number of manufacturing process steps original, generated by the prototype and the deviation of both, in terms of number and type (top). The deviations between three cost estimation values (PG, PO and DO) (bottom) with outliers >25% highlighted.

Information	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
# Steps original	5	8	8	10	9	9	8	5	6
# Steps generated	7	8	10	9	9	8	7	5	7
Delta #	2	0	2	-1	0	1	-1	0	1
Varied type	3	2	4	0	2	2	2	1	2
Delta PG-PO [%]	2	-6	21	-13	10	-3	-5	-1	1
Delta PG-DO [%]	30	-22	72	36	15	-24	-3	-4	-8

Three out of eight estimates [C0, C2, C3] are not within the 25% quality criterion. Estimation for C2 here stands out as significant outlier in both data series. The causes were identified by the authors. First, the cycle time calculation for hardening is generally overestimating. Second, an error was found afterwards in the STEP file of C2, where the weight was incorrect and therefore wrong material costs were calculated within the prototype.

The discrepancy between estimated values from the prototype and the expert estimation can be explained by the rudimentary implementation of some process models. This problem factor was known, but not addressed due to reasons of capacity. Moreover, the high deviation of component C2 illustrates the dependency of correct input data.

6 Summary and outlook

Inclusion of manufacturing knowledge into product development is needed early on to secure companies profitability. There, manufacturing cost estimation shows potential, but is currently an effortful manual task. Especially insufficient availability of machine-readable product and manufacturing information is an obstacle. This research was guided by a research question and is classified as prescriptive study. A method for reference-based manufacturing cost estimation using semantic technologies as well as a prototype were presented.

The prototype was preliminarily evaluated. Deficiencies with the achieved accuracy of the estimated values were identified. The discrepancy between estimated values from the prototype and the expert estimation can be explained by the rudimentary implementation of some process models. This problem factor was known, but not addressed due to reasons of capacity. Moreover, the high deviation of one component illustrates the dependency of correct input data.

Both method and prototype need further validation. Therefore, a validation study with cost engineering experts is planned. A major obstacle for application is the product and manufacturing information availability. This study was conducted with STEP-files including necessary product and manufacturing information. This approach is not yet available in most industry cases. Moreover, for final implementation, better process-specific cost models need to be developed.

Reference

- Albers et al. 2017 ALBERS, A.; BURSAC, N.; RAPP, S.: *PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads*. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 81 (2017), Nr. 1, S. 13–31.
- Albers et al. 2015 ALBERS, A.; BURSAC, N.; WINTERGERST, E.: *Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. In: BINZ, H.; BERTSCHE, B.; BAUER, W.; ROTH, D. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP (2015)*. Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers et al. 2019 ALBERS, A.; RAPP, S.; SPADINGER, M.; RICHTER, T.; BIRK, C.; MARTHALER, F.; HEIMICKE, J.; KURTZ, V.; WESSELS, H.: *The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations*. In: WARTZACK, S.; SCHLEICH, B. (Hrsg.): *The 2nd International Conference on Engineering Design*. Delft: 2019, S. 1693–1702
- Ben-Arieh and Qian 2003 BEN-ARIEH, David; QIAN, Li: *Activity-based cost management for design and development stage*. In: *Int. J. Prod. Econ.* 83 (2003), Nr. 2, S. 169–183
- Blessing and Chakrabarti 2009 BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.: *Design research methodology: DRM, a design research methodology*. Dordrecht: Springer, 2009

- Brückmann 2021 BRÜCKMANN, Harry: *Entwicklung eines Ontologie-basierten Modells zur Verknüpfung von Produktinformationen*. Hochschule Aalen, Masterthesis, 2021
- Cacaj 2022 CACAJ, Ardian: *Validierung einer Methode zur automatisierten Herstellkostenschätzung am Beispiel von Getriebekomponenten für die E-Mobilität*. Technische Hochschule Ulm, Masterthesis, 2022
- Chen et al. 2020 CHEN, Xiaojun; JIA, Shengbin; XIANG, Yang: *A review: Knowledge reasoning over knowledge graph*. In: *Expert Systems with Applications* 141 (2020)
- Chhim et al. 2019 CHHIM, Peter; CHINNAM, Ratna Babu; SADAWI, Nouredin: *Product design and manufacturing process based ontology for manufacturing knowledge reuse*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 30 (2019), Nr. 2, S. 905–916
- Dibowski and Schmid 2020 DIBOWSKI, Henrik; SCHMID, Stefan: *Using Knowledge Graphs to Manage a Data Lake*. In: REUSSNER, R.; KOZIOLEK, A.; HEINRICH, R. (Hrsg.): *INFORMATIK 2020*. Bonn: Gesellschaft für Informatik, 2020, S. 41–50
- Fallböhrmer 2000 FALLBÖHRMER, Markus: *Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung*. RWTH Aachen, WZL, Dissertation, 2000
- Gruber 1993 GRUBER, Thomas R.: *A translation approach to portable ontology specifications*. In: *Knowledge Acquisition* 5 (1993), Nr. 2, S. 199–220
- Haneke 2022 HANEKE, Simon: *Entwicklung eines auf Wissensgraphen basierenden Prozesskettengenerators*. KIT, IPEK. Masterthesis, 2022
- Hellweg and Behrendt 2021 HELLWEG, F.; BEHRENDT, M.: *Enabling Cost Efficient Product Design - An Interview Study on Relevant Manufacturing and Cost Information in Early Phases of Product Development*. University of Strathclyde Glasgow, 2021 (R&D Management Conference 2021 - Innovation in an Era of Disruption)
- Hellweg et al. 2022 HELLWEG, F.; BRÜCKMANN, H.; BEUL, T.; MANDEL, C.; ALBERS, A.: *Knowledge graph for manufacturing cost estimation of gear shafts - a case study on the availability of product and manufacturing information in practice*, Bd. 109. In: ANWER, N. (Hrsg.): *32nd CIRP Design Conference - Design in a changing world*. Paris, 2022, S. 245–250
- Horsch 2018 HORSCH, Jürgen: *Kostenrechnung: Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018
- Jacob 2021 JACOB, A.: *Hochiterative Technologieplanung: Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung*. KIT, wbk, Dissertation, 2021
- Kejriwal 2019 KEJRIWAL, Mayank: *Domain-Specific Knowledge Graph Construction*. Cham: Springer, 2019
- Khosravani and Nasiri 2020 KHOSRAVANI, M. Reza; NASIRI, S.: *Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications*. In: *J. Intell. Manuf.* 31 (2020), Nr. 4, S. 847–864
- Knoche 2005 KNOCHE, Katarina: *Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien*. Aachen, WZL, Dissertation, 2005
- Leo Kumar 2019 LEO KUMAR, S. P.: *Knowledge-based expert system in manufacturing planning: state-of-the-art review*. In: *International Journal of Production Research* 57 (2019), 15-16, S. 4766–4790
- Lohmeyer 2013 LOHMEYER, Quentin: *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme*. KIT, IPEK, Dissertation, 2013

- Lundgren et al. 2014 LUNDGREN, Magnus; HEDLIND, Mikael; KJELLBERG, Torsten: MODEL-BASED INTERACTIVE LEARNING OF PROCESS PLANNING. In: STARE, Johan (Hrsg.): *6th Swedish Production Symposium*. Gothenburg, 2014
- Mabkhot et al. 2019 MABKHOT, Mohammed; AL-SAMHAN, Ali; HIDRI, Lotfi: *An Ontology-Enabled Case-Based Reasoning Decision Support System for Manufacturing Process Selection*. In: *Advances in Materials Science and Engineering* (2019), S. 1–18
- Maillot and Bobed 2018 MAILLOT, Pierre; BOBED, Carlos: Measuring Structural Similarity between RDF Graphs. In: HADDAD, Hisham; WAINWRIGHT, Roger (Hrsg.): *Proceedings of ACM SAC Conference*. Pau: ACM, 2018, S. 1960–1967
- Matthiesen 2021 MATTHIESEN, Sven: Gestaltung – Prozess und Methoden. In: BENDER, B.; GERICKE, K. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin: Springer, 2021, S. 397–465
- Mörtl and Schmied 2015 MÖRTL, Markus; SCHMIED, Christian: *Design for Cost—A Review of Methods, Tools and Research Directions*. In: *Journal of the Indian Institute of Science* 95:4 (2015)
- Niazi et al. 2006 NIAZI, Adnan; DAI, J. S.; BALABANI, S.; SENEVIRATNE, L.: *Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128 (2006), Nr. 2, S. 563.
- Schindler 2015 SCHINDLER, Sebastian: *Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion*. TU München, Dissertation, 2015
- Stewart et al. 1995 STEWART, Rodney D.; WYSKIDA, Richard M.; JOHANNES, James D.: *Cost estimator's reference manual*. 2nd ed. New York, Chichester: Wiley, 1995
- Studer et al. 1998 STUDER, R.; BENJAMINS, V.R.; FENSEL, D.: *Knowledge engineering: Principles and methods*. In: *Data & Knowledge Engineering* 25 (1998), 1-2, S. 161–197
- Trommer 2001 TROMMER, Gunnar: *Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen*. RWTH Aachen, WZL, Dissertation, 2001
- VDI 2235 VDI Richtlinie VDI 2235. 1987. *Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren*
- Voltolini et al. 2019 VOLTOLINI, R.; BORSATO, M.; PERUZZINI, M.: *Cost Estimation in Initial Stages of Product Development – An Ontological Approach*. In: *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems* (2019)
- Weustink et al. 2000 WEUSTINK, I.; BRINKE, E.; STREPPPEL, A.; KALS, H.J.: *A generic framework for cost estimation and cost control in product design*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 103 (2000), Nr. 1, S. 141–148
- Xu et al. 2012 XU, Y.; ELGH, F.; ERKOYUNCU, J.; BANKOLE, O.; GOH, Y.M.; CHEUNG, W.; BAGULEY, P.; WANG, Q.; ARUNDACHAWAT, P.; SHEHAB, E.; NEWNES, L.; ROY, R.: *Cost Engineering for manufacturing: Current and future research*. In: *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 25 (2012), 4-5, S. 300–314
- Yan et al. 2019 YAN, H.; WANG, Y.; XU, X.: SimG: A Semantic Based Graph Similarity Search Engine. In: LI, F.; LUO, J.; PAN, Y.; YANG, L. (Hrsg.): *Seventh International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD)*: IEEE, 2019, S. 114–120
- Zheng et al. 2016 ZHENG, Weiguo; ZOU, Lei; PENG, Wei; YAN, Xifeng; SONG, Shaoxu; ZHAO, Dongyan: Semantic SPARQL similarity search over RDF knowledge graphs. In: *Proceedings of the VLDB Endowment* 9 (2016), Nr. 11, S. 840–851

Vergleich von experimenteller und numerischer Modalanalyse für die Optimierung der Messdatenerfassung an einem Industriegetriebe

Comparison of experimental and numerical modal analysis for the optimization of measurement data acquisition on an industrial gearbox

Manuel Bauer¹, Maximilian Schlotz¹, Tobit Salat¹, Fabian Wagner², Markus Kley¹

¹Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik IAA, Aalen

²Hochschule Aalen, Fakultät für Elektronik und Informatik

manuel.bauer@hs-aalen.de

Abstract (deutsch): Die vorausschauende Instandhaltung ist in der Industrie heutzutage von großer Bedeutung. Hierdurch können Kosten reduziert und Risiken minimiert werden. In der Zustandsüberwachung, die für diese vorausschauende Instandhaltung relevant ist, hat sich die Schwingungsanalyse als bewährte Methode etabliert. Damit lassen sich Schäden schon bei der Entstehung erfassen und bewerten. Für die Schwingungsanalyse werden Schwingungsaufnehmer eingesetzt. Die allgemeine Empfehlung für die Positionierung der Sensoren ist es, den Abstand zum Schaden möglichst gering zu halten. Es gibt allerdings viele Gründe warum ein Sensor nicht immer nach dieser einfachen Regel positioniert werden kann. Da die Sensorposition einen großen Einfluss auf die Messergebnisse hat, ist es die Motivation eine Methode zur Sensorpositionierung zu entwickeln. Dafür werden als Basis in diesem Artikel unterschiedliche Modalanalysemethoden verglichen. Durch diese Untersuchung wird ein Verständnis für die Strukturschwingung aufgebaut und die Basis für die auf diesen Artikel aufbauende Methodenentwicklung für die Sensorpositionierung geschaffen.

Keywords (deutsch):

Eigenfrequenzen, Moden, Schwingungsanalyse, Sensorposition, Zustandsüberwachung

Abstract (english): Predictive maintenance is of great importance in today's industry. This can reduce costs and minimise risks. In condition monitoring, which is relevant for predictive maintenance, vibration analysis has established itself as a proven method. It allows damage to be detected and assessed as soon as it occurs. Vibration transducers are used for vibration analysis. The general recommendation for positioning the sensors is to keep the distance to the damage as small as possible. However, there are many reasons why a sensor cannot always be positioned according to this simple rule. Since the sensor position has a great influence on the measurement results, the motivation is to develop a method for sensor positioning. For this purpose, different modal analysis methods are compared as a basis in this article. Through this investigation an understanding of the structural vibration is built up and the basis for the method development for sensor positioning based on this article is created.

Keywords (english):

natural frequencies, modes, vibration analysis, sensor position, condition monitoring

1 Einleitung

Die Zustandsüberwachung von Maschinen gewinnt in der heutigen Industrie immer mehr an Bedeutung. Die Überwachung von Maschinenelementen bietet die Möglichkeit, den fehlerfreien Maschinenbetrieb abzusichern und die Wartungskosten zu senken. Im Zuge der vierten industriellen Revolution werden neue Techniken und Methoden entwickelt, um diese Ziele zu erreichen. (Gupta und Pradhan 2017) Für die erfolgreiche Überwachung von Maschinenelementen spielt vor allem die optimierte Positionierung der Sensoren eine bedeutende Rolle. Hierfür sind Kenntnisse über Systemeigenfrequenzen und Eigenmoden notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit werden experimentelle und numerische Modalanalyseverfahren verglichen. Durch diese Verfahren lassen sich Eigenmoden von Bauteilen und Strukturen mit den jeweiligen Eigenfrequenzen ermitteln. Dies ist numerisch zum Beispiel über eine Simulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) möglich. Experimentell wird eine Modalanalyse zum Beispiel durch den Einsatz eines Impulshammers und entsprechender Sensorik oder einem Shaker ermittelt. Es soll untersucht werden, inwiefern diese Methoden vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Identifikation von Systemeigenmoden sowie deren Amplituden an spezifischen Messstellen liefern. Diese Untersuchung soll als Grundlage für kommende Optimierungen hinsichtlich der Positionierung von Schwingungssensoren für Zustandsüberwachungssysteme dienen. Hierbei wird als optimale Sensorposition die Position definiert, die die höchsten Eigenfrequenzamplituden des zu überwachenden Systems aufweist, sofern der Einfluss des Anregungsortes auf die Schwingungsübertragung vernachlässigbar ist (Bauer et al. 2021a). Dies bedingt sich daraus, dass die Eigenfrequenzen als Trägerfrequenzen für Schädimpulse an Komponenten dienen und daher hohe Eigenfrequenzamplituden eine Identifikation von Schäden vereinfachen.

Für diese Untersuchung wird ein Stirnradgetriebe mittels FEM simuliert und die Schwingungsamplituden und Eigenfrequenzen an vorab bestimmten möglichen Sensorpositionen ausgelesen. Dieses Getriebe wird ebenfalls experimentell mit dem Impulshammerverfahren untersucht und für die genannten Sensorpositionen die Eigenfrequenzen und Amplituden erfasst. Die Daten werden verglichen und diskutiert.

2 Stand der Technik

2.1 Zustandsüberwachung und Sensorpositionierung

Die Anwendung moderner Methoden der zustandsorientierten Maschineninstandhaltung bewahrt die Betreiber von Maschinen und Anlagen vor unerwarteten Maschinenschäden, die kostspielige Reparaturen und Produktionsausfälle zur Folge haben. Hierbei nimmt die Aufnahme von Schwingungssignalen, gekoppelt mit geeigneten rechnergestützten Signalanalyseverfahren, eine herausragende Position ein. (Wünsch et al. 1996; Bauer et al. 2022b)

Durch Imperfektionen sowie durch etwaige externe Einflüsse werden Maschinenelemente zu Schwingungen angeregt. Entstehen Schäden an Maschinenelementen, werden die Schwingungen entsprechend verstärkt. Somit ist die Beurteilung des Zustandes eines Maschinenelemente immer relativ zu den Schwingungskennwerten im unbeschädigten Zustand zu betrachten. Die Erfassung von Schwingungssignalen erfolgt generell über den Schwingweg, die Schwinggeschwindigkeit oder die Schwingbeschleunigung, aus denen sich Amplituden-Zeit-Funktionen der Schwingung ergeben (Kolerus und Wassermann 2014).

Das Wissen zur Sensorpositionierung ist in unterschiedlichen Normen und Veröffentlichungen zusammengefasst. So zum Beispiel in der DIN ISO 13373-1 Schwingungs- und Zustandsüberwachung (DIN ISO 13373-1:2002-07): Der Sensor soll an oder nahe an den Maschinenelementen angebracht werden. Liegt für eine spezielle zu überwachende Maschinenart entsprechend Erfahrung vor, kann der Sensor auch an anderen Stellen angebracht werden:

- an Messorten, an welchen mit größter Wahrscheinlichkeit die maximale Schwingung auftritt (z. B. in der Mitte zwischen den Lagern großer Gasturbinen);
- an Messorten, an welchen zwischen den rotierenden mit den feststehenden Maschinenteilen nur geringes Spiel besteht und daher Anstreifen möglich ist.

Es wird in der Norm verdeutlicht, dass die Winkellagen nach bester Eignung gewählt werden müssen. Die einzelnen Messpunkte die festgelegt werden sollen deutlich markiert und gekennzeichnet werden, um spätere Messungen wiederholgenau durchführen zu können.

2.2 Modalanalyse durch eine Simulation mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM)

Die Modalanalyse dient zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungsformen einer Struktur für natürliche Schwingungen. Beide Größen treten immer paarweise auf. Als Eigenschwingungsform wird dabei der Verformungszustand bezeichnet, der sich bei der Anregung mit der zugehörigen Eigenfrequenz ergeben würde. Die berechneten Verschiebungswerte entsprechen dabei allerdings nicht den real auftretenden Schwingungsamplituden, sondern dienen lediglich dem relativen Vergleich zwischen verschiedenen Positionen an der Struktur (Veit Steger 2017). Die Moden und die Frequenzen werden durch die Lösung der Eigenwertgleichungen des Systems bestimmt. Diese Gleichungen beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilen des Systems und können durch analytische oder numerische Methoden gelöst werden. Ansys Workbench bietet für die Simulation und Berechnung verschiedener Aufgaben die passenden Tools an, so auch für die Modalanalyse. Grundsätzlich stehen hier fünf verschiedene Solver Typen zur Verfügung, der Sparse direct Solver, der Preconditioned Conjugate Gradient Solver, der Jacobi Conjugate Gradient Solver, der Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Solver und der Quasi-Minimal Residual Solver. (Thompson, Thompson 2017) Das allgemeine Eigenwertproblem wird durch den Zusammenhang zwischen der globalen Steifigkeitsmatrix K , der globalen Massenmatrix M , den Eigenkreisfrequenzen ω_i und den Eigenvektoren u_i beschrieben.

$$Ku_i = \omega_i^2 Mu_i \quad (1)$$

Mit der Inversen der globalen Massenmatrix gelangt man zum speziellen Eigenwertproblem.

$$(M^{-1}K)u_i = \omega_i^2 u_i \quad (2)$$

Das spezielle Eigenwertproblem kann nach den gesuchten Eigenkreisfrequenzen umgestellt werden.

$$(M^{-1}K) = \omega_i^2 \quad (3)$$

Um hieraus die auftretenden Eigenfrequenzen zu berechnen, wird zunächst das Ergebnis aus Formel 3 radiziert und anschließend durch 2π geteilt.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (4)$$

Ansys verwendet zum Lösen des allgemeinen Eigenwertproblems den Preconditioned Conjugate Gradient Solver, welcher nach dem iterativen Lanczos Verfahren arbeitet. Dabei wird eine Spektralverschiebung μ auf das allgemeine Eigenwertproblem angewandt.

$$(K - \mu M)u_i = (\omega_i^2 - \mu)Mu_i \quad (5)$$

Die Reduktion des allgemeinen spektralverschobenen Eigenwertproblems auf das spezielle spektralverschobene Eigenwertproblem erfolgt implizit im Lanczos-Verfahren.

$$Cy_i = L_M^{-1}(K - \mu M)L_M^{-T}y_i = (\omega_i^2 - \mu)y_i \quad (6)$$

Hierbei ist die Matrix $C = M^{-1}K$, L_M ist die Cholesky-Zerlegung von M und $y_i = L_M^T u_i$. Die Matrix C enthält die betragsmäßig kleinsten Eigenwerte, was jedoch dazu führen würde, dass der Algorithmus nur langsam konvergieren würde. Durch die Inverse von C werden die betragsmäßig größten Eigenwerte ermittelt, dadurch konvergiert der Algorithmus schneller. ρ_i sind die Eigenwerte der inversen Matrix C . Um die gesuchten Eigenwerte zu erhalten, müssen die inversen Eigenwerte ρ_i rücktransformiert werden.

$$\omega_i^2 = \frac{1}{\rho_i} + \mu \quad (7)$$

Wird das Ergebnis aus Formel 7 radiziert und wendet man daraufhin Formel 4 an, erhält man die gesuchten Eigenfrequenzen in der Einheit Hertz. (Meier 2003; Thompson, et al. 2017) Die

Berechnungsmethode erlaubt keine Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten. Durch eine Schwingungsform hervorgerufene Änderung des Kontaktzustandes oder ein lokales Plastifizieren der Struktur werden also nicht erfasst. Die Simulation kann für ungespannte, eingespannte oder vorgespannte Systeme gleichermaßen durchgeführt werden. Für die Betrachtung einer vorgespannten Struktur ist zunächst mit einer vorgelagerten statischen FEM-Analyse der Spannungszustand für die Einspannsituation zu ermitteln. Die Simulation kann für ungedämpfte und gedämpfte Strukturen erfolgen. Im Falle des gedämpften Systems führt dies zu unsymmetrischen Matrizen, die andere numerische Lösungsverfahren benötigen. Die Lösung ergibt komplexe Eigenwerte und insgesamt steigt dadurch der Rechenaufwand. Unabhängig davon hängt die Rechenzeit von der Modellgröße und der Anzahl der Moden ab, die für die technische Bewertung mit in die Betrachtung einzubeziehen sind. Gleichermaßen steigt auch der Platzbedarf für temporäre Berechnungsdaten und die Speicherung der Ergebnisse. (Seidl et al. 2011)

Die Ergebnisse einer Modalanalyse sind wesentlich für die Beurteilung und Dimensionierung von dynamisch belasteten Systemen. Der Modalanalyse kommt daher eine bedeutende Rolle zu. Sie ist neben der statischen FEM-Simulation eine häufig verwendete Analyseart in der Mechanik. Zudem wird das Ergebnis der Modalanalyse als Basis für weitere Simulationen verwendet. Dazu zählen die Frequenzganganalyse, die Analyse des Antwortspektrums oder die Untersuchung von zufallserregten Schwingungen mit Hilfe einer PSD-Analyse (Power Spectral Density = Leistungsdichtespektrum). Ebenso basiert auch die dynamische Reduktion einer Struktur auf den Ergebnissen der Modalanalyse. (R.M. Natal und Tavares 2007)

2.3 Experimentelle Modalanalyse durch eine Impulshammeruntersuchung

Zur Identifikation der Systemeigenmoden eignet sich eine Impulshammeruntersuchung. Durch die experimentelle Modalanalyse ist es möglich, ein dynamisches System auf dessen Schwingungseigenschaften zu untersuchen. Diese wird in der Regel mit einem zweikanaligen Schwingungsmesssystem durchgeführt. Verwendet werden ein Impulshammer mit eingebautem Kraftsensor sowie ein Sensor zur Erfassung der Schwingungen, beispielsweise ein Beschleunigungssensor. Ein Kanal des Messsystems erfasst die Kraft des Hammerschlags, der andere die Reaktion des Prüflings auf den Schlag. Aus diesen beiden Signalen wird die Übertragungsfunktion, das Verhältnis vom Spektrum des Ausgangssignals (Sensor) zum Spektrum des Eingangssignals (Hammer), als Beschleunigung pro Kraft über der Frequenz ermittelt. Die Eigenfrequenzen weisen in der Übertragungsfunktion hohe Verstärkungsspitzen auf und können so identifiziert werden (Schaeffler 2019). Bei einer Impulshammernessung wird ein breites Spektrum an Anregungsfrequenzen erzeugt, wodurch die Systemeigenfrequenzen über einen breiten Frequenzbereich identifiziert werden können. Sind die Eigenfrequenzen mit ihren Auslenkungen bekannt, lassen sich daraus die erwarteten Schwingformen ableiten. In (Zauner 2010) wird das Vorgehen zur Identifikation von Eigenmoden eines Sandwich-Balkens über eine Impulshammeruntersuchung beschrieben. Das Verfahren ist schnell sowie einfach durchzuführen und erfordert keine Vorbereitung der zu überwachenden Systeme. Es kann sowohl im installierten Zustand als auch im ausgebauten Zustand durchgeführt werden und bietet eine kosteneffektive Möglichkeit, die Übertragungsfunktionen zu ermitteln. Alternativ kann die Anregung durch einen Shaker erfolgen (Kuttner, Rohnen 2019). Aus dem Verhältnis der Anregungsschwingung zur gemessenen Schwingung lässt sich auch hier die Übertragungsfunktion bestimmen. In (Cao et al. 2018; Cao et al. 2017) wird dieses Vorgehen für Wälzlagerringe erläutert, wobei über einen Shaker ein Chirp-Signal zur Anregung genutzt wird und die Komponentenschwingungen über ein Vibrometer erfasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll ausschließlich die Anregung mittels Impulshammer betrachtet werden. Der generelle Ablauf einer experimentellen Modalanalyse wird in Abbildung 1 veranschaulicht.

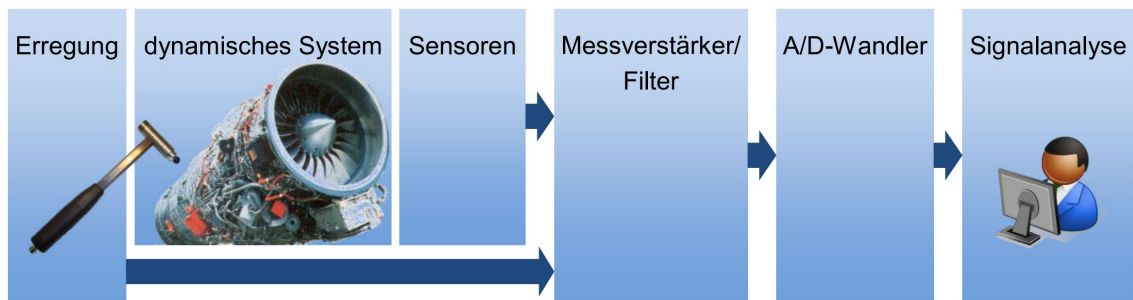


Abbildung 1: Ablauf einer experimentelle Modalanalyse (Bestle 2023)

Nachdem das dynamische System mithilfe des Impulshammers angeregt wurde und die Sensoren die Impulsantwort erfasst haben, werden alle Signale gefiltert und ggf. verstärkt. Daraufhin erfolgt das Einlesen der Signale durch einen A/D-Wandler (analog/digital-Wandler) auf einen Digitalrechner zur Signalanalyse. Mithilfe der Fast Fourier Transformation (FFT) wird der Frequenzinhalt des Amplituden-Zeit-Signals analysiert (Bauer et al. 2022a). Die FFT generiert keine neuen Daten aus dem Signal, sondern es wird ein anderer Zusammenhang der im Signal vorhandenen Informationen hergestellt (Amplituden-Frequenz-Spektrum) (Bestle 2023). Der Zusammenhang zwischen Amplituden-Zeit-Signal und Amplituden-Frequenz-Spektrum wird beispielhaft in Abbildung 2 aufgezeigt.

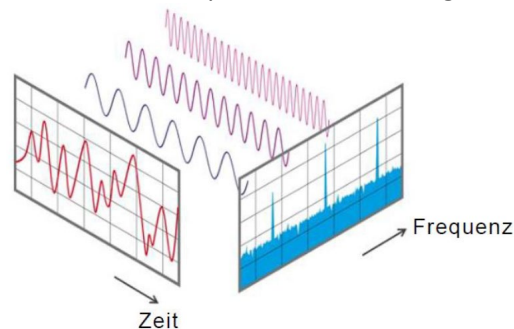


Abbildung 2: Prinzipieller Zusammenhang bei der FFT (NTI AUDIO 2017)

Durch die Division der so gewonnen Frequenzgänge von Schwingungsantwort und Erregerkraft, können nun komplexe Übertragungsfunktionen berechnet werden. Aus diesen werden dann Eigenfrequenzen, Schwingungsmoden und modale Dämpfungsparameter über einen breiten Frequenzbereich identifiziert. Sind Auslenkungen der Eigenfrequenzen bekannt, lassen sich daraus die erwarteten Schwingungsformen ableiten. (Bestle 2023) Es bestehen verschiedene Möglichkeiten der Schwingungsanalyse mittels Impulshammer. Eine spezielle Anwendungsform wurde von (Tirelli 2004) im Rahmen seiner Veröffentlichung „Modal Analysis of Small & Medium Structures by Fast Impact Hammer Testing Method“ erforscht. Es sollte die Möglichkeit untersucht werden, ob die schnelle Impulshammer-Methode auch bei größeren Strukturen wie Bauwerken mit hoher Dämpfung Anwendungen finden kann, da diese bisher nur bei kleineren Strukturen mit geringer Dämpfung hinreichend erforscht ist. Hierbei unterscheidet sich die Fast-Impuls-Hammer-Testing (FIHT) Methode im Vergleich zur konventionellen Impulshammermethode dadurch, dass jeweils nur ein oder zwei Ausgangssignale untersucht werden in Verbindung mit der umfassenden Nutzung der Reziprozität der Frequency-Response-Function (FRF). Durch den so reduzierten Aufwand hat sich die FIHT-Methode sowohl hinsichtlich der Prüfung als auch hinsichtlich der Signalverarbeitung als sehr zeitsparend erwiesen, ohne dabei die Genauigkeit zu beeinträchtigen. Somit konnte die Methode sowohl im Labor als auch an realen Strukturen wie der in der Veröffentlichung untersuchten Autobahnbrücke erfolgreich eingesetzt werden. Trotz dessen, dass weniger Zeit als bei der traditionellen Methode benötigt wird, kann festgestellt werden, dass die Genauigkeit im Allgemeinen vergleichbar oder gar höher ist. (Norman et al. 2012). Die Impulshammer-Methode wird in dieser Arbeit vergleichbar angewendet wie in der Veröffentlichung von Bauer, Wagner und Kley (Bauer et al. 2021a)

3 Versuche

Im nachfolgenden Kapitel werden die Versuchsergebnisse der Impulshammeruntersuchung und der FEM-Simulation isoliert ausgewertet. Eine Gegenüberstellung und Diskussion erfolgen in Kapitel 4.

3.1 Prüfling und mögliche Sensorpositionen

Die Versuche werden an einem 2-stufigen Stirnradgetriebe durchgeführt. Das Getriebe wird im CAD nachmodelliert, um die simulativen Untersuchungen durchzuführen. Im Vorfeld werden 24 mögliche Positionen für Schwingungssensoren bzw. Anschlagpunkte für die Impulshammeruntersuchung definiert, um eindeutig die besten Positionen bestimmen zu können. Es wird darauf geachtet, dass die Sensoren vollflächig und geometrisch definiert an den Positionen anliegen können. Die axiale bzw. radiale Ausrichtung und die Nähe in Bezug auf mögliche Schadensquellen wie Lager oder Zahnräder ist bei der Platzierung der Sensoren entscheidend. Bei der FEM-Analyse dienen diese Punkte dazu, um Verformungen des Gehäuses an dieser Stelle zu ermitteln. Wohingegen bei der Impulshammeruntersuchung diese Stellen als Anregungspunkte mit dem Hammer dienen und die auftretenden Schwingungen an der Ausgangswelle gemessen werden. In Abbildung 3 ist das Getriebe mit allen Punkten abgebildet.

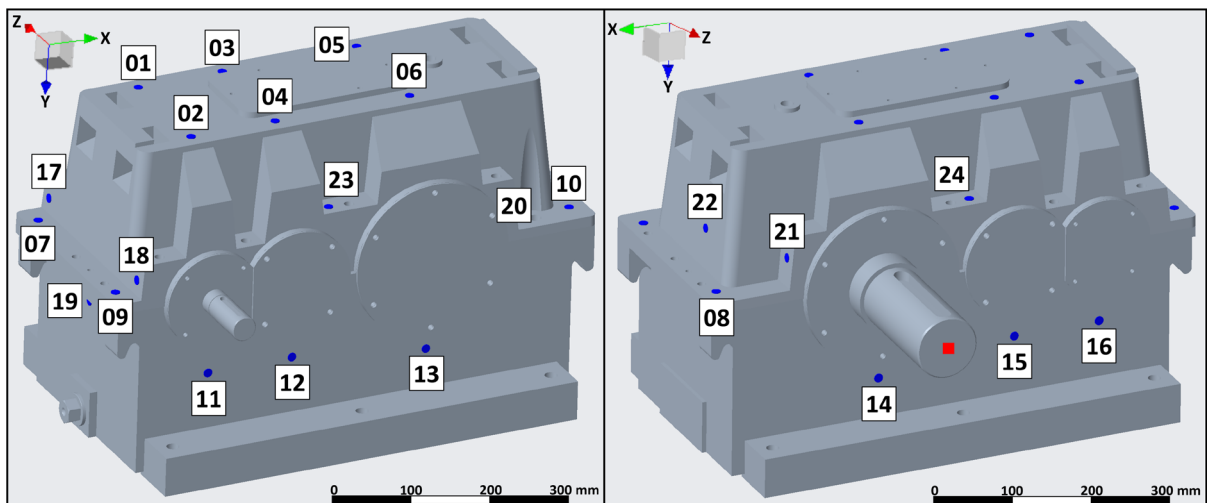


Abbildung 3: Anregungspunkte bzw. Verschiebungspunkte (blau) und Impulshammer-Sensorposition (rot)

3.2 Versuchsaufbau und Ergebnisse bei der FEM Simulation

Die Grundlage für die Erstellung des Simulationsmodells in Ansys Workbench ist ein vollständiges CAD-Modell des Getriebes. Aus den vorhandenen technischen Zeichnungen werden zunächst die CAD-Modelle der einzelnen Baugruppenkomponenten erstellt. Das Gehäuseober- und -unterteil wird mit minimalen Erhebungen an den Sensorpositionen versehen. Dadurch können in der anschließenden Simulation die Verschiebungen an den jeweiligen Sensorpositionen ermittelt werden. Das Ziel für den Aufbau des Simulationsmodells ist es, die Randbedingungen so zu gestalten, dass sie mit dem realen Aufbau möglichst exakt übereinstimmen. Hierzu zählt die Zuordnung der Werkstoffe. Dem Gehäuse wird als Material Grauguss zugewiesen und den Wellen und Zahnrädern Baustahl. Eine weitere Randbedingung bildet die Wahl der Lagerung. Diese ist in der Simulation als starres Auflager über die beiden gesamten Auflageflächen der unteren Getriebegehäusehälfte definiert. Hierbei gibt es eine Abweichung zur Realität, da die starre Auflagerung im Realfall nur an den Verschraubungen erfolgen kann. Damit für die Berechnung die Zusammenhänge der einzelnen Baugruppenkomponenten bekannt sind, werden ihre Kontakte und Verbindungen definiert. Die Zusammenhänge werden dabei

eigenständig von Ansys Workbench erkannt. Manuell können fehlende Verbindungen ergänzt werden. In Abbildung 4 wird beispielhaft die Gesamtverformung bei der Frequenz von 1685,2 Hz dargestellt.

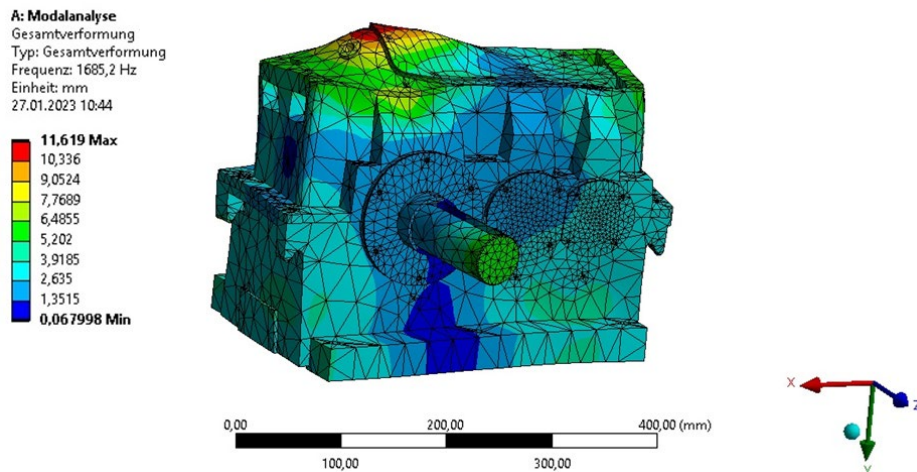


Abbildung 4: Verformungsergebnis der Modalanalyse

Die durch die Simulation errechneten Eigenfrequenzen treten überwiegend ab einer Frequenz von ca. 1000 Hz auf. Bei der Eigenfrequenz von 55 Hz bildet sich eine Eigenmode in der ausschließlich eine Welle schwingt. Die Eigenfrequenzen sowie die zugehörigen normierten Amplitudenausprägungen über die betrachteten Sensorpositionen auf Basis der FEM-Simulation sind in Abbildung 5 dargestellt.

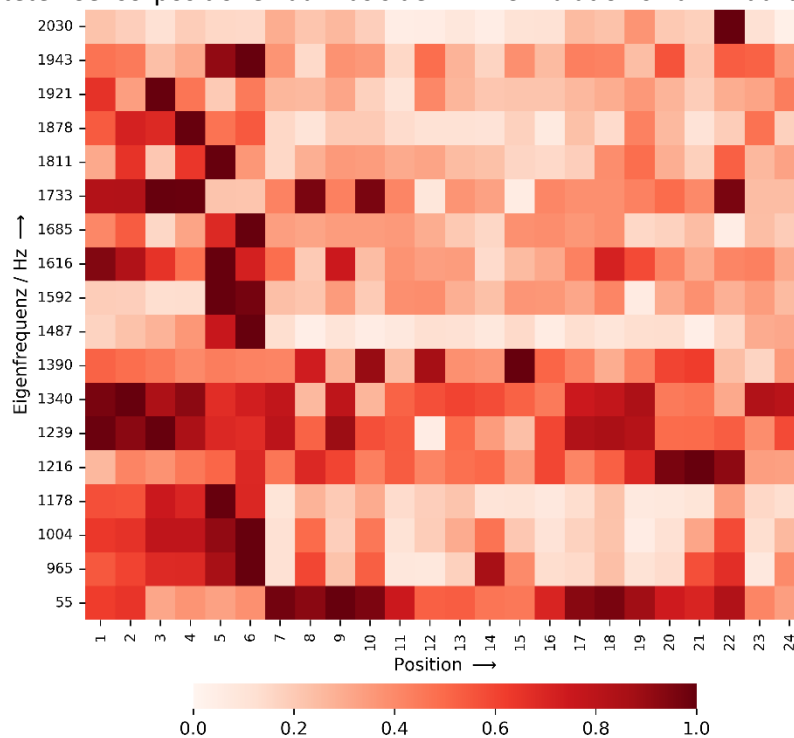


Abbildung 5: Frequenzabhängig normierte Amplituden der FEM-Simulation über alle Sensorpositionen

Bei der Frequenz von 55 Hz werden insbesondere die Sensoren 7-10 und 16-22 angeregt. Über den restlichen Frequenzbereich findet besonders eine Anregung der Sensoren 1-6 statt. Es wird ersichtlich, dass die Anordnung der Sensoren am Gehäuse einen Einfluss auf die Ausprägung der Schwingungsamplitude bei unterschiedlichen Eigenfrequenzen hat.

3.2 Versuchsaufbau und Ergebnisse bei der Impulshammeruntersuchung

Durch eine experimentelle Impulshammermessung kann das Schwingverhalten von Objekten bestimmt werden, um beispielsweise die Eigenfrequenzen zu identifizieren. Hierbei wird das Objekt mittels Hammerschläge angeregt und dessen Schwingungsanregung durch einen oder mehrere Sensoren gemessen. Bei diesen Versuchen wurde ein Impulshammer der Firma Kistler des Typs 9722A2000 mit einem Impact-Tip des Typs 9904A und ein 3-Achs-Beschleunigungssensor der Firma PCB des Typs J356B08 verwendet (Abbildung 6).



Abbildung 6: Impulshammer der Firma Kistler des Typs 9722A2000 und Beschleunigungssensor der Firma PCB des Typs J356B08

Mit diesem Impulshammer ist es möglich das Objekt mit Frequenzen zwischen 0 und 4500 Hz anzuregen. Der 3-Achs-Beschleunigungssensor verfügt über einen Frequenzbereich von 0,5-5000 Hz und deckt somit den erforderlichen Frequenzbereich ab, da in dieser Arbeit lediglich Frequenzen bis 2000 Hz untersucht werden (Bauer et al. 2021a). Zur Messdatenerfassung wurde ein SCADAS MOBILE von LMS genutzt, ein Datenaufnehmer mit 16 Kanälen für Sensoren und Impulsgeber, sowie einem Ethernet Anschluss zur Datenübertragung. Damit ist es möglich die Messdaten von bis zu 16 Quellen aufzuzeichnen und mit dem Ethernet-Kabel in Echtzeit an einen Computer zu übertragen. (Clenn 2005) In Abbildung 7 ist das eingesetzte Messequipment schematisch abgebildet.

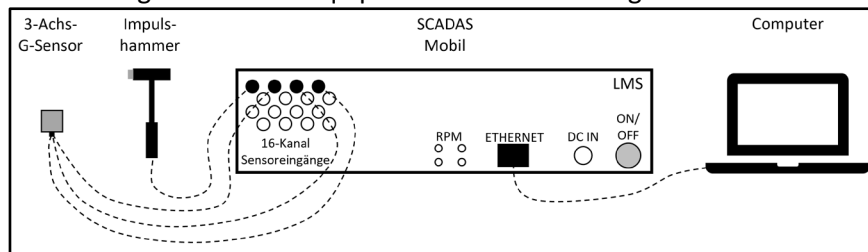


Abbildung 7: Messequipment bei der Impulshammermessung

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit Hilfe des Programms Simcenter-Testlab von Siemens PLM. Mittels dieses Programms ist es möglich, die Kohärenz der Signale schon während des Messens zu überprüfen und im Nachgang Schwingungsanalysen durchzuführen, um beispielsweise Eigenmoden zu ermitteln. (LMS SCADAS)

Die Auswertung der Impulshammermessungen erfolgt im ersten Schritt – wie die Messungen selbst – in Simcenter Testlab. Hierbei ist es möglich für jeden Anschlagpunkt die Eigenfrequenzen und deren Amplituden zu ermitteln und zu exportieren.

Da die Anschläge in allen 3-Achsrichtungen erfolgen, werden die resultierenden Schwingungen auch entsprechend erfasst. Daraus resultieren unterschiedliche Eigenfrequenzen. Um die Amplituden der angeregten Frequenzen für die unterschiedlichen Sensorpositionen zu vergleichen, werden die gemessenen Amplituden für jede erfasste Eigenfrequenz über alle Sensorpositionen normiert gegenübergestellt (siehe Abbildung 8).

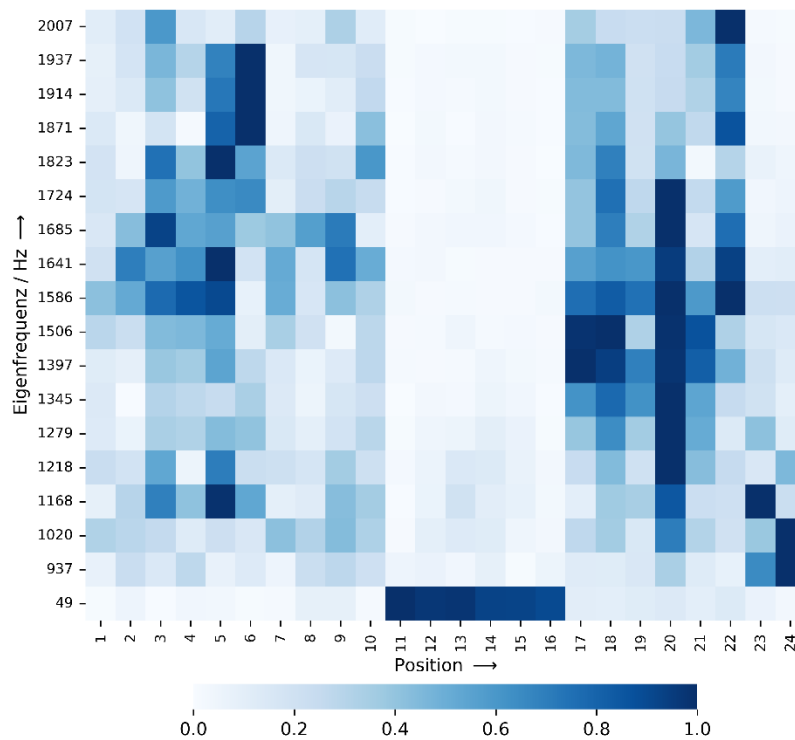


Abbildung 8: Frequenzabhängig normierte Amplituden der Impulshammeruntersuchung über alle Sensorpositionen

Die Ergebnisse zeigen, dass nur bei der Eigenfrequenz von 49 Hz eine relevante Amplitudenausprägung an den Positionen 11-16 stattfindet. Für die Eigenfrequenzen von 937 Hz - 1168 Hz werden insbesondere die Positionen 23 und 24 angeregt. Bei 1218 Hz bis 1724 Hz erfährt Position 20 die höchste Anregung. Wobei bei den Sensoren 2-4, 17-19, 21, 22 ebenfalls erhöhte Ausprägungen zu identifizieren sind. Im Bereich von 1823 Hz - 2007 Hz weisen die Punkte 5 und 6, sowie Punkt 22 die höchsten Anregungen auf. Die Sensorpositionen lassen sich Abbildung 3 entnehmen. Wie auch bei der FEM-Simulation zeigt sich, dass die Anordnung der Sensoren am Gehäuse einen Einfluss auf die Ausprägung der Schwingungsamplitude bei unterschiedlichen Eigenfrequenzen hat.

4 Ergebnisvergleich von der Impulshammeruntersuchung und der FEM-Simulation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der FEM-Simulation und der Impulshammeruntersuchung gegenübergestellt.

Zunächst werden die identifizierten Eigenmoden der beiden verwendeten Modalanalysemethoden verglichen. Es werden 18 Moden identifiziert, deren spezifische Frequenzen für beide Methoden in Abbildung 9 aufgetragen sind.

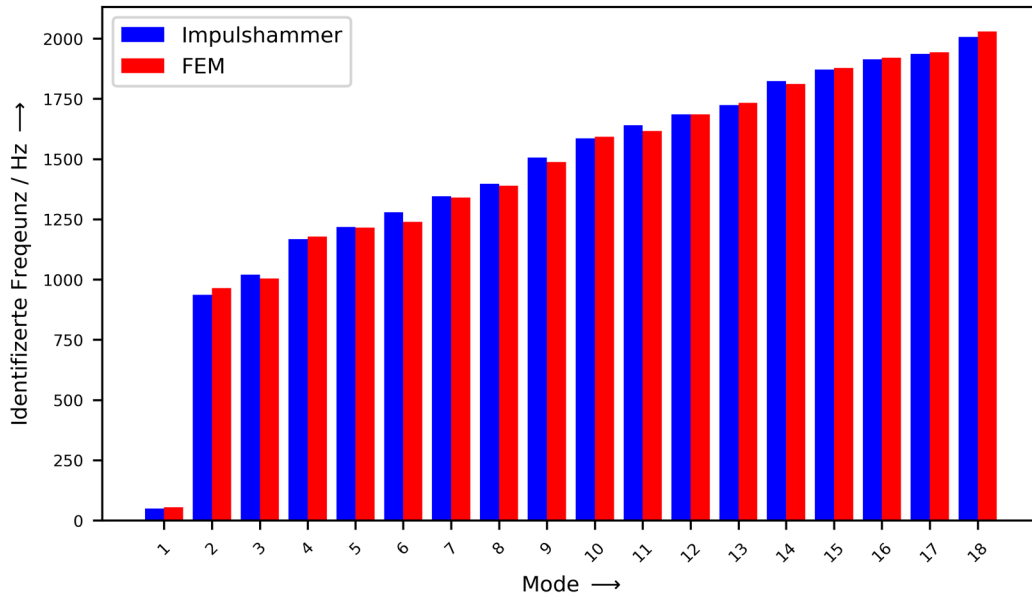


Abbildung 9: Gegenüberstellung der identifizierten Frequenzen der Impulshammeruntersuchung und der FEM-Simulation

Die identifizierten Frequenzen weisen nur marginale Abweichungen auf. Die Abweichungen liegen zwischen ca. 11,9 % bei Mode 1 (48,7 Hz – 55,3 Hz) und 0,01 % bei Mode 12 (1685 Hz – 1685,2 Hz) mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,55 %. Damit sind die Abweichungen vergleichbar mit bisherigen Veröffentlichungen wie beispielsweise von (Chavan et al. 2013) (Abweichung: 0,008-14,25 %), (Nigade 2012) (Abweichung: 2,65-7,05 %) und (Yi et al.2016) (Abweichung: 3,3-6,9 %). Es lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass beide Modalanalysemethoden geeignet sind, um die Eigenfrequenzen des Getriebes zu ermitteln. Nachfolgend werden in Abbildung 10 die normierten und über alle Eigenmoden gemittelten Amplituden der Impulshammeruntersuchung sowie der FEM-Simulation für jede Position qualitativ gegenübergestellt.

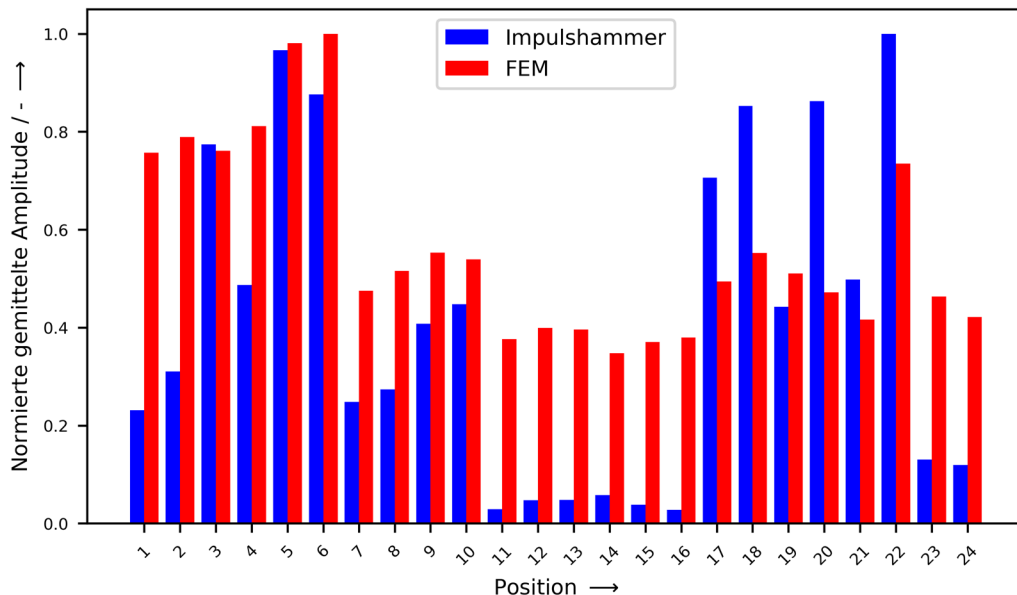


Abbildung 10: Qualitative Gegenüberstellung der normierten und gemittelten Amplituden der Impulshammeruntersuchung und der FEM-Simulation

Die höchsten Amplituden bei den Ergebnissen der FEM-Simulation sind eindeutig bei den Positionen 1-6 erkennbar. Dies sind alle Positionen die senkrecht auf der Gehäuseoberseite sitzen.

Auch bei den Impulshammeruntersuchungen sind bei den Positionen 3, 5 und 6 hohe Amplituden zu erkennen. Im Gegensatz zur FEM-Simulation werden bei der Impulshammeruntersuchung, bedingt durch die lokale Impulsgebung an der Getriebeabtriebswelle, ebenfalls die Sensorpositionen 17-22 erkennbar angeregt. Position 17,18,20 sowie 21 liegen radial zu den Lagerstellen der Welle, Position 19 sowie 22 an der Gehäusewand zwischen den Auflagerstellen (siehe Abbildung 3). Ersichtlich wird, dass die Positionen 11-16, welche seitlich am Getriebegehäuse axial zur Wellenlagerung liegen, keine relevante Anregung erfahren. Diese zeigen für die FEM-Simulation ebenfalls die geringste Ausprägung. Wie schon in den Grafiken zur qualitativen Amplitudenanregung über alle Frequenzen des Impulshammers (siehe Abbildung 8) sowie der FEM-Simulation (siehe Abbildung 5) ersichtlich war, erscheinen die Positionen 11-16, sowie 23 und 24 als ungeeignet.

Basierend auf der eingangs gestellten Hypothese, dass die Sensorpositionierung an Positionen mit hohen Eigenmodenamplituden zu einer Verbesserung der Messqualität führt, lässt sich hieraus ableiten, dass mit beiden untersuchten Methoden der Eigenmodenidentifikation eine Bestimmung geeigneter Sensorpositionen erfolgen kann. Für den betrachteten Fall wären die geeigneten Positionen insbesondere 1-6.

5 Fazit und Ausblick

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sowohl mit der experimentellen Modalanalyse (Impulshammeruntersuchung) als auch mit der simulativen Modalanalyse (FEM-Simulation) relevante Eigenfrequenzen des untersuchten Getriebes identifiziert werden können, wobei die Abweichung der identifizierten Moden als nicht signifikant betrachtet werden kann. Der qualitative Vergleich der angeregten Amplituden an den betrachteten Positionen zeigt auf, dass die lokale Anregung des Impulshammers an der Welle des Getriebes einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dennoch lassen sich Übereinstimmungen in der resultierenden Amplitudenausprägung an den definierten Sensorpositionen, insbesondere am Getriebegehäuseoberteil identifizieren, wodurch Rückschlüsse auf die erwartbare Ausprägung im Betrieb gezogen werden können. Hieraus lässt sich vorab schließen, dass sowohl mittels der Impulshammeruntersuchung als auch mit der FEM-Simulation Positionen mit hohen Eigenfrequenzamplituden und somit geeignete Sensorpositionen abgeleitet werden können. Dies kann zu einer signifikanten Reduktion des nötigen Messaufwandes zur optimalen Sensorpositionierung beitragen.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen sollen verschiedene Anregungsstellen im Rahmen der Impulshammeruntersuchung analysiert werden, um den Einfluss der Anregungsstelle auf die resultierende Amplitudenausprägung zu bestimmen. Zudem sollen Beschleunigungsmessungen im unbeschädigten Getriebezustand sowie mit reproduzierbar geschädigten Wälzlagern durchgeführt und verglichen werden (Bauer et al. 2022b). Es soll ermittelt werden, ob die Ergebnisse der Modalanalysen mit den realen Beschleunigungsmessungen, respektive der qualitativen Anregung an den betrachteten Sensorpositionen vergleichbar sind, um somit auf Basis der Modalanalysen Vorhersagen zur optimalen Sensorpositionierung treffen zu können. Der geplante Versuchsaufbau ist in Abbildung 11 dargestellt.

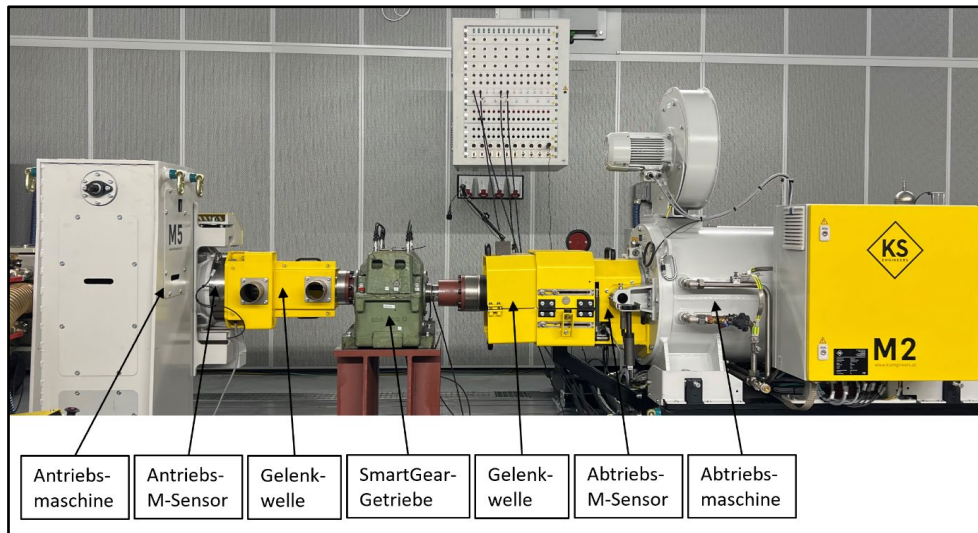


Abbildung 11: Versuchsaufbau der Getriebe am Vierachsprüfstand

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen, welche vom Institut für Antriebstechnik Aalen durchgeführt wurden, werden im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) vertretenen AiF Projekt GmbH als Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen: KK5044102 BA0 gefördert. Die Autoren danken hierfür. Weiterhin danken sie den kooperierenden Firmen, der Getriebebau Nossen GmbH & Co. KG, der PCE Deutschland GmbH und allen Beteiligten, die an diesem Projekt mitwirken.

Literaturverzeichnis

- Bauer et al. 2021a BAUER, MANUEL ; WAGNER, FABIAN ; KLEY, MARKUS: OPTIMIERUNG DER SENSORPOSITIONIERUNG BEI SCHWINGUNGSBASIERTER WÄZLAGERZUSTANDSÜBERWACHUNG UNTER EINBEZUG VON SYSTEMEIGENMODEN. IN: TM - TECHNISCHES MESSEN 88 (2021), NR. 11, S. 674–685
- Bauer et al. 2021b BAUER, M. ; PROKSCH, D. ; KOPETSCHKE, J. ; WAGNER, F. ; KLEY, M.: ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINER METHODE ZUR ERMITTLUNG DER MINIMALEN PERFORMANCEANFORDERUNGEN AN SENSOREN FÜR DIE SCHWINGUNGSBASIERTE ZUSTANDSÜBERWACHUNG. IN: SCHWINGUNGEN 2021 : 3. VDI-FACHTAGUNG : WÜRZBURG, 16. UND 17. NOVEMBER 2021. DÜSSELDORF : VDI VERLAG GMBH, 2021 (VDI-BERICHT, 2391), S. 89–104
- Bauer et al. 2022a BAUER, MANUEL ; BALARATNAM, NETHARASAN ; WEIDENAUER, JULIA ; WAGNER, FABIAN ; KLEY, MARKUS: COMPARISON OF ENVELOPE DEMODULATION METHODS IN THE ANALYSIS OF ROLLING BEARING DAMAGE. IN: JOURNAL OF VIBRATION AND CONTROL (2022A), 107754632211291
- Bauer et al. 2022b BAUER, MANUEL ; SCHLOTZ, MAXIMILIAN ; BLESSING, KAI ; WAGNER, FABIAN ; HOFELE, MARKUS ; RIEGEL, HARALD ; KLEY, MARKUS: GENERATION OF REPRODUCIBLE AND SCALABLE LOCAL DAMAGE TO ROLLING BEARINGS FOR THE DEVELOPMENT OF CONDITION MONITORING SYSTEMS THROUGH THE USE OF LASER TECHNOLOGY. IN: TM - TECHNISCHES MESSEN 89 (2022B), NR. 11, S. 810–821
- Bestle 2023 BESTLE, D.: EXPERIMENTELLE MODALANALYSE : MECHANIK-PRAKTIKUM. 2023

- Cao et al. 2018 CAO, XIAODONG ; TARIGAN, BRAMILA ; REMBE, CHRISTIAN ; SCHWARZE, HUBERT: VIBRATIONSBASIERENDE WHITE-ETCHING-CRACKS-DETEKTION AN WÄLZLAGERN. IN: TM - TECHNISCHES MESSEN 85 (2018), NR. 6, S. 443–453. URL [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1515/TEME-2017-0141](http://dx.doi.org/10.1515/TEME-2017-0141)
- Cao et al. 2017 CAO, XIAODONG ; TARIGAN, BRAMILA ; SCHWARZE, HUBERT ; REMBE, CHRISTIAN: SCHADENSERKENNUNG AN WÄLZLAGERN. IN: TM - TECHNISCHES MESSEN 84 (2017), S.1, S. 34–41. URL [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1515/TEME-2017-0029](http://dx.doi.org/10.1515/TEME-2017-0029)
- Chavan et al. 2013 CHAVAN, D., MAHALE, A., THAKUR, A.G.: MODAL ANALYSIS OF POWER TAKE OFF GEARBOX. IN: ENGINEERING (2013). URL [HTTPS://WWW.SEMANTICSCHOLAR.ORG/PAPER/MODAL-ANALYSIS-OF-POWER-TAKE-OFF-GEARBOX-CHAVAN-MAHALE/08c3bbe2911a4af92eeda1838058f4ee9524058](https://www.semanticscholar.org/paper/Modal-Analysis-of-Power-Take-Off-Gearbox-Chavan-Mahale/08c3bbe2911a4af92eeda1838058f4ee9524058)
- Clenn und Quartz 2023 CLENN, JOHN: QUARTZ : IMPULSE FORCE HAMMER; LOW FORCE RANGE. URL [HTTPS://KISTLER.CDN.CELUM.CLOUD/SAPCOMMERCE_DOWNLOAD_ORIGINAL/000-272E.PDF](https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCOMMERCE_DOWNLOAD_ORIGINAL/000-272E.PDF) – ÜBERPRÜFUNGSdatum 27.01.2023
- DIN ISO 13373-1 DIN ISO 13373-1:2002-07. JULI 2002. ZUSTANDSÜBERWACHUNG UND -DIAGNOSTIK VON MASCHINEN_ - SCHWINGUNGS-ZUSTANDSÜBERWACHUNG_ - TEIL_1: ALLGEMEINE ANLEITUNGEN
- Kuttner und Rohnen 2019 KUTTNER, THOMAS ; ROHNEN, ARMIN: PRAXIS DER SCHWINGUNGSMESSUNG : MESSTECHNIK UND SCHWINGUNGSANALYSE MIT MATLAB®. 2., ÜBERARBEITETE UND ERWEITERTE AUFLAGE. WIESBADEN : SPRINGER VIEWEG, 2019
- LMS SCADAS 2023 LMS SCADAS FAMILY. URL [HTTP://WWW.TECH-BEL.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/03/SCADAS-FAMILY-BROCHURE.PDF](http://www.tech-bel.com/wp-content/uploads/2017/03/SCADAS-FAMILY-BROCHURE.PDF) – ÜBERPRÜFUNGSdatum 27.01.2023
- MEIER 2003 MEIER, BORIS: BERECHNUNG VON EIGENFREQUENZEN MIT FELYX. 7. FEBRUAR 2003 (03-050)
- NIGADE 2012 NIGADE, R. V.: VIBRATION ANALYSIS OF GEARBOX TOP COVER. IN: ENGINEERING (2012). URL [HTTPS://WWW.SEMANTICSCHOLAR.ORG/PAPER/VIBRATION-ANALYSIS-OF-GEARBOX-TOP-COVER-NIGADE/EACFDD622E6C38F916DA26BE222717B2EF523FDA](https://www.semanticscholar.org/paper/Vibration-Analysis-of-Gearbox-Top-Cover-Nigade/EACFDD622E6C38F916DA26BE222717B2EF523FDA)
- NORMAN ET AL. 2012 NORMAN, P. E. ; JUNG, G. ; RATCLIFFE, C. ; CRANE, R. ; DAVIS, C.: DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED IMPACT HAMMER FOR MODAL ANALYSIS OF STRUCTURES. 2012-02-01 (33.0)
- NTI AUDIO 2023 NTI AUDIO: FAST FOURIER TRANSFORMATION FFT - GRUNDLAGEN. URL [HTTPS://WWW.NTI-AUDIO.COM/DE/SERVICE/WISSEN/FAST-FOURIER-TRANSFORMATION-FFT](https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/fast-fourier-transformation-fft) – ÜBERPRÜFUNGSdatum 27.01.2023
- R.M. NATAL 2006 R.M. NATAL, JORGE (HRSG.); TAVARES, JOÃO MANUEL R.S. (HRSG.): COMPUTATIONAL MODELLING OF OBJECTS REPRESENTED IN IMAGES. FUNDAMENTALS, METHODS AND APPLICATIONS : PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM COMPIMAGE 2006 (COIMBRA, PORTUGAL, 20-21 OCTOBER 2006). FIRST EDITION. BOCA RATON, FL : CRC PRESS, AN IMPRINT OF TAYLOR AND FRANCIS, 2007 (BALKEMA-PROCEEDINGS AND MONOGRAPHS IN ENGINEERING, WATER, AND EARTH SCIENCES)
- SCHAEFFLER 2019 SCHAEFFLER MONITORING SERVICES GMBH: CONDITION MONITORING PRAXIS : HANDBUCH ZUR SCHWINGUNGS-ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON MASCHINEN UND ANLAGEN. 1.AUFLAGE. MAINZ : VEREINIGTE FACHVERLAGE GMBH, 2019
- SEIDL ET AL. 2011 SEIDL, DAVID ; KOŠTIAL, PAVOL ; JANČIKOVÁ, ZORA ; RUŽIAK, IVAN ; RUSNÁKOVÁ, SOŇA ; FARKAŠOVÁ, MARTINA: MODAL ANALYSIS – MEASUREMENTS VERSUS FEM AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS SIMULATION, Bd. 188. IN: SNASEL, VACLAV; PLATOS, JAN; EL-QAWASMEH, EYAS (HRSG.): DIGITAL INFORMATION PROCESSING AND COMMUNICATIONS. BERLIN, HEIDELBERG : SPRINGER BERLIN HEIDELBERG, 2011 (COMMUNICATIONS IN COMPUTER AND INFORMATION SCIENCE), S. 170–175

- THOMPSON ET AL. 2017 THOMPSON, MARY KATHRYN ; THOMPSON, JOHN M.: SOLUTION. IN: THOMPSON, MARY KATHRYN; THOMPSON, JOHN M. (HRSG.): ANSYS MECHANICAL APDL FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS. OXFORD, CAMBRIDGE, MA : BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2017, S. 253–273
- TIRELLI 2004 TIRELLI, D.: MODAL ANALYSIS OF SMALL & MEDIUM STRUCTURES BY FAST IMPACT HAMMER TESTING METHOD 11 SUPPL 1 (2004)
- WÜNSCH ET AL. 1996 WÜNSCH, DIETER. ; KÄSLER, RICHARD ; DECKERS, JÖRG: PRAXISGERECHTES KONZEPT ZUR ERFASSUNG PRAXISGERECHTES KONZEPT ZUR ERFASSUNG UND DIAGNOSE VON VERZÄHNUNGS- UND WÄLZLAGERZUSTÄNDEN. IN: TAGUNGSBAND: AKIDA 1996, 1996, S. 383–397
- KOLERUS UND WASSERMANN 2014 KOLERUS, JOSEF ; WASSERMANN, JOHANN: ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON MASCHINEN : DAS LEHR- UND ARBEITSBUCH FÜR DEN PRAKTIKER. 6., AKTUALISIERTE AUFLAGE. RENNINGEN : EXPERT VERLAG, 2014 (EDITION EXPERTSOFT 79)
- YI ET AL. 2016 YI, PENGXING ; HUANG, PENG ; SHI, TIELIN: NUMERICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MODAL PROPERTIES FOR THE GEARBOX IN WIND TURBINE. IN: FRONTIERS OF MECHANICAL ENGINEERING 11 (2016), NR. 4, S. 388–402
- VEIT STEGER 2017 VEIT STEGER, M.: UNTERSUCHUNGEN ZUM SCHWINGUNGSVERHALTEN UND DER DARAUS RESULTIERENDEN BEANSPRUCHUNG VON SPANNKLEMMEN FÜR SCHIENENBEFESTIGUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON HOCHFREQUENTEN ANREGUNGEN, 2017
- ZAUNER UND CHRISTOPH 2010 ZAUNER, CHRISTOPH MICHAEL: ZUR MODELLIERUNG UND REDUKTION SCHOCKINDUZIERTER STRUKTURSCHWINGUNGEN UND DEREN NUTZUNG ZUR SCHADENSINDIKATION. MÜNCHEN, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR LEICHTBAU. DISSERTATION. 2010

Methode zur frühzeitigen marken- und segmentübergreifenden Auswahl der Füge-technik im Karosseriebau

Method for early cross brand and segment Selection of Joining Technology in Car Body Creation

Max Hofmann^{1,3}, Heiko Rudolf², Frank Mantwill³

¹Volkswagen AG, 38440 Wolfsburg

max.hofmann@volkswagen.de

²Hochschule Anhalt, Spanlose Fertigung, 06366 Köthen

heiko.rudolf@hs-anhalt.de

³Helmut-Schmidt-Universität, Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung, 22008 Hamburg

frank.mantwill@hsu-hh.de

Abstract: Für die Produktentwicklung im Karosseriebau wird eine Methode entwickelt, welche die Auswahl einer potenziellen Füge-technik in einer sehr frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses verbessert. Um dieses Ziel zu erreichen, muss eine Datenbasis geschaffen und aufbereitet, relevante Eigenschaften gewichtet und spezifische Parameter berücksichtigt werden. Bisherige Methoden fokussieren sich auf Normteile, Multi-Material-Verbindungen oder benötigen umfangreiche Informationen zu angrenzenden Baugruppen. Voraussetzung dafür ist eine marken- und segmentübergreifende Datenbasis der Füge-techniken zu erstellen. Deshalb wurden zunächst verschiedene Füge-techniken und Fügestellen untersucht. Darauf aufbauend wurde eine Methode entworfen, welche den allgemeinen Produktentwicklungsprozess durch die Auswahl der richtigen Füge-technik verkürzt. Bei der Umsetzung in einem marken- und segmentübergreifend Unterstützungsprogramm wurde die Methode weiter validiert, so dass relevante Anforderungen stärker bedacht werden und eine Anpassung der Bewertung an spezifische Anlagen und Prozesse möglich ist. Schlussendlich kann der Prozess auf andere Unternehmen und Produkte mit einer Modellvielfalt übertragen werden.

Keywords: Rechnergestützte Produktentwicklung, Füge-technik, Karosseriebau

Abstract:

For product development in car body creation, a method is designed that improves the selection of a potential joining technology at a very early stage of the product development process. In order to achieve this goal, a database must be created and processed, relevant properties weighted and specific parameters taken into account. Previous methods focus on standard parts, multi-material connections or require extensive information on adjacent assemblies. The prerequisite for this is to create a cross-brand and cross-segment database on joining technologies. For this purpose, various joining techniques and joints were first investigated. Based on this, a method was designed that shortens the general product development process by selecting the right joining technology. During implementation in a cross-brand and cross-segment support program, the method was further validated so that relevant requirements are given greater consideration and the assessment can be adapted to specific technologies and processes. Finally, the process can be transferred to other companies and products with a variety of models.

Keywords: Computer-aided product development, joining technology, car body creation

1 Motivation

Die Bereiche Entwicklung und Produktion nehmen mit unterschiedlicher Zielausrichtung Einfluss auf den Karosseriebau. Die Entwicklung entwirft kundenorientierte Karosserien, welche eine immer größere Anzahl an Anforderungen und Funktionen erfüllen sollen, um durch die Individualität der Produkte neue Kunden zu gewinnen (Wemhöner 2005). Die Produktion besitzt das Ziel, diese Vielzahl an Karosserievarianten wirtschaftlich zu fertigen. Daher werden auf den Produktionslinien Strategien wie die Nachfolger-, Produktmix-, und Volumenflexibilität verfolgt. Hierdurch wird eine Wandlungsfähigkeit der Fertigung gewährleistet (Wemhöner 2005). Die Produktion fordert im Zuge dessen eine Standardisierung von Bauteilen, Werkzeugen und Fertigungsanlagen. Auf Grundlage der daraus resultierenden Strategien kann sowohl die Entwicklung als auch die Produktion in unterschiedlicher Art und Weise bei ihrer Tätigkeit im Produktentstehungsprozess starken Einfluss nehmen.

Eine Schlüsselrolle übernimmt die Fügetechnik im Karosseriebau, da diese die größte Wertschöpfung innerhalb der Produktion schafft. Die Auswahl der Fügetechnik unterliegt dabei ebenfalls den Zielen der Bereiche Entwicklung und Produktion, was in der letzten Dekade zu immer größeren Komplexitäten führte. Signifikante Beispiele hierfür sind die Vielzahl von Fügetechniken und Werkstoffen im Karosseriebau des Audi A8 (Ostermann 2014) und des Volkswagen Touareg aber auch die hohe Zahl von Fügetechniken bei Stahlkarosserien wie dem Volkswagen Passat und Polo. Des Weiteren entstehen im Zuge der E-Mobilität neue Produkte und Bauteile, gepaart mit neuen Fertigungslinien oder ganzen Fabrikhallen, wie zum Beispiel für den Volkswagen ID.3 in Zwickau.

Im Forschungsgebiet der rechnergestützten Produktentwicklung werden Methoden entworfen, welche den Produktentstehungsprozess im Sinne moderner Strategien wie dem Simultaneous Engineering und dem Frontloading verbessern. Dieser Beitrag soll die Bedeutung, ausgehend von der unternehmensspezifischen Datenbasis, der frühzeitigen Auswahl einer geeigneten Fügetechnik im Rahmen der Produktentwicklung postulieren.

2 Stand der Technik

2.1 Methoden der Produktentwicklung

Der Produktentstehungsprozess umfasst nach der Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019) in der Automobilindustrie die Produktplanung, die Produktentwicklung und die Produktion. Demnach sollte eine Produktentwicklung einer gewissen Struktur folgen, mit dem Ziel, einen bestehenden Ausgangszustand zu einem neuen und besseren Endzustand zu wandeln. Die Aktivitäten bei der Produktentwicklung gliedern sich nach VDI 2221 Blatt 1 (2019) in acht Phasen, zwischen diesen kann iteriert werden. Die Produktentwicklung wird initiiert durch ein Problem (Phase 1). Danach folgt eine Situationsanalyse (Phase 2) und eine Zielformulierung (Phase 3). Im Anschluss wird zwischen der Synthese von Lösungen (Phase 4) und deren Analyse (Phase 5) iteriert. Darauf aufbauend wird eine Bewertung der Lösungsvorschläge (Phase 6) durchgeführt und auf dieser Grundlage wird die Entscheidung (Phase 7) getroffen, welche zur Lösung (Phase 8) des Problems führt.

Im Beitrag von Wartzack (2013) werden die Synthese und die Analyse von Lösungsprinzipien in einfache (C), aufwendige (B) und komplexe (A) Bewertungsverfahren unterteilt. Einfache Bewertungsverfahren (C) sind die Argumentenbilanz, die Punktebewertung und der paarweise Vergleich. Zu den aufwendigen Bewertungsverfahren (B) zählen beispielsweise die Nutzwertanalyse und die technisch-wirtschaftliche Bewertung sowie das Rangfolgeverfahren bzw. die Präferenzmatrix. Weitere nützliche Methoden sind beispielsweise Beobachtung, Experimente oder Interviews. Diese können unstrukturiert, teilstrukturiert oder standardisiert umgesetzt werden. Das teilstrukturierte Interview ist nach Lucko (2011) zu bevorzugen, weil die Vorteile der beiden anderen Varianten vereint werden. Ein Leitfaden für das Gespräch liegt vor, die Fragen sind offen formuliert, unerwartete

Antworten sind möglich und themenspezifische Fragen können während des Gespräches an den Interviewten gestellt werden.

2.2 Einteilung der Fügeverfahren im Karosseriebau

Die Fügeverfahren lassen sich nach der Norm DIN 8593 (2022) in acht Gruppen einteilen. Die Fachliteratur unterscheidet darüber hinaus noch weitere Kriterien, wie zum Beispiel nach der Schlussart, der Wirkenergie, der Zugänglichkeit und der Lösbarkeit.

Die Schlussarten der Fügeverfahren lassen sich nach Roth (1996) in drei weitere Unterarten teilen. Der Stoffschluss ist eine feste und nicht demontierbare Verbindung, welche Relativbewegungen der Bauteile in allen Richtungen unterbindet. Beispielhaft für den Stoffschluss sind Kleb-, Schweiß- und Lötverbindungen. Bei formschlüssigen Verbindungen wird durch ein konstruktives Detail die Relativbewegung der gegenüberliegenden Flächen in mindestens eine Richtung eingeschränkt. Eine Demontage wird oft durch nicht reversible Umformprozesse verhindert. Weiterhin ist eine Anwendung einer Fügeverfahren abhängig von der Zugänglichkeit der Fügewerkzeuge. Vor allem mechanische Fügeverfahren erfordern oft eine zweiseitige oder beidseitige Zugänglichkeit, wie beispielsweise klassische Schraub- oder Nietverbindungen. Dem entgegen stehen spezielle Anwendungen wie Blindnieten und Fließbohrschrauben, die auch bei einseitiger Zugänglichkeit ausgeführt werden. Letzteres benötigt aber ein starkes Gegenlager, wie es beim Befestigen von Blechen an Hohlprofilen gegeben ist. Die Fügestelle lässt sich nach lösbar und unlösbar einteilen. Zur ersten Gruppe gehören Fügeverfahren wie Schraub-, Schnapp- und Spannverbindungen, bei denen die Bauteile beliebig wieder getrennt werden können. Hingegen werden unlösbare Fügeverfahren wie Schweiß-, Press- oder Nietverbindungen für einen dauerhaften Verbund von Bauteilen genutzt (Koller 1991).

Die Auswertung der Fachliteratur lässt Überschneidungen innerhalb der Gruppen zu. Mechanische Fügeverfahren können beispielsweise eine lösbare oder unlösbare Verbindung zwischen Bauteilen herstellen und die Ausführung der Fügeoperation erfordert eine einseitige oder zweiseitige Zugänglichkeit. Hingegen können thermische Fügeverfahren nur unlösbare Verbindungen erzeugen, wobei auch hier die Zugänglichkeit einseitig oder zweiseitig sein kann.

2.3 Weitere rechnergestützte Konzepte zur Auswahl der Fügeverfahren

Die Konstruktion der Karosserie hat einen bedeutenden Einfluss im Karosserieentstehungsprozess, da diese einen großen Anteil von etwa 40% am Gesamtgewicht eines Fahrzeuges besitzt (Friedrich 2013). Das Ziel der Automobilindustrie besteht darin, den Produktentstehungsprozess zu verkürzen und nach feststehender Fachmeinung müssen folglich Entscheidungen möglichst frühzeitig getroffen werden (Schulz 2014).

Im Beitrag von Schulte (2013) wird eine Assistenz zur Unterstützung des Normteilmanagements vorgestellt, wodurch die Auswahl der Fügeverfahren bereits auf die Normteile begrenzt ist. Über einen Marker im CAD-Modell wird zunächst die Position bestimmt. Hierdurch erhält der Produktentwicklungsprozess die entscheidende Richtung bei der Auswahl des idealen Normteils. Weiterführend werden so die gesicherten Daten von der Konzeptentwicklung in die Serienentwicklung übertragen. Diese Normteilassistenz erfolgt für Schraubenverbindungen mit entsprechender Schraubenauswahl und Parameterübernahme oder -festlegung. Des Weiteren wird das Fahrzeug in Bereiche unterteilt und die Normteile werden diesen Bereichen zugeordnet. Die Absicherung der Montage erfolgt durch eine Zugänglichkeitsuntersuchung mittels Schraubengeometrie.

Einen Vergleich möglicher Fügeverfahren für einen spezifischen Anwendungsfall in Multimaterialsystemen wird im Beitrag von Prüß et al. (2010) vorgestellt. Der Ansatz systematisiert den Auswahlprozess mithilfe von vier Schritten. Im ersten Schritt wird auf einen Konstruktionskatalog für Fügeverfahren zurückgegriffen. Der zweite Schritt sorgt für die Eingrenzung der Fügeverfahren durch grundlegende Fügestelleneigenschaften. Der dritte Schritt besteht aus den Anforderungen an die Fügestelle. Im vierten Schritt erfolgt der Bewertungsprozess, welcher die Merkmale verknüpft und eine Punktzahl ausgibt. Die Kombination von Fügeverfahren ist dabei möglich. Das

Anwendungsbeispiel zeigt eine Bewertungsmatrix in einer Tabellenkalkulation. Ein abgeschlossenes Unterstützungsprogramm, welches dem Anwender übergeben werden kann, wird im Beitrag nicht thematisiert. Darüber hinaus ist die Anwendung eher für Spezialfälle in Multimaterialsysteme konzipiert.

Choudry (2019) nutzt für die Auswahl der Füge­technik drei Dimensionen, welche zusammen gefasst werden in eine monetäre Größe der „Ökonomie“ und in zwei nicht-monetäre Größen der „Ökologie“ sowie der „Technologie“. Die beschriebene Methode besteht auch hier aus vier Schritten. Erster Schritt ist das Screening-Modell, dieses grenzt mögliche Füge­technologien ein. Der zweite Schritt ist das Bewertungsmodell, welches die spezifische Füge­stelle betrachtet. Im dritten Schritt, dem Optimierungs-Modell, werden die restlichen Füge­stellen innerhalb der Baugruppe sowie die Prozessplanung betrachtet. Der vierte Schritt, das Potenzial-Modell, analysiert, welche Verbesserungen die Anpassung von Konstruktion oder Werkstoffen bietet. Informationen zu benachbarten Bauteilen, Füge­techniken sowie Werkstoffen sollten für diese Methode vorliegen.

3 Definition des Forschungsziels

Das allgemeine Vorgehen bei der Produktentwicklung lässt sich auf die Auswahl der passenden Füge­technik im Produktentstehungsprozess der Karosserie eines Automobils anwenden. Im Zuge der Entwicklung neuer Werkstoffe, Bauteile und Produkte wurde eine Vielzahl von Füge­techniken für den Serieneinsatz qualifiziert. Um den Entwickler bei der Auswahl einer geeigneten Füge­technik zu unterstützen, sind bereits Unterstützungsprogramme und Methoden entwickelt worden. Normteile können im CAD-System aus einer Liste ausgewählt und Bereichen in einem Fahrzeug zugeordnet werden. Material- und Parametertabellen geben Aufschluss über bereits erprobte Füge­stellen im Multi-Material-Mix. Ein anderes Unterstützungstool veranschaulicht die ökologischen, ökonomischen und technischen Einflüsse einer Änderung der Füge­folge oder -technik für einen bestehenden Karosserieentwurf. Aufgrund der Komplexität dieses Themenfeldes sind jedoch noch nicht alle Anforderungen erfüllt.

Das Ziel des vorliegenden Beitrages besteht darin, bereits in der Konzeptentwicklung die Füge­technik auszuwählen und/oder Alternativen einzugrenzen. Eine besondere Herausforderung stellen sich dabei dem Entwickler, wenn keine Produktaufwertung, sondern ein neues Fahrzeug entworfen wird. Dieses kann auf bestehenden Linien oder einer neuen Linie gefertigt werden. Trotz der unzureichenden Datenlage in der Konzeptentwicklung soll mit der Auswahl der Füge­technik ebenfalls der Einfluss dieser Entscheidung auf die Eigenschaften der Füge­stelle beachtet werden. Dazu gehören bestehende Informationen innerhalb des Unternehmens zu nutzen, wie zum Beispiel bewährte sowie bereits in anderen Fahrzeugprojekten eingesetzte Füge­techniken ebenso wie innovative Prozessführungen. Dadurch ergeben sich die folgenden Fragestellungen: Wie kann eine derartige Datenbasis geschaffen werden? Wie gelingt eine Gewichtung der Eigenschaften der potenziellen Füge­techniken? Wie können Füge­techniken sowohl allgemein als auch mit dem Wissen zu spezifischen Parametern verglichen werden? Um diese Fragen zu beantworten, werden eine Methode zur Erstellung der Datenbasis und eine Methode zur Auswahl der Füge­technik beschrieben. Im Anschluss wird die Methode zur Auswahl der Füge­technik mittels eines Unterstützungsprogrammes validiert.

4 Aufbereitung der Datenbasis

Die Aufbereitung der Datenbasis zur marken- und segmentübergreifenden Füge­technik erfolgt nach Bild 1. Das Vorgehen im Modell teilt sich in zwei Untersuchungsbereiche. Der Erste, die „Analyse der Füge­techniken“, untersucht den Anteil einer Füge­technik innerhalb einzelner Fahrzeugprojekte. Neben der dominierenden selbsttragenden Karosserie aus Stahl werden ebenso Multi-Material-Bauweisen oder der Aluminium-Space-Frame betrachtet. Zu den zehn am häufigsten eingesetzten Füge­technikgruppen werden Eigenschafts Steckbriefe auf der Grundlage von Normen, Regelwerken und wissenschaftlichen Beiträgen sowie Fachliteratur zusammengestellt. Zur Auswahl zählen das

Widerstandspunktschweißen, das Metallschutzgasschweißen, das Laserstrahlschweißen und -löten, das Nieten, das Clinchen, das Schrauben sowie das Clipsen.

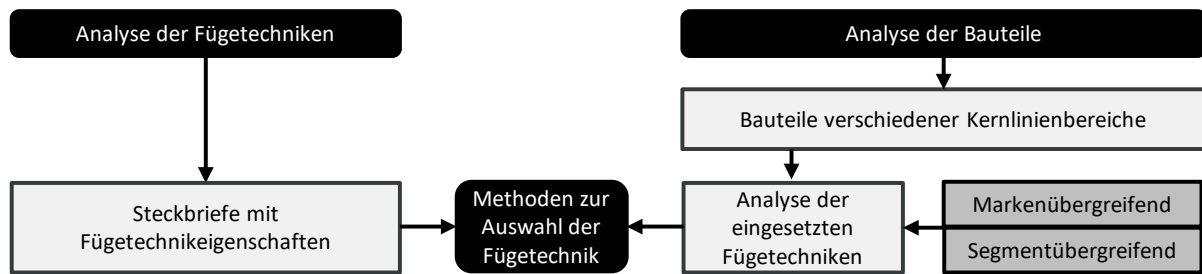


Bild 1: Schematische Darstellung zum Vorgehen bei der Aufbereitung der Datenbasis

Der zweite Untersuchungsbereich in Bild 1, die „Analyse der Bauteile“, wertet die Fügetechniken aus, welche an verschiedenen Bauteilen innerhalb der Kernlinie eines Fahrzeuges eingesetzt werden und nicht aneinandergrenzen. Dieses Vorgehen erfolgt sowohl marken- als auch segmentübergreifend innerhalb des Volkswagen Konzerns, siehe dazu Bild 2. Ausgehend vom Beispiel Volkswagen Golf 8 sind Synergien zwischen Fahrzeugen der im gleichen Segment A über die Marken Audi und Seat in den Modellen A3 und Leon zu erwarten. Innerhalb der Marke Volkswagen sind Synergieeffekte zwischen den einzelnen Segmenten wie zum Beispiel dem Volkswagen Passat im B Segment und dem Volkswagen Polo im A0 Segment vorhanden. Als Fügestelle wird die Verbindung zwischen Seitenteil und Dichtkanal entsprechend Bild 2 betrachtet.

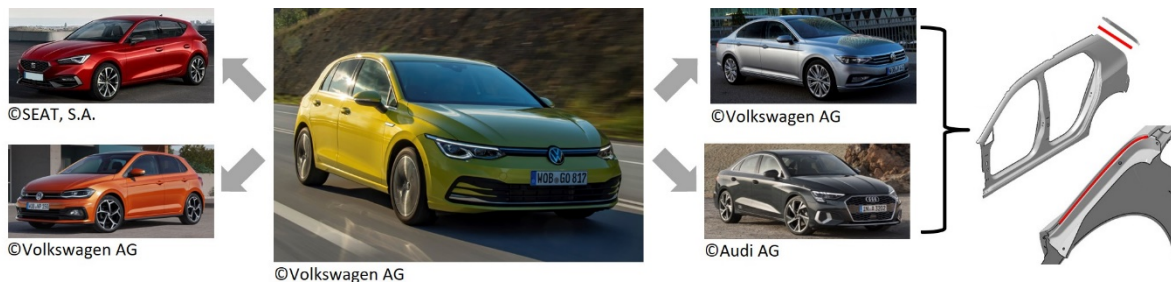


Bild 2: Schematische Darstellung zum marken- und segmentübergreifenden Vergleich der Fügestelle am Beispiel Seitenteil-Dichtkanal

Die Informationen zur Fügestelle Seitenteil-Dichtkanal in Tabelle 1 sind den Fertigungsunterlagen des Produktdatenmanagement-Systems (PDM-System) entnommen. Zu den Informationen gehören Fügetechnik, Werk, Material-Dicken-Kombination (MDK) und Länge der Fügestelle.

Tabelle 1: Marken- und segmentübergreifender Vergleich der Fügetechniken am Beispiel Seitenteil-Dichtkanal

Eigenschaft	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4
Fügetechnik	Laserstrahllöten	MIG-Löten	MIG-Löten (CMT)	Plasmalöten
Werk	Werk 1	Werk 2	Werk 3	Werk 4
MDK [mm]	CR5(0,7)/CR3(0,7)	CR5(0,7)/CR3(0,7)	CR5(0,7)/CR3(0,7)	CR5(0,75)/CR3(0,75)
Länge	470 mm	510 mm	670 mm	370 mm

Auf der Grundlage dieses Beispiels Tabelle 1 ist zu erkennen, dass vier Fügetechniken angewendet werden, welche die gestellten Anforderungen (Konstruktion und Produktion) erfüllen. Die vier Fahrzeuge werden in unterschiedlichen Werken gefertigt. Für eine vergleichbare Fügestelle werden vier verschiedene Fügetechniken eingesetzt. Die Material-Dicken-Kombination ist bezogen auf die Werkstoffe gleich aber die Dicken variieren geringfügig. Hingegen unterscheiden sich die Längen der Fügstellen aufgrund der Geometrie der Fahrzeugkarosserien.

Die entscheidende Frage, warum unterschiedliche Fügeverfahren eingesetzt werden, lässt sich aus diesen Daten nicht klar ermitteln. Daher werden zusätzlich teilstrukturierte Experteninterviews mit den Konstrukteuren der Bauteile geführt. Die Kernaussage: Der hauptsächliche Grund für die Auswahl der Fügeverfahren bestehe in diesem Beispiel in der Verfügbarkeit der Anlagentechnik, aber auch in einer besseren Oberflächenqualität der Naht beim Laserstrahl- und Plasmalöten. Die angewendeten Fügeverfahren werden alle unlösbar und bei einseitiger Zugänglichkeit mithilfe thermischer Wirkenergie ausgeführt. Die Fügestellen zählen zu den stoffschlüssigen Verbindungen und die Fügeverfahren lassen sich nach diesen Kriterien alle einer Technologiegruppe, unlösbar-einseitig zuordnen. Besonderheiten in deren Anwendung sind von den spezifischen Anforderungen wie Wärmebeeinflussung, Korrosionseigenschaften, Kosten des Fügeprozesses, der vorhanden Anlagentechnik in den Werken oder der Einteilung nach Löt- und Schweißverfahren abhängig.

5 Methode zur Auswahl der Fügeverfahren

5.1 Schematischer Entwurf der Methode

Auf der Grundlage der in Kapitel 4 beschriebenen Datenbasis sowie teilstrukturierter Interviews entsteht die Methode zur frühzeitigen Auswahl der Fügeverfahren, welche schematisch in Bild 3 dargestellt ist. Dieses Konzept wird mithilfe eines Unterstützungsprogramms chronologisch umgesetzt. Die Zulassung oder der Ausschluss von Fügegruppen erfolgt nach einem Entscheidungsbaum. Dieser basiert auf Steckbriefen zu den Fügeverfahren, die wiederum Eigenschaften der Fügestellen innehaben. Beispiele für die Informationen aus den Steckbriefen sind in Kapitel 6 beschrieben. Eine Matrix ermöglicht einen paarweisen Vergleich mit vorgegebenen Eigenschaften. Für die bewährten Lösungsprinzipien besteht nun die Möglichkeit für den Anwender, die Bewertung der Eigenschaften mittels Punktevergabe durch sein Expertenwissen anzupassen. Dadurch wird die zweite Frage beantwortet. Als Ergebnis erfolgt ein zu priorisierender Fügeverfahrensentwurf.

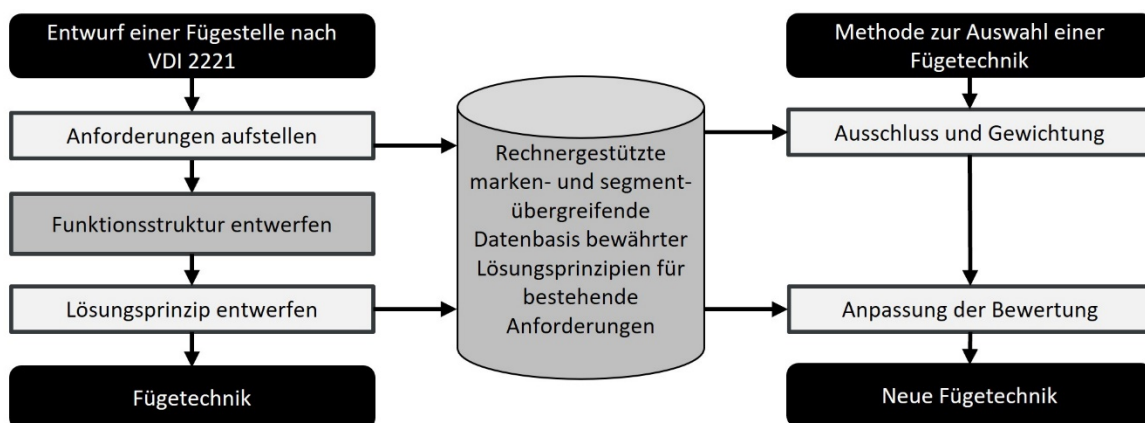


Bild 3: Schematische Darstellung der Methode im Vergleich zum Vorgehen nach VDI 2221 Blatt 1 (2019)

5.2 Ausschluss und Vergleich am Beispiel der Fügestelle Seitenteil-Dichtkanal

Zunächst sollte eine Auswahl der Fügeverfahrengruppen nach dem Ausschlussprinzip erfolgen, aber bezugnehmend auf Kapitel 2 kann eine Konterkarierung der Einteilung der Fügeverfahren vorkommen. Die Analyse aus dem Kapitel 4 hat gezeigt, dass die Lösbarkeit einer Fügestelle nur nach zwei Varianten klassifiziert wird. Dabei werden für die Herstellung lösbarer Fügestellen oft mechanische Wirkenergien genutzt. Bei unlösbaren Fügestellen lassen sich durch die Einteilung nach einseitiger und zweiseitiger Zugänglichkeit weitere Fügeverfahrengruppen klassifizieren. Die Fügeverfahrengruppen unlösbar-einseitig und unlösbar-zweiseitig beinhalten Fügeverfahren, welche mechanische, thermische oder chemische

Wirkenergien nutzen. Eine schematische Einteilung anhand des Ausschlussprinzips ist in Bild 4 zu sehen. Bekannte Einteilungen der Fügeverfahren werden kombiniert und führen zu unternehmensspezifischen Fügeverfahrensgruppen, welche bereits als alternative Fügeverfahren ihre Anwendung finden.



Bild 4: Schematische Darstellung zur Auswahl der Eigenschaften einer Fügeverfahrensgruppe nach dem Ausschlussprinzip

Zur Durchführung eines Vergleiches zwischen potenziellen Fügeverfahren mit einer Serienfreigabe werden zunächst die Eigenschaften mittels eines binären Vergleiches gewichtet. Die Gewichtung der Eigenschaften in Prozent ist in der letzten Spalte der Tabelle von Bild 5 doppelt gerahmt. Eigenschaft 1 wird immer gegenüber Eigenschaft 2 für die entsprechende Fügestelle bewertet. Die Eingabe der Bewertung erfolgt in den Feldern mit weißem Hintergrund. Ist Eigenschaft 1 wichtiger, dann wird das entsprechende Feld mit dem Wert 1 befüllt. Wenn die Eigenschaft 2 wichtiger ist, dann wird das Feld durch eine -1 befüllt. Der Wert 0 steht dabei für die Gleichwertigkeit von Eigenschaft 1 und Eigenschaft 2. Am Beispiel Seitenteil-Dichtkanal ist für eine ideale Fügestelle eine kleine Wärmeeinflusszone (Eigenschaft 2) wichtiger, als die Korrosion (Eigenschaft 1). Daher wird das Feld mit dem Wert -1 befüllt. Hingegen ist die Nutzung einer vorhandenen Anlagentechnik (Eigenschaft 1) wichtiger, als die Korrosion (Eigenschaft 2), da das Fahrzeug auf einer bestehenden Linie im Werk 1 gefertigt werden soll.

Eigen- schaft 1	Eigen- schaft 2	Wärmeein- flusszone	Korrosion	Kosten	Vorhandene Technik	Löten / Schweißen	Σ	Normieren	Gewichtung in [%]
Wärmeeinflusszone			1	1	1	0	3	6	40
Korrosion		-1		1	-1	1	0	3	20
Kosten		-1	-1		-1	1	-2	1	7
Vorhandene Technik		-1	1	1		1	2	5	33
Löten / Schweißen		0	-1	-1	-1		-3	0	0
Σ								15	100

Bild 5: Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Eigenschaften am Beispiel Seitenteil-Dichtkanal

5.3 Bewertung am Beispiel der Fügestelle Seitenteil-Dichtkanal

Die Gewichtungen der Eigenschaften werden aus dem paarweisen Vergleich selbstständig übernommen und sind spezifisch für die Fügeverfahrensgruppe unlösbar-einseitig. Von den bisher zehn Fügeverfahren mit detaillierten Steckbriefen gehören das Laserstrahllöten, das MIG-Löten, das MSG-Schweißen und das Laserstrahlschweißen zu der Fügeverfahrensgruppe unlösbar-einseitig. Diese werden für die Bewertung in Bild 6 gegenübergestellt. Die vier Fügeverfahren beruhen alle auf einer thermischen Wirkenergie. Die Bewertung der Eigenschaften erfolgt nach VDI 2225 Blatt 3 (1998) mit einer Skala von 0 bis 4 in ganzen Zahlen. Diese Zahlen entsprechen Bewertungen von „nicht tragbar“, über „noch tragbar“, „befriedigend“ und „gut“ bis „sehr gut“. Die Eingabe der Bewertung erfolgt wie bereits zuvor in den Feldern mit weißem Hintergrund in Bild 6. Die Felder mit hellgrauem Hintergrund enthalten in der letzten Spalte Informationen aus den Steckbriefen mit entsprechender Quellenangabe. Der Wärmeeinfluss einer Fügeverfahrensgruppe wird durch die Wärmeeinflusszone definiert. Als

Quelle dient das Merkblatt DVS 2938 (2009). Um eine Gesamtbewertung zu erhalten, werden die Informationen entsprechend der beschriebenen Skala in Punktbewertungen übertragen und mit der Gewichtung multipliziert. Diese ist für die jeweilige Füge­technik in der letzten Zeile aufsummiert und doppelt gerahmt. Die Füge­technik mit der höchsten Bewertung ist zu priorisieren. Die Bewertungen mehrerer Informationen erfolgen mittels Durchschnittswert der Einzelbewertungen. Ein Beispiel hierfür sind die Kosten, welche durch die Bewertung der Prozesszeit und der Investitionskosten bestimmt werden.

Eigenschaften	Füge- technik	Gewich- tung	Laserstrahl- löten	MIG-Löten	MSG- Schweißen	Laserstrahl- schweißen	Quelle
Wärmeeinfluss		0,40	4	2	1	4	
Wärmeeinflusszone			Sehr gering	Groß	Sehr groß	Sehr gering	DVS 2938
Korrosion		0,20	4	4	2	2	
Schutzschicht			Ja	Ja	Nein	Nein	DVS 2938
Kosten		0,07	2,5	3	3	2,5	
Prozesszeit			0,02 s/mm	0,12 s/mm	0,12 s/mm	0,24 s/mm	Reale Versuche
			4	2	2	4	
Investitionskosten			1	4	4	1	Fachbücher
Vorhandene Technik			4	1	1	1	
Standort			Werk 1	Werk 2	Werk 3	Werk 4	PDM-System
Löten / Schweißen		0,00	1	1	1	1	
Gesamtbewertung			3,90	2,14	1,34	2,51	

Bild 6: Bewertung der Eigenschaften am Beispiel Seitenteil-Dichtkanal

6 Rechnergestützte Umsetzung der Methode am Beispiel Dach-Nullfuge

6.1 Anforderungen an die Füge­stelle

Eine Designstudie ergab, dass ein Dach ohne die PVC-Abdeckleiste der Füge­stelle, aber mit einer nicht sichtbaren Füge­stelle den Designanforderungen der Kundenwünsche entsprach. Um den Kundenanforderungen gerecht zu werden, wurde von der Entwicklung das Ersetzen dieser Abdeckleiste gefordert. Deshalb musste die bestehende Überlappnaht, welche durch konventionelles Widerstandspunktschweißen gefügt wurde, durch eine neue konstruktive Lösung ersetzt werden. Diese besteht aus einer Stirn-Bördel-Naht entsprechend der Skizzen in Bild 7. Für die Auswahl einer vorhandenen Füge­technik mit Freigabe für die Serienfertigung sollen nun grundlegende Anforderungen analysiert werden. Die Stirn-Bördel-Naht kann mit einem Verfahren der Füge­technikgruppe unlösbar-einseitig nach dem thermischen Wirkprinzip gefügt werden. Da beim Löten in Abhängigkeit vom gewählten Zusatzwerkstoff deutlich niedrigere Temperaturen vorherrschen, wird weniger Wärme in die Füge­stelle eingebracht, als beim Schweißen. Eine geringere Wärmeeinbringung führt zu weniger Verzug der Bleche und ermöglicht Mischverbindungen. Die Füge­technik sollte geringe Taktzeiten erfüllen können, da die Füge­stelle zwischen den Bauteilen sehr lang ist. Ein Zusatzwerkstoff zum Ausgleich von Toleranzen und einer „schönen“ Naht ist vorteilhaft. Durch die Anwendung im Außenbereich sollte die Füge­stelle korrosionsbeständig sein.

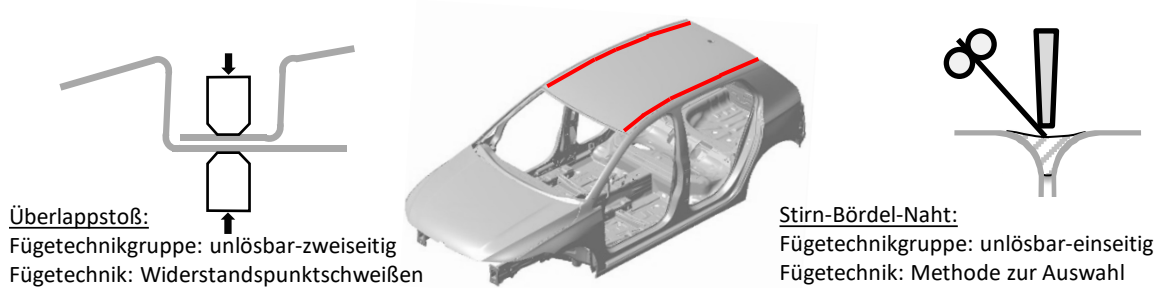


Bild 7: Schematische Darstellung zur Fügestelle Dach-Nullfuge

6.2 Auswahl einer Fügetechnik für eine unlösbare Fügestelle mit einseitiger Zugänglichkeit

Die unternehmensspezifische Einteilung in Fügetechnikgruppen nach dem Ausschlussprinzip erfolgt in der ersten Ebene des Unterstützungsprogramms entsprechend Bild 4. Die drei Fügetechnikgruppen sind „Lösbar“, „Unlösbar-Einseitig“ und „Unlösbar-Zweiseitig“. Die Fügetechniken innerhalb dieser Gruppen lassen sich dennoch nach ihrer Wirkenergie und der DIN 8593 (2022) einteilen. Zur ersten Fügetechnikgruppe zählen Untergruppen wie das Clipsen und Schrauben. Die zweite Fügetechnikgruppe beinhaltet das Laserstrahllöten, MIG-Löten, Laserstrahlschweißen und MSG-Schweißen. Die dritte Fügetechnikgruppe teilt sich ebenfalls in mechanisch, thermisch und chemisch nach dem jeweiligen Wirkprinzip, wobei das Nieten, Clinchen, Widerstandspunktschweißen und deren Optimierungen zum Buckel-/ Micropunktschweißen benannt sind. Die Fügetechniken sind beispielhaft aus der Analyse der eingesetzten Fügetechniken ausgewählt. Weitere Fügetechniken, welche sich durch Prozessoptimierung oder Parameteranpassung ergeben können, gehören ebenfalls dazu. Im Anschluss an die Auswahl der Fügetechnikgruppen erfolgt in der zweiten Ebene des Unterstützungsprogramms der Vergleich der Eigenschaften, siehe dazu Bild 8. In Kapitel 5 wurde der paarweise Vergleich an einem Beispiel erläutert, was nun benutzerfreundlich in eine Ja/Nein-Entscheidung zwischen zwei Eigenschaften überführt ist.

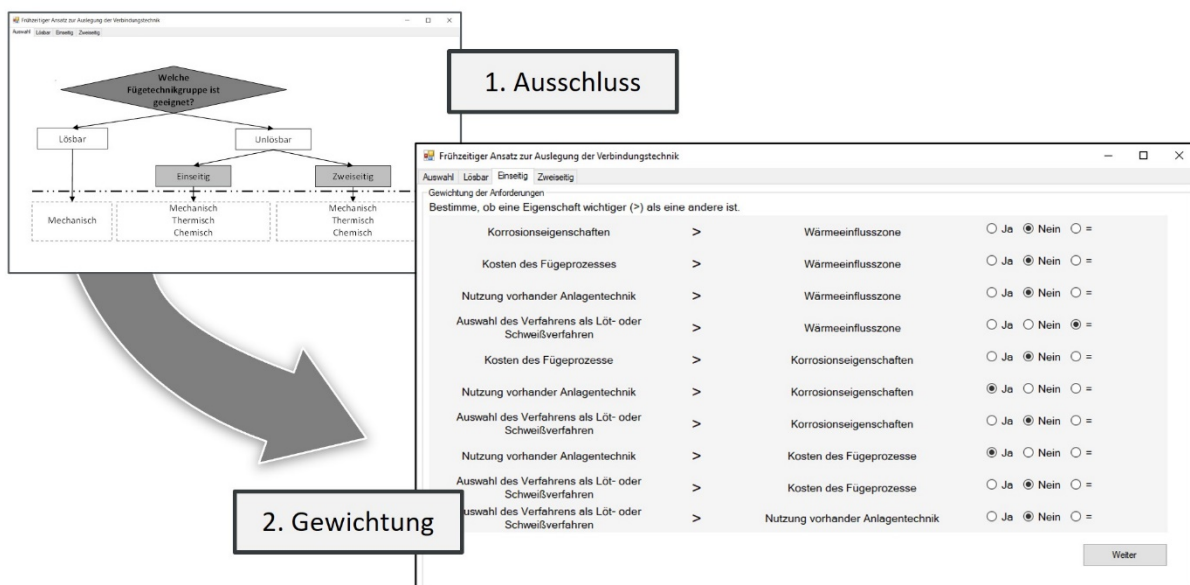


Bild 8: Ausschluss (Ebene eins) und Vergleich (Ebene zwei) im Unterstützungsprogramm

Die erste Zeile im paarweisen Vergleich von Ebene zwei lässt den Anwender darüber abstimmen, ob die „Korrosionseigenschaften“ wichtiger als die „Wärmeeinflusszone“ einer Fügestelle sind. Diese Abfrage wird mit „Nein“ beantwortet. Für die Fügestelle zwischen zwei großen flächigen Bauteilen in

der Außenhaut einer Karosserie sollte die eingebrachte Wärme so gering wie möglich sein, woraus schlussfolgernd eine geringere Wärmeeinflusszone entsteht. Der paarweise Vergleich entscheidet immer nur zwischen zwei Eigenschaften. Die Eigenschaft „Nutzung vorhandener Anlagentechnik“ im jeweiligen Werk wird mit den „Korrosionseigenschaften“ durch eine Ja-/Nein-Entscheidung verglichen. Die Fragestellung lautet: „Ist die Nutzung der vorhandenen Anlagentechnik im Werk 1 wichtiger zu bewerten als die Korrosionseigenschaften der Fügestelle?“ Diese wird entsprechend mit „Ja“ beantwortet, wenn eine bestehende Produktionslinie genutzt werden soll. Eine Voraussetzung ist natürlich, dass ein Mindeststandard an Korrosionsbeständigkeit erreicht wird. Am Ende der Abfrage wird durch das Klicken auf den „Weiter“-Button die Gewichtung der Eigenschaften auf der Grundlage des paarweisen Vergleiches selbstständig berechnet. Dieses Vorgehen ermöglicht eine objektive Gewichtung der Eigenschaften für die Fügestelle.

In Bild 9 ist die dritten Ebene des Unterstützungsprogrammes mit der Bewertung von vier Füge-techniken, welche innerhalb des Unternehmens alternativ eingesetzt werden, zusehen. Die Punktebewertung der Eigenschaften erfolgt nach VDI 2225 Blatt 3 (1998) entsprechend dem Beispiel Seitenteil-Dichtkanal in Kapitel 5.

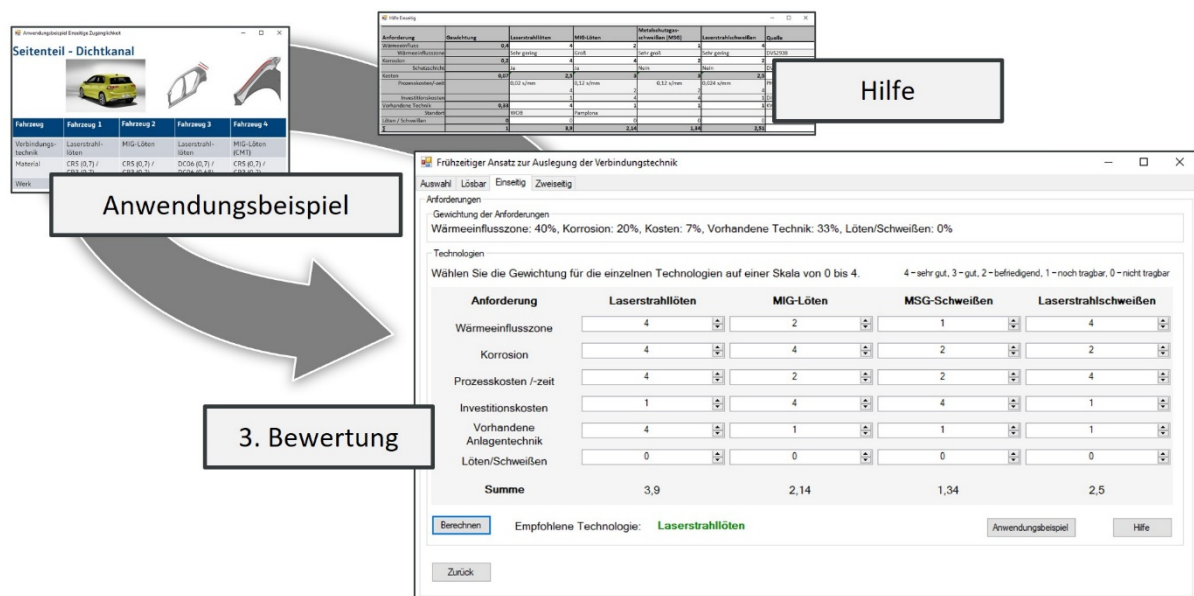


Bild 9: Bewertung (Ebene drei) im Unterstützungsprogramm

Die Bewertung ist vorkonfiguriert und die wissenschaftlichen Quellen dazu können mit dem „Hilfe“-Button angezeigt werden. Verfügt der Anwender über detailliertere Informationen zu den Füge-techniken oder speziellen Anlagen, dann kann die Punktebewertung angepasst werden. Eine MIG-Anlage mit dem wärmereduzierten „Cold Metal Transfer“-Prozess (CMT) würde die Wärmeeinflusszone von „groß“ auf „mittel“ oder „gering“ reduzieren. Die Folge ist die Bewertung mit drei Punkten für eine „gute“ Lösung. In Summe wird die Bewertung des MIG-Lötens dadurch erhöht. Dieses spezifische Wissen steht dem Anwender teilweise zur Verfügung oder kann während des Produktentstehungsprozesses in den Set-Runden erörtert werden. Der „Anwendungsbeispiel“-Button zeigt alternative Füge-techniken auf, welche in der Produktion eingesetzt werden und sich in die gleiche Füge-technikgruppe nach dem Ausschlussprinzip der ersten Ebene des Unterstützungsprogrammes einordnen lassen. Diese Darstellung ermöglicht es dem Anwender die dritte Frage nach den alternativ eingesetzten Füge-technologien innerhalb des Unternehmens zu beantworten. Der „Berechnen“-Button aktualisiert das Ergebnis der Punktebewertung und gibt die zu priorisierende Füge-technik „Laserstrahllöten“ für die Anwendung der Stirn-Bördel-Naht an der Fügestelle Dach-Nullfuge aus.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschreibt zunächst die Notwendigkeit für eine rechnergestützte Auswahl der Füge­technik im Produktentstehungsprozess der Karosserie. Die Grundlage bilden Methoden zur Produktentwicklung, die Einteilung verschiedener Füge­techniken sowie vorhandene Unterstützungsprogramme. Das Ziel besteht darin, den Entwickler bei der frühzeitigen Auswahl einer Füge­technik im Produktentstehungsprozess zu unterstützen. Um die vorhandene Datenmenge im Unternehmen zu nutzen, muss diese für den Anwendungsfall aufbereitet werden. Die Einflussnahme auf die Auswahl einer Füge­technik erfolgt in diesem Anwendungsfall aus dem Unternehmensbereich der Entwicklung.

Zur Analyse des marken- und segmentübergreifenden Einsatzes von Füge­techniken wird eine Methode geschaffen, um die entscheidenden Eigenschaften für deren Anwendung herauszuarbeiten. Im ersten Schritt werden die freigegebenen Füge­techniken nominal für unterschiedliche Fahrzeugprojekte im Unternehmen verglichen. Um die Methode weiter zu verfeinern, werden Steckbriefe für die Eigenschaften der zehn bedeutendsten Füge­techniken erstellt. Im zweiten Schritt werden Bauteile und deren Füge­stellen aus unterschiedlichen Bereichen der Kernlinie ausgehend vom Beispiel Volkswagen Golf 8 über die Modelle angrenzender Marken und Segmente hinweg analysiert. Ergänzt werden diese Informationen durch teilstrukturierte Interviews. Dadurch können die entscheidenden Kriterien, welche zur Anwendung der entsprechenden Füge­technik geführt haben, nachvollzogen werden.

Anschließend wird die Methode zur Auswahl einer marken- und segmentübergreifenden Füge­technik am Beispiel der Füge­stelle zwischen den Bauteilen Seitenteil und Dichtkanal entwickelt. Im ersten Schritt wird durch Ausschlusskriterien eine Füge­technikgruppe gewählt. Im zweiten Schritt wird ein paarweiser Vergleich der relevanten Eigenschaften durchgeführt, wodurch eine Gewichtung der Eigenschaften selbstständig erfolgt und dadurch möglichst objektiv ist. Im dritten Schritt werden die relevanten Eigenschaften für mögliche Füge­techniken relativ zueinander bewertet.

Die beispielhafte Anwendung des Unterstützungsprogramms wird an der Füge­stelle zwischen den Bauteilen Dach und Seitenteil der sogenannten Dach-Nullfuge dargestellt. Die drei Schritte zur Auswahl einer marken- und segmentübergreifenden Füge­technik werden im Unterstützungsprogramm auf drei Ebenen überführt. Dadurch erfolgt in der ersten Ebene der Ausschluss von möglichen Füge­techniken bis zur Auswahl einer Füge­technikgruppe. In der zweiten Ebene wird der Anwender beim paarweisen Vergleich durch eine schnellverständliche Form von Ja-/Nein-Entscheidungen unterstützt. Anschließend wird die erzeugte Gewichtung in die Bewertung miteinbezogen. Die Bewertung erfolgt in der dritten Ebene in Bezug auf eine definierte Vorauswahl an Füge­techniken. Eine grundlegende Bewertung und entsprechende Referenzquellen sind bereits ausgewählt. Auf der Grundlage des spezifischen Wissens des Anwenders, eines bestimmten Werkes oder einer Linie, kann die Bewertung angepasst werden und dient dadurch als Dokumentation in Set-Runden zum Bauteil.

Die Methode zur Schaffung einer marken- und segmentübergreifenden Datenbasis kann auf andere Industriezweige übertragen werden. Dadurch wird ersichtlich welche Füge­techniken in den einzelnen Werken vorliegen und welche Füge­techniken das Potenzial aufweisen einander zu ersetzen. Diese Datenbasis wird durch die Methode zur marken- und segmentübergreifenden Auswahl der Füge­technik genutzt. Das Unterstützungsprogramm beschleunigt die Auswahl der Füge­technik und leistet dadurch einen entscheidenden Beitrag für eine schnellere Produktentwicklung. In Folgeprojekten soll das Programm um weitere Füge­techniken ergänzt werden.

Disclaimer

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Veröffentlichung sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft. / The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

Literatur

- Choudry 2019 CHOUDRY, Saphir A.: *Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien*. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenelemente, Dissertation, 2019.
- DIN 8580 2022 Norm DIN 8580 Dezember 2022. *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*.
- DVS 2938 2009 Merkblatt DVS 2938 Oktober 2009. *Technische und wirtschaftliche Kriterien zur Auswahl der Fügetechnik im Feinblechbereich bis 3 mm Einzelblechdicke*.
- Friedrich 2013 FRIEDRICH, Horst E.; KRISHNAMOORTHY, Sivakumara K.: *Leichtbau als Treiber von Innovationen*. In: Friedrich, Horst E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013.
- Koller 1991 KOLLER, Rudolf: *Einführung und Grundlagen*. In: Bauer, Carl-Otto: *Handbuch der Verbindungstechnik*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1991.
- Lucko 2011 LUCKO, Andreas: *Ein Beitrag zur Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Karosserieentwicklung und Produktplanung*. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Fakultät für Maschinenelemente und rechnergestützte Produktentwicklung, Dissertation, 2011.
- Ostermann 2014 OSTERMANN, Friedrich: *Anwendungstechnologie Aluminium*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- Prüß et al. 2010 PRÜß, Hauke; STECHERT, Carsten; VIETOR, Thomas: *Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen*. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): *Design for X. Beiträge zum 21. DfX Symposium September 2010*. Hamburg: TuTech Verlag, 2010.
- Roth 1996 ROTH, Karlheinz: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 3: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- Schulte 2013 SCHULTE, Robert: *Rechnergestütztes Normteilemanagement als Beitrag zu einem optimierten Produktionsplanungsprozess in der Automobilindustrie*. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Fakultät für Maschinenelemente und rechnergestützte Produktentwicklung, Dissertation, 2013.
- Schulz 2014 SCHULZ, Matthias: *Logistikintegrierte Produktentwicklung*. 1. Aufl. Wiesbaden: SpringerGabler, 2014.
- VDI 2221 Blatt 1 2019 Richtlinie VDI 2221 Batt 1 November 2019. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung*.
- VDI 2225 Blatt 3 1998 Richtlinie VDI 2225 Batt 3 November 1998. *Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*.
- Wartzack 2013 WARTZACK, Sandro: *Auswahl- und Bewertungsmethoden*. In: Feldhuse, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- Wemhöner 2005 WEMHÖNER, Nils: *Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2005.

Erprobungsmethodik und Toolstrategie auf Prüfständen zur Fahrzeugantriebsintegration

Testing methodology and tool strategy on test benches for vehicle drivetrain integration

Carsten Karthaus¹, Johannes Schweers¹, Fabian Seger¹, Harald Behrendt¹

¹Mercedes-Benz AG, Antriebsintegrationszentrum, Sindelfingen
carsten.karthaus@mercedes-benz.com

Abstract (deutsch): Die Antriebstechnologie von PKW wandelt sich und der zukünftige Antrieb ist stärker mit dem Softwareprodukt Fahrzeug vernetzt. Beide Transformationen bedingen eine Veränderung der Art zu erproben hin zu komplexeren Systemen mit verkürzter Entwicklungszeit. Gerade in der Erprobung steigt dadurch der Bedarf nach einer effizienten, generischen und durchgängigen Erprobungsstrategie. Die Antriebssystemerprobung auf Prüfständen begegnet diesen Herausforderungen mit einer angepassten Erprobungsmethodik und Toolstrategie, welche sich im Beitrag auf die Systeme Automatisierungstechnik und Sollwertvorgabe bezieht. Um durchgängig auf allen Prüfständen mehrere Aufgaben erfüllen zu können, erfolgt eine testplattformübergreifende Funktionsintegration in der Automatisierungstechnik. Durch diese Integrationsstrategie wird in der Sollwertvorgabe eine Diversifikation möglich. Diese Diversifikation erlaubt es, für jede Aufgabe das effektivste Tool einzusetzen. Das ergibt eine Portfolioerweiterung aller Prüfstände. Die durchgängige Nutzung von einmalig entwickelten Funktionen und Erprobungsmethoden in mehreren Prüffeldern wird verbessert. Die Auswirkungen auf die Produktentwicklung werden aufgezeigt.

Keywords (deutsch):

Erprobungsmethodik, Erprobungswissen, Antriebssystemintegration, Toolstrategie, Validierung

Abstract (english): The drivetrain technology of vehicles is changing and the future drivetrain is more interconnected with the software product vehicle. Both transformations require a change in the way of developing and testing in the means of complexity and time to market. This leads to an efficient, generic and consistent test strategy. Drivetrain testing on test benches meets these challenges with an adapted testing methodology and a new tool strategy. In this article, this tool strategy relates primarily to the automation technology (test bench automation) and setpoint-setting-system (test run automation).

In order to be able to perform several tasks consistently on all test benches, a cross-test platform function integration takes place in the automation technology. This integration strategy enables diversification in the setpoint-setting-system. This diversification allows the most effective tool to be used for each task. This results in a portfolio expansion of all test benches. The continuous use of unique developed functions and test methods in several test fields is improved. The impact on product development is demonstrated.

Keywords (english):

Testing methodology, testing knowledge, drive system integration, tool strategy, validation

1 Einleitung

Das Experiment ist nach Rodenacker (1970) die einzige Möglichkeit, neue Daten und Informationen über ein Produkt zu erfahren, die noch nicht verfügbar sind. Albers et al. (2016) stellten die Hypothese auf, dass die Validierung die zentrale Aktivität der Produktentwicklung ist. „Daten sind das Gold der Zukunft“ (Granig et al. 2018, S. 76) unterstreicht diese Bedeutung. Aus diesem Blickwinkel müssen zukünftige Erprobungen im Produktentwicklungsprozess stärker in den Fokus gerückt werden. Eine neue Sichtweise auf die Erprobung ergibt sich durch eine Analyse auf die Entwicklungsinhalte aus der Blickrichtung des Wissensmanagements und dem Zweck der Erprobung: Wissen über das System Antrieb zu erzeugen (Karthaus 2020).

1.1 Motivation und Problemstellung

In der Vergangenheit sind viele Prüfstandsarten aus eins zu eins Beziehungen zwischen Produktentwickler und Prüffeld entstanden und die Prüfstände wurden solitär von einem Entwickler beauftragt. So wurden Motorenprüfstände für Motorenentwickler entwickelt, Getriebeprüfstände für Getriebeentwickler, Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstände für Steuergeräteentwickler, Software-in-the-Loop (SiL) für Softwareentwickler, Gesamtfahrzeugprüfstände für Applikateure oder die Zertifizierung. Systemprüfstände, wie beispielsweise Antriebsstrangprüfstände mit einem übergreifenden Nutzen für Getriebe- und Motorenentwickler wurden hauptsächlich für die Absicherung der Dauerhaltbarkeit des Triebstrangs (ohne Betrachtung des antreibenden Verbrennungsmotors) eingesetzt und eine integrative Erprobung kamen erst später zum Einsatz (Klos et al. 2011).

Im V-Modell wurden diese Prüfstandsarten in einem stufenweisen Vorgehen zusammengefasst (VDI 2206). Diesem Vorgehen liegt das Verständnis zu Grunde, dass das Gesamtsystem eine Kombination aus einzelnen Komponenten und Subsystemen ist, welche für sich abgeschlossen sind und weitestgehend unabhängig voneinander entwickelt werden können. Jedoch verändert sich das Gesamtsystem Fahrzeug. Es erfolgt ein Technologiewechsel im Antrieb, die Digitalisierung und Vernetzung der Systeme nimmt zu, „Updates over the air“ sind möglich und autonomes Fahren hält Einzug im Fahrzeug. Diese Evolutionen entwickeln das Fahrzeug mehr und mehr zu einem cyberphysischen Gesamtsystem. Diese Veränderung des Gesamtsystems erfordert eine Veränderung der Art zu erproben. Zugleich ist es notwendig in immer kürzeren Zyklen mehr und früher Informationen über das Produkt zu erhalten und zu lernen. Dafür ist mehr Flexibilität beim Einsatz der Prüfstände insgesamt notwendig.

Der Anwendungsfall für diese Erprobungsstrategie sind acht Prüffelder mit über 50 Prüfständen, die von einer dreistelligen Anzahl an Mitarbeitenden betreut werden und die einen jährlichen Umsatz von mehreren Hundert Million Euro generieren. Daraus ergibt sich aus der zuvor beschriebenen Motivation die Problemstellung, zu deren Lösung der Beitrag eine Unterstützung leisten soll.

1.2 Ziele und Vision

Die Vision ist eine generische, durchgängige Erprobungsmethodik. Denn „Jedes Experiment ist eine Frage an die Natur auf welche zu antworten Sie gezwungen wird“ (Schelling 1799, S. 9). Die Frage an ein System, also die Testspezifikation – welche diese Frage formuliert – ist unabhängig von der Erprobungsumgebung und sollte idealerweise nur einmal formuliert werden.

Der Produktentwickler entwirft seine Testspezifikation für seine Prüfstandsart. Zukünftig formuliert der Produktentwickler eine generische Testspezifikation auf Produkt/Systemebene. Ziel ist, dass jede Frage an das System in jeder Testumgebung, wo das System vorhanden ist, beantwortet werden kann. Aus Sicht der Produktentwicklung entspricht die solitäre Beauftragung eines Prüffeldes einem Single-Source-Prinzip, da jede Information über das Produkt nur von einer Quelle kommt. Ein Ziel muss die Flexibilisierung sein, dafür muss das Single-Source-Prinzip aufgelöst werden. Dann ist es prinzipiell möglich die gewünschte Information aus unterschiedlichen Prüffeldern zu erhalten. Die Information

wird nach wie vor nur in einer Testumgebung erzeugt, jedoch in der am besten geeigneten beispielsweise der kostengünstigsten. Dieses Ziel stellt einen Paradigmenwechsel in der Betrachtung der Erprobung dar, von einer 1:1 Beziehung der Prüffelder und der Produktentwickler hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung der Erprobung über alle Prüffelder. Es erfordert Veränderungen in den technischen Systemen die für die Erprobung genutzt werden und der prüffeldübergreifende Organisation.

1.3 Forschungsfragen und Vorgehensweise

Der Beitrag folgt dem Prinzip vom Abstrakten zum Konkreten. Dabei verbindet er die zuvor beschriebene abstrakte Vision mit der sich historisch entwickelten Toollandschaft am Prüfstand und leitet daraus notwendige Veränderungen ab. Den Stand der Technik (Kapitel 2) auf den Stand der Vision zu entwickeln, ist eine Herausforderung, welcher sich dieser Beitrag schwerpunktmäßig widmet. Die Vision muss dafür konkretisiert werden (Kapitel 3). Dieser Beitrag fokussiert auf die zentrale Forschungsfrage, mit welcher Strategie sich die Softwaretools (Kapitel 4) an Prüfständen entwickeln müssen, um langfristig den beschriebenen Paradigmenwechsel zu erreichen. Die zugrundeliegende Hypothese ist, dass wir eine prüffeldübergreifende, flexible Zusammenarbeit mit technisch geringem Aufwand ermöglichen müssen, um auf diverse Anforderungen reagieren zu können. Daraus ergibt sich die weiterführende Hypothese, dass aufgrund der Flexibilisierung die effektivste Testumgebung für eine Erprobungsaufgabe wählbar wird. Technische Veränderungen müssen mit organisatorischen Änderungen und einem Wandel des Mindset einhergehen (Kapitel 5). Die prüffeldübergreifende Zusammenarbeit ist eine Herausforderung für die Organisation, welche über alle Ebenen der Erprobungsabteilung gelebt werden muss. Die Organisation muss für diese neue Denkweise und Sicht auf Prüffelder aufgestellt werden. Die Hypothese dazu ist das gemeinsame Verständnis für eine prüffeldübergreifende Zusammenarbeit: Prüffelder sind Betriebe die Daten und Informationen produzieren auf Basis derer Produktwissen erzeugt wird. Die Auswirkungen die sich dadurch auf die Produktentwicklung ergeben müssen beschrieben werden (Kapitel 6).

2 Stand der Technik der Antriebssystemerprobung auf Prüfständen

Die Aufgabe der Antriebssystemerprobung ergibt sich aus dem rechten Schenkel des V-Modells (VDI 2206) durch Integration, Verifikation und Validierung. Die Integration erfolgt für die Ebenen der Komponente (z. B. E-Maschine), über die Aggregate (z. B. Verbrennungsmotor), über Systeme (z. B. Antriebsstrang) bis hin zum Gesamtfahrzeug. Das V-Modell hat sich als Vorgehensweise zur Entwicklung mechatronischer Systeme etabliert und entwickelt sich weiter für cyber-physische Systeme. Ein mechatronisches System setzt sich aus Elementen der Mechanik, der Elektrik/Elektronik und Software zusammen (VDI 2206). Jedoch verändert sich, wie eingangs beschrieben, die Architektur des Gesamtsystems. Das Fahrzeug entwickelt sich zum digitalen, cyber-physischen Produkt. Die Antriebssystemintegration in das Fahrzeug nimmt zukünftig auf Systemebene eine stärkere Rolle ein.



Bild 1: Testkaskade entlang des Produktentwicklungsprozesses

Die geforderten Systemeigenschaften müssen frühzeitig innerhalb der Entwicklungsphasen (V-Cycles, siehe Bild 1) ermittelt werden. Die Art und Weise diese Eigenschaften zu ermitteln, also die Frage „Wie wird erprobt?“ (vgl. Akkaya et al. 2018) wird durch die Erprobungsmethodik beschrieben, siehe Kapitel 2.1. Die Werkzeuge um diese Eigenschaften zu ermitteln, also die Frage „Womit wird erprobt?“ werden in Kapitel 2.2 und 2.3 beschrieben. Die Werkzeuge sind einerseits die Prüfstände die nach heutigem Stand der Technik zur Verfügung stehen, siehe Kapitel 2.2. Andererseits sind das die Softwaretools die zum Einsatz kommen, siehe Kapitel 2.3. Diese Eigenschaftsermittlung muss durch eine parallele Erprobung mit Hilfe aller Prüfstandsarten, die entlang der Testkaskade (siehe Bild 1) zur Verfügung stehen, erfolgen. Die parallele Erprobung führt dazu, dass die einzelnen Prüfstandsarten parallel gleiche oder ähnliche Tests durchführen müssen. Der Entwicklungsfortschritt oder Reifegrad wird dadurch gemessen, dass die ermittelten Ist-Eigenschaften anhand der geforderten Systemeigenschaften überprüft werden (VDI 2206), dadurch entsteht Erprobungswissen (Karthaus 2020).

2.1 Erprobungsmethodik

Entlang der Testkaskade stehen unterschiedliche Erprobungsgegenstände im Vordergrund. Die wesentlichen Methoden der Prüfstandserprobung waren die Absicherung der Betriebsfestigkeit und der Funktion (Klos et al. 2011). Die Erprobung der Funktion wurde um Applikationsthemen erweitert und die Fahrbarkeit kam als Erprobungszweck hinzu (Pillas 2017 oder Karthaus et al. 2015). Durch die Transformation zu elektrischen Antrieben kommt die Energieanalyse des Antriebs verstärkt hinzu. Die Validierung von Fahrzeuganforderungen des Antriebs hinsichtlich des Kundennutzens nimmt mit elektrifizierten Antrieben auf Prüfständen stark zu, da der Technologiewechsel auch Veränderungen im Entwicklungsprozess im Sinne „Road2Rig“ beschleunigt. Die Erprobungsmethodik beschreibt unter Einschluss mehrere Erprobungsmethoden ein übergreifendes, planmäßiges Vorgehen zur Untersuchung verschiedener Erprobungsgegenstände (Karthaus 2020), siehe auch Bild 2.



Bild 2: Erprobungsgegenstände einer generischen Erprobungsmethodik zur Antriebssystemerprobung

Diese Erprobungsgegenstände sind die Betriebsfestigkeit, die Applikation, das Benchmarking (Bewertung), die Energieanalyse und die Validierung.

Die Betriebsfestigkeit sichert die Dauerhaltbarkeit im Kundenbetrieb unter repräsentativen Lastkollektiven ab, dabei müssen sowohl gesetzliche als auch firmenspezifische Vorschriften berücksichtigt werden. Dafür stehen stationäre, synthetische und dynamische Prüfprogramme als Lastkollektive zur Verfügung. Dabei werden unterschiedliche Methoden der Vorgabe unterschieden: Stützstellenprogramme, Bandvorgabe, manöverbasiertes Fahren und Onlinesimulation. Ziel ist die Erreichung einer kundenrepräsentativen Laufleistung/Schädigung. Als Sollwertvorgabesystem wird eine angepasste Version einer am Markt verfügbaren Antriebstrangsimulation eingesetzt. (Klos et al. 2011)

Unter Applikation wird die Wahl von Steuergeräteparameter, als auch der Prozess zur Definition der Parameter verstanden. Für Motorfunktionen wie Luftfüllung, Einspritzung und Zündung hat sich der

Motorprüfstand etabliert. Die Fahrbarkeitsapplikation oder die Applikation von On-Board-Diagnose (OBD) Funktionen erfolgt auf System- oder Fahrzeugprüfständen. Hierfür werden modellbasierte Methoden und Design of Experiments (DoE) Methoden eingesetzt, um mit geringem Versuchsaufwand optimierte Parameter zu ermitteln und so auch unterschiedliche Fahrzeugvarianten effektiv zu applizieren. Als Sollwertvorgabesystem wird ein Kalibrierungstool für (DoE) eingesetzt. (Pillas 2017) Unter Benchmark wird die Bewertung eines Fahrzeugs und seiner Eigenschaften anhand von KPIs in einem relativen Vergleich mit anderen Fahrzeugen oder in einem absoluten Vergleich mit einem definierten Bewertungsmaßstab verstanden. Die Auswertung der Fahrmanöver erfolgt anhand von eventbasierten Bewertungs- und Berechnungsmethoden, z. B. hinsichtlich Fahrbarkeit, Komfort und Sportlichkeit. Da die Fahrmanöver identisch oder ähnlich wie bei den Applikationsaufgaben ist, eignet sich auch hier das zuvor beschriebene Sollwertvorgabesystem.

Bei der Energieanalyse stehen Entwicklungsgrößen wie Wirkungsgrad, Reichweite und Verbrauch im Vordergrund. Hierzu werden stationäre Prüfprogramme, Zyklusfahrten, Leerfahrten, Schleppversuche oder Optimierung zur Betriebsstrategie durchgeführt. Diese können auf Komponenten-, System- und Fahrzeugprüfständen entwicklungsbegleitend durchgeführt werden. Es werden höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Messtechnik gestellt. Es kommen Methoden der Strecken- (wegbasiert oder zeitbasiert) und Umweltsimulation (z. B. Temperatur und geodätische Höhe, Verkehr, Schilder) zur Anwendung. Je nach Prüffeld unterscheiden sich die Sollwertvorgabesysteme.

Die Validierung des Antriebssystems erfolgt in Anlehnung an VDI 2206 gegenüber den übergeordneten Anforderungen der nächsthöheren Systemebene, also den Fahrzeuganforderungen. Dies erfolgt sowohl im Fahrzeug auf der Straße als auch auf Fahrzeugprüfständen unter reproduzierbaren Bedingungen. So wird der Nachweis geführt, dass die Kundenerwartungen und die Bedürfnisse der Stakeholder (z. B. Projektleiter) der zugehörigen Systemebene erfüllt sind. Hierfür müssen Manöver und Zyklen abgefahren und mit Lastenheftanforderungen verglichen werden. Zur entwicklungsbegleitenden Vorbereitung der Validierung stehen die identischen Testfälle auf allen Testplattformen im Rahmen eines generischen XiL-Konzepts (siehe Karthaus et al. 2021) zur Verfügung. Die Überprüfung und Dokumentation des Testablaufs und der Anforderungen erfolgt automatisiert. Als Sollwertvorgabesystem wird ein Tool zur Validierung eingebetteter Systeme eingesetzt.

Diese Übersicht zeigt, dass im Laufe der letzten Jahre neue Aufgaben im Bereich der Erprobung hinzugekommen sind. Für jede dieser Aufgaben haben sich spezielle Prüffelder mit eigener Systemlandschaft entwickelt. Antriebssystemprüffeld mit Funktions-Dauerlaufprüfständen, Komponentenprüffeld für Funktion und Dauerlauf oder Applikationsrollen und Fahrzeugantriebsstrangprüfstände für Applikation, Benchmark oder Validierung. Der Vergleich der Erprobungsmethoden zeigt, dass für jede neue Aufgabe auch neue Tools zum Einsatz kamen.

In Zukunft werden weitere Erprobungsaufgaben hinzukommen, die sich aus verstärkter Vernetzung oder aus dem autonomen Fahren ergeben. Das explorative Testen und das zufallsbasierte Testen werden aufgrund unzureichender Testspezifikation – nicht alle Szenarien können definiert werden – zunehmen. Die Einbindung weiterer Informationen in den Prüfstand, also die Simulation der Umwelt, z. B. für die Sensoren (Radar, Schilderererkennung, ...) wird notwendig sein, um repräsentative Prüfläufe zu erzeugen. Für diese zukünftigen Aufgaben existieren spezialisierte Tools. Es ist also anzunehmen, dass die Variantenvielfalt der eingesetzten Tools weiter zunimmt.

2.2 Testkaskade und Testplattformen

Die in Bild 1 dargestellte Testkaskade zeigt Testplattformen, die im Entwicklungsprozess zur Verfügung stehen. Die Testkaskade beginnt bei den SiL-Prüfständen, geht weiter bei den HiL-Prüfständen, den Komponentenprüfständen, den Systemprüfständen, Gesamtfahrzeugprüfständen und am Ende steht das Erproben des Fahrzeugs auf der Straße oder dem Prüfgelände. Eine durchgängige Teststrategie „Road2Rig“, beschreibt die für ein Frontloading notwendige Verlagerung von Tests vom Fahrzeug ausgehend nach links (siehe Bild 3). Gleichzeitig führt der Trend zu komplexeren Systemen zu einer Verlagerung von Erprobungen nach rechts auf die System- und Fahrzeugebene. Diese zwei Entwicklungen sind gegenläufig und auch in komplexen Systemen muss das Ziel „Road2Rig“ sein.

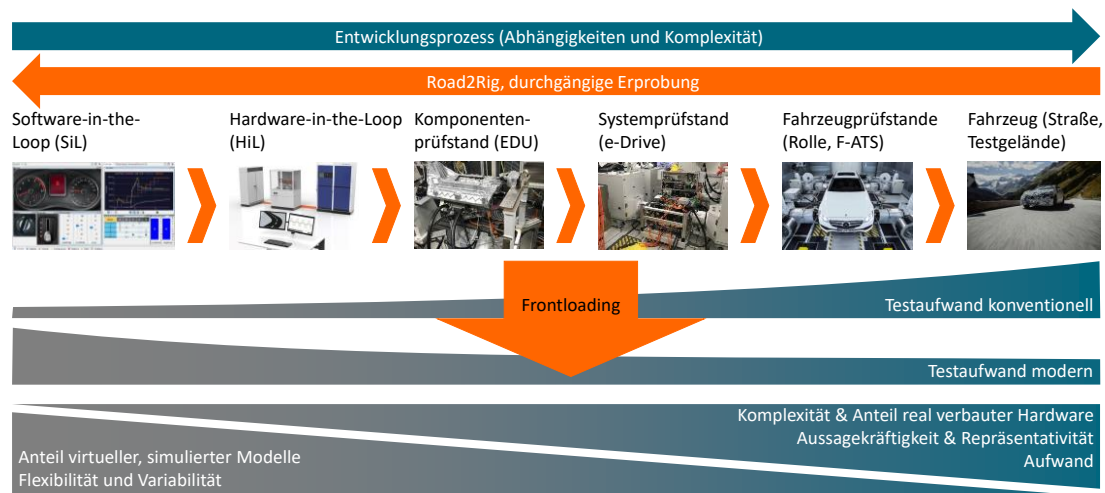


Bild 3: Testkaskade als Gesamtsystem (in Anlehnung an Karthaus et al. 2021)

Im Anwendungsfall gehören dazu die Prüfstandsarten mit Hardwareprüfung, vom HiL-Prüfstand bis hin zum Fahrzeugprüfstand. Anhand kurzer Iterationsschleifen zwischen den Prüfstandsarten wird zu jedem Zeitpunkt frühzeitig Erprobungswissen erzeugt. Die Prüfstandsarten werden kurz vorgestellt.

Auf dem HiL wird als Hardware ein Steuergerät oder ein Verbund aus Steuergeräten (Cluster) und je nach Aufbau einzelne Aktoren (z. B. Drosselklappe) aufgebaut. Es erfolgt der Test der Software auf dem Steuergerät. Durch die Simulation anderer Steuergeräte und des Fahrzeugs anhand virtueller Modelle ist es möglich ein fahrbares Gesamtsystem abzubilden. Systemtests sind möglich.

Komponentenprüfstände gibt es in sehr verschiedener Ausprägung, beispielsweise zur Absicherung einzelner Triebstrangkomponenten (z. B. Reibbeläge, Seitenwellen, ...). Die singuläre E-Maschine mit Inverter im elektrischen Antrieb (EDU) wird auf Komponentenprüfständen im Hinblick auf Ihre Eigenschaften (z. B. Betriebsfestigkeit, Wirkungsgrad, etc.) untersucht. Systemtests sind möglich, wenn die dafür notwendigen, nicht vorhandenen Funktionen virtuell abgebildet werden. Das entspricht dem Systems Engineering Ansatz (vgl. z. B. Gräßler und Oleff 2022), um komplexe Systeme auf Systemebene zu entwickeln, auch wenn nur Teilsysteme abgebildet sind.

Als Systemprüfstände stehen Antriebsstrangprüfstände für konventionelle und elektrifizierte Antriebsstränge (e-Drive) zur Verfügung. Für das elektrifizierte Antriebssystem sind E-Maschine und Inverter, Getriebe, Batterie, radnahe Triebstrangkomponenten und alle notwendigen Steuergeräte für den Antrieb aufgebaut. Signale des Fahrzeugs oder der Fahrzeugaufbau müssen simuliert werden. Damit sind Systemtests und Tests mit dem Gesamtsystem Fahrzeug möglich.

Als Fahrzeugprüfstände sind Rollenprüfstände und sogenannte Fahrzeugantriebsstrangprüfstände (F-ATS) (siehe Bauer 2011) vorhanden. In beiden Prüfstandsarten wird das Gesamtsystem Fahrzeug aufgebaut. Alle Systeme sind real vorhanden. Die Lastwiderstände, die Umgebungsbedingungen und ggf. das Verhalten des Prüflings müssen in der experimentellen Umgebung Prüfstand simuliert werden. Im Bild 3 rechts im Fahrzeug auf der Straße/Prüfgelände existieren keine virtuellen Modelle, links im SiL gibt es die Software und eine virtuelle Umgebung. Von links nach rechts steigt der Anteil an realer Hardware, gleichzeitig sinkt der Anteil an simulierten Modellen. Jeder Prüfstand dazwischen ist eine Mischung aus virtuellen und realen Systemen. Meist beginnt die Entwicklung in frühen Phasen mit vielen digitalen, virtuellen Modellen, solange noch keine Hardware verfügbar ist. Mit steigendem Entwicklungsfortschritt kommen sukzessive Prüfstände mit größerem Hardwareanteil zum Einsatz. Gleichzeitig steigen die Abhängigkeiten und die Komplexität. Von links nach rechts steigt die Aussagekräftigkeit der Ergebnisse, während auch der Aufwand steigt und die Flexibilität sinkt. Das bedeutet umgekehrt die Kosten der Prüfstände sinken von rechts nach links.

Es gilt die Testkaskade als ganzheitliches Gesamtsystem zu optimieren. Für die Effektivität der Testkaskade ist es zentral das Richtige auf der richtigen Plattform zu testen und das transparent und abgestimmt mit allen Plattformen. Gemeinsam wird das effiziente Testen der Gesamtsystemfunktion ermöglicht und die Kosten können minimiert werden.

2.3 Toollandschaft

Die Toollandschaft oder Systemarchitektur am Prüfstand wurde von Schenk (2017) beschrieben. Die Hauptsysteme sind: das Automatisierungssystem, das Sollwertvorgabesystem, die Sicherheitssysteme, die Hilfssysteme die Kommunikations- und Bussysteme, das Messsystem, das Applikationssystem und Peripheriesysteme und Auswertesysteme. Für diesen Beitrag sind insbesondere das Automatisierungs- und das Sollwertvorgabesystem relevant. Diese zwei Systeme übernehmen die zwei wesentlichen Funktionen:

- Prüfstandsautomatisierung (Automatisierungssystem)
- Prüflaufautomatisierung (Sollwertvorgabe)

Im Sollwertvorgabesystem werden die Sollwerte für den Prüflauf und damit dessen Ablauf generiert. Um eine Vorgabe in Echtzeit zu ermöglichen, müssen die Sollwerte über ein Echtzeitsystem geführt werden (Schenk 2017). Die Sollwertvorgabe übernimmt den automatischen Ablauf des Testfalls (Prüflaufautomatisierung) und setzt somit die Testspezifikation um.

Das Automatisierungssystem leitet die Sollwerte direkt an den Prüfstand, z. B. die Umrichter der Bremsmaschinen oder die Steuergeräte des Antriebssystems weiter. Außerdem übernimmt das Automatisierungssystem die Prüfstands- und Prüflingsüberwachung inklusive aller Sicherheitsfunktionen und koordiniert die Steuerung von Hilfsbetrieben (z. B. Umweltsimulation) und Kommunikationssystemen (Schenk 2017). Die Automatisierungstechnik hat also die Aufgabe, die Ansteuerungen am Prüfstand zu automatisieren (Prüfstandsautomatisierung).

Jedes der beschriebenen Prüffelder hatte seine eigene Datenbank für das Automatisierungssystem und wie schon aus dem vorangegangenen Kapitel ersichtlich meist sein eigenes Sollwertvorgabesystem. Mit diesen Informationen ergibt sich exemplarisch folgendes Gesamtbild bezüglich der Automatisierungs- und Sollwertvorgabesysteme, siehe Bild 4. Darin sind beispielsweise drei Prüffelder mit unterschiedlichem Erprobungsgegenstand, Tools und 1:1 Beziehung dargestellt.

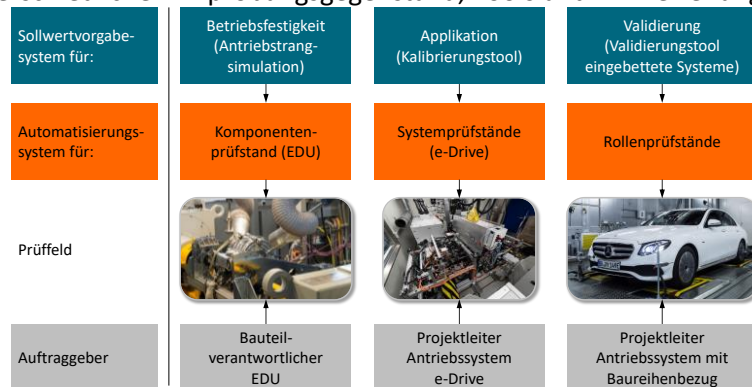


Bild 4: Stand der Technik der Automatisierungs- und Sollwertvorgabesysteme

3 Herausforderungen und Konkretisierung des Ziels

Bild 4 zeigt, dass bisher in jedem Prüffeld meist eine Aufgabe mit dem am effektivsten Tool erprobt wurde. Ein weiteres Problem ist, dass sämtliche Funktionen der Prüfstandsautomatisierung in jeder Datenbank und damit mehrfach umgesetzt werden müssen. Die Herausforderungen, die sich aus Kapitel 1 ergeben, verlangen eine prüffeldübergreifende Zusammenarbeit und jeder Prüfstand muss mehrere Aufgaben effektiv bewältigen können. Etwas detaillierter betrachtet führen viele Einflussfaktoren dazu, dass sich diese Anforderungen ergeben. Die Verkürzung der Entwicklungszeiten führt zu einer Verlagerung von Test in frühere Phasen, siehe Bild 3. Dieses Frontloading erfordert mehr Modell Verifizierung/Validierung in späteren Phasen und auf Prüfständen mit mehr realer Hardware. Die Veränderung des Produkts mit der stärkeren Vernetzung der Systeme erfordert, dass jeder Prüfstand ein spezifisches, repräsentatives Gesamtsystem abbilden kann. Fehler, die im Fahrzeug entdeckt werden, sollen mit Hilfe von flexibleren, günstigeren Testplattformen untersucht und

abgestellt werden. Tests sollen ab der frühen Phase erfolgen, um die Reifegradentwicklung entwicklungsbegleitend aufzuzeigen. Alle diese Einflussfaktoren führen zu der Anforderung, dass alle Prüfstände eine durchgängige Teststrategie, vgl. Bild 1 mit prüffeldübergreifender Zusammenarbeit ermöglichen. Ein Hauptproblem ergibt sich durch den hohen Spezialisierungsgrad der Sollwertvorgabesysteme und der damit verbundenen Effektivität für die Abarbeitung der jeweiligen Aufgabe. Das heißt eine Reduzierung auf wenige Sollwertvorgabesysteme wird kaum möglich sein. Zwischen den Prüffeldern muss ein effektiver Austausch von Testspezifikationen und damit mehr Flexibilität ermöglicht werden. Konkretisiert auf das Automatisierungs- und das Sollwertvorgabesysteme bedeutet das, dass wir die prüffeldübergreifende Zusammenarbeit unterstützen und dafür mehr Flexibilität schaffen und gleichzeitig die Effektivität erhalten müssen.

4 Toolstrategie

Die vorgestellte Toolstrategie dieses Beitrags zielt auf die ganzheitliche Optimierung des Systems „Erprobung und Prüffelder“ aus Bild 4 ab, welches den Stand der Technik beschreibt. Zur Optimierung technischer Systeme helfen die „Prinzipien optimaler Systeme“ (Ponn und Lindemann 2008, S. 374). Dazu gehören auf der Systemebene die Prinzipien der Funktionsintegration und der Funktionsdifferenzierung. Der Kern der Toolstrategie fokussiert einen Paradigmenwechsel von der Funktionsdifferenzierung zur Funktionsintegration, um die zwei wesentlichen Ziele durchgängige Erprobung und Flexibilisierung zu erreichen. Gleichzeitig muss die Beherrschung der Tools gewährleistet werden und die Effektivität der bisher eingesetzten Tools erhalten bleiben. Das Bild 5 beschreibt den Zielzustand nach der Optimierung. Der Weg um dieses Ziel zu erreichen wird im Weiteren erläutert.

Aus Sicht der Produktentwicklung ist es egal, auf welchem Prüfstand die Information über das Produkt gewonnen wird. Dadurch muss die Art und Weise, wie diese Produktinformation erzeugt wird für alle Testplattformen gleich sein. Dann ist die Testspezifikation generisch, also unabhängig vom Prüfstand. Diese generische Spezifikation kann nur auf der höchsten Ebene, also der Fahrzeugebene erfolgen. Das bedeutet wiederum, dass für die systemische Umsetzung die Prüflaufautomatisierung in allen Prüfumgebungen identisch sein muss. Im heutigen Stand der Technik würde dies für die Prüffelder dazu führen, dass jede Automatisierungstechnik eine Schnittstelle zu jedem Sollwertvorgabesystem besitzen müsste. Dieser Aufwand wird als hoch eingeschätzt und ist daher unrealistisch. Aus Sicht der Produktentwicklung werden in allen Prüffeldern identische Ansteuerung auf Fahrzeugebene verlangt. Dies ist notwendig, weil Tests auf der Fahrzeugebene spezifiziert werden müssen, um generisch, also übergreifend zu sein. Wie der Fahrer oder Entwicklungsingenieur im Auto, muss jeder Prüfstand dessen Möglichkeiten der Ansteuerung und der Messung ausführen können. Das sind z. B. das Fahrpedal betätigen, eine Geschwindigkeit ablesen, den Ladestecker anstecken, einen Applikationswert verändern oder ein Messsignal auslesen. Diese Möglichkeiten der Ansteuerung müssen in allen Prüfständen von der Prüfstandsautomatisierung bereitgestellt werden. Das bedeutet, dass jede Prüfstandsautomatisierung dieselben Funktionen bereitstellen muss, um mit dem Antriebssystem Auto fahren zu können. Das bedeutet, dass Prüfstände die nicht das Gesamtsystem abbilden fehlende Funktionen virtuell simulieren müssen, damit die Systemfunktion repräsentativ abgebildet werden kann. Beispielsweise muss ein Komponentenprüfstand mit EDU eine Batterie simulieren, um einen gesamten Antrieb abzubilden und aus Sicht des Fahrers Auto fahren zu können. Die programm- und hardwaretechnische Umsetzung ist von Prüfstand zu Prüfstand aufgrund der unterschiedlichen Datenbanken und Hardwareaufbauten verschieden. Diese Überlegung führt zu dem Ansatz, dass auf der Ebene der Prüfstandsautomatisierung eine Integration aller Funktionen möglich sein muss.

4.1 Funktionsintegration

Bei der Funktionsintegration erfüllt ein System zwei, mehrere oder möglichst viele Funktionen (Ponn und Lindemann 2008). Die heutige Prüfstandsautomatisierung verwendet bereits die selbe Software. Allerdings haben die unterschiedlichen Prüfstände unterschiedliche Datenbanken, Variablen und

Befehlsprogramme im Hintergrund. Mit Hilfe einer Clusteranalyse wurde ermittelt, welche Prüfstände und Prüffelder für eine Funktionsintegration zusammengefasst werden können.

Ziel der Strategie ist es, alle Funktionen einmalig in einer Datenbank zu realisieren. Für die Umsetzung einer Ansteuerung muss in Abhängigkeit der verfügbaren Hardwareaufbauten die Ansteuerung realisiert werden. Beispielsweise für die Funktion Fahrpedal betätigen kann dies von einem Fahrroboter oder über eine elektrische oder informationstechnische Signalvorgabe erfolgen. Diese Unterscheidung muss der Automatisierungstechnik des jeweiligen Prüfstandes bekannt sein. Basierend darauf muss die Ansteuerung automatisch verändert werden. Der unterschiedliche Hardwareaufbau an den unterschiedlichen Prüfständen erfordert also eine effiziente Programmierung. Der Zielzustand für das Gesamtsystem ist in Bild 5 dargestellt. Im Vergleich zwischen Bild 4 und Bild 5 wird die neue Strategie deutlich. Die Integration auf der Ebene der Automatisierungstechnik fasst alle Funktionen zu einer Datenbank zusammen. Dadurch entsteht ein neues System über alle Prüffelder, in Bild 5 gestrichelt dargestellt. Dies löst das Single-Source-Prinzip auf.

Das bedeutet: Funktionen müssen nur einmalig entwickelt werden und stehen dann allen Prüffeldern zur Verfügung. Die Funktionen müssen so entwickelt werden, dass Sie allen Prüffeldern gerecht werden und den Hardwareaufbau des Prüfstandes erkennen und die Funktionen prüfstandsspezifisch umsetzen. Die Ingenieure müssen mehr allgemeines Methodikwissen über die unterschiedlichen Prüfstände und gleichzeitig ein tieferes Expertenwissen für die Automatisierungstechnik haben. Dies bedeutet eine Änderung des Kompetenzprofils der Mitarbeiter in der Automatisierungstechnik.

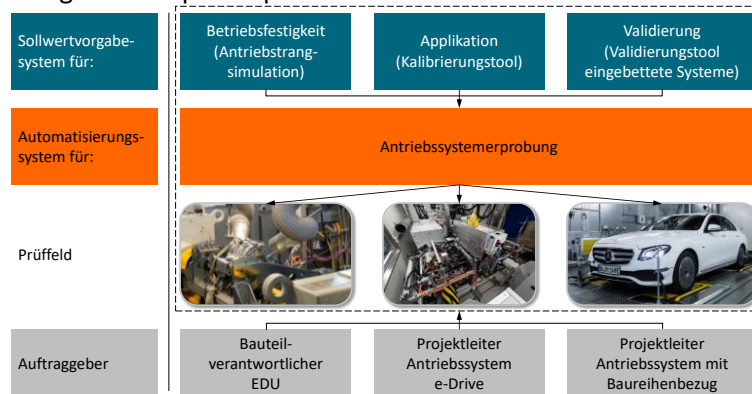


Bild 5: Zielzustand für Automatisierungs- und Sollwertvorgabesysteme

4.2 Funktionsdifferenzierung

Bei der Funktionsdifferenzierung soll nach Ponn und Lindemann (2008) jedes System nur eine Funktion erfüllen. Die Funktionsdifferenzierung gilt für die Ebene der Sollwertvorgabesysteme in Bild 5. Es zeigt sich, dass diese Tools mit Ihrer Spezialisierung erhalten bleiben. Damit unterschiedliche Tools dieselben einmalig bereitgestellten Funktionen der Automatisierungstechnik nutzen können, muss die Schnittstellenanbindung vereinheitlicht werden. Diese Schnittstelle stellt alle Funktionen den Sollwertvorgabesystemen bereit. Jedes Tool der Sollwertvorgabe kann nun diese Funktion, z. B. „Fahrpedal betätigen“ aufrufen. Die Automatisierungstechnik entscheidet, wie dieser Wunsch umgesetzt wird. Die Sollwertvorgabe reiht die unterschiedlichen Ansteuerungsmöglichkeiten hintereinander um eine Testspezifikation zu realisieren. Damit beschreibt die Sollwertvorgabe lediglich den Ablauf der Ansteuerungsmöglichkeiten auf einer generischen Ebene aus Sicht der Produktentwicklung. Jedes Tools muss die Verwaltung der Testspezifikationen prüfstands- und prüffeldübergreifend ermöglichen. Hierzu stehen prinzipiell mehrere Optionen, z. B. Datenbanksysteme oder Dateiablagensysteme mit Repository, zur Verfügung. Somit wird in einem Tool einmalig ein Testablauf erstellt und dann am jeweiligen Prüfstand eingesetzt. Diese Diversifikation erlaubt es, für jede Aufgabe aus Bild 2 das effektivste Tool einzusetzen. Das hat zur Folge, dass die Sollwertvorgabesysteme und die bereits vorhandenen Tests auf diese neue Schnittstelle angepasst werden müssen. Das bedeutet alle vorhandenen Tests müssen verändert werden und neue Tests sind

gezwungen die bereitgestellten Funktionen zu nutzen. Neue Funktionen werden prüffeldübergreifend in der Automatisierungstechnik umgesetzt. Bei der Implementierung neuer Funktionen ist ein erhöhter Aufwand notwendig, da diese für mehrere Plattformen notwendig ist. Dieser erhöhte Aufwand in der Anfangsphase wird dadurch ausgeglichen, dass in späteren Phasen beim Austausch dieser Aufwand gespart wird. Da die Umsetzung der Funktionen von Experten mit tieferem Expertenwissen erfolgt, ist anzunehmen, dass die Umsetzung in Summe effizienter erfolgt.

Aufgrund der Trennung von Automatisierungstechnik und Sollwertvorgabe ist es dem Sollwertvorgabeingenieur möglich, sein spezielles Methodikwissen zu vertiefen und sich auf die Methodikentwicklung neuer Erprobungsmethoden zu fokussieren. Auch hier ist durch die Fokussierung des speziellen Methodikwissens eine Effizienzsteigerung zu erwarten.

5 Organisatorische Veränderungen

Die größere Herausforderung – neben der Entwicklung der Technik – ist die Entwicklung der Organisation, um mit dieser Technik zu arbeiten. Die Organisation muss für diese neue Denk- und Sichtweise auf Prüffelder verändert werden. Das beginnt bei der Veränderung der Wissensprofile der Mitarbeiter. Es muss eine Bündelung der Wissensträger aus den unterschiedlichen Bereichen zu Wissensgemeinschaften – sogenannte User-Groups – erfolgen. Das gilt sowohl für die Experten der Automatisierungstechnik, als auch der Sollwertvorgabe. Damit erfolgt eine Bündelung aller Kompetenzen zur Programmierung von Automatisierungsfunktionen und zur Entwicklung von Erprobungsmethoden. Darüber hinaus wird Methodik prüffeldübergreifend entwickelt, anstatt dezentral in jedem Prüffeld. Die Verwaltung der Sollwertvorgabesysteme muss übergreifend über die Teams erfolgen. Es benötigt Verantwortliche für die einzelnen Sollwertvorgabesysteme.

Diese User-Groups sind unabhängig von der Linienorganisation umgesetzt und wirken prüffeldübergreifend. Jedes Prüffeld ist in jeder User-Group vertreten. Es sind agile Gruppen mit gleicher Motivation und gleicher Problemstellung. Dadurch entwickelt sich eine Gruppendynamik welche die Zusammenarbeit aus den gleichen Problemen und damit intrinsischer Motivation heraus antreibt. Die Arbeit dieser User-Groups in unserer Abteilung zeigt die Vorteile dieser Wissensgemeinschaften und die Erfahrungen übertreffen aufgrund der sich ergebenden Gruppendynamik die erwarteten Vorteile. Diese Vorteile sind ein abteilungsübergreifender Austausch zwischen den Experten, ein optimierter Informationsfluss, Gebäude-, Standort- oder Organisationsgrenzen werden überwunden und es erfolgt ein organisationales Lernen innerhalb der Gemeinschaft. Ebenso erfolgt eine schnellere Einbindung neuer Mitarbeiter. Gleichzeitig gelingt es, dass die organisierten Teams ihre Eigenständigkeit beibehalten und es entsteht eine prüffeldübergreifende Zusammenarbeit. Diese prüffeldübergreifende Zusammenarbeit ist die Voraussetzung, dass eine generische, durchgängige Erprobung gegenüber der Produktentwicklung ermöglicht wird.

6 Auswirkungen auf die Produktentwicklung

Die prüffeldübergreifende Umsetzung der Strategie in Technik und Organisation hat begonnen. Die ersten Auswirkungen sind bereits erlebbar und weitere Vorteile sind ersichtlich.

Die Vorteile dieser Strategieänderung lassen sich in folgende Punkte unterteilen:

1. Auswirkungen innerhalb der Erprobung
2. Auswirkungen auf die Außenwirkung der Erprobung
3. Vorteile auf die Produktentwicklung

Innerhalb der Erprobung, also der zuvor beschriebenen Abteilung, müssen Funktionen innerhalb der Automatisierungstechnik nur einmalig entwickelt werden. Für jede Aufgabe kann das geeignete Tool für die Sollwertvorgabe eingesetzt werden. Durch diese Gesamtstrategie wird es ermöglicht, dass Testspezifikationen zwischen den Prüfplattformen ausgetauscht und mehrfach verwendet werden können (Karthaus et al. 2021). Die durchgängige Nutzung von einmalig entwickelten Erprobungsmethoden entlang der Testkaskade wird verbessert. Ebenso wird die Verifizierung von Modellen

zwischen den Testplattformen erleichtert. Die Außenwirkung der Erprobung für den Produktentwickler verändert sich und es erfolgt eine Portfolioerweiterung aller Testplattformen. Alle Testinstanzen können sich auf alle Aufgaben der Antriebsintegration fokussieren. Zugleich erfolgt eine agilere Nutzung der Prüfstände, da kürzere Iterationsschleifen möglich sind und viele Erprobungsmethoden zu früheren Entwicklungszeiten getestet werden können. Für die Produktentwicklung wird die entwicklungsbegleitende Erprobung aller Aufgaben verbessert. Aufgrund der Durchgängigkeit und der generischen Erprobung erfolgt eine Fokussierung auf die Erprobungsinhalte unabhängig davon, wo Erprobungswissen erzeugt wird. Die Gesamtstrategie erhöht die Flexibilität der Testkaskade für den Entwicklungsprozess. Das unterstützt eine Veränderung des Entwicklungsprozesses mit Fokus auf die Antriebsintegration im zukünftigen digitalen Produkt Fahrzeug.

7 Schlussbetrachtungen

7.1 Diskussion der Ergebnisse

Die entwickelte Strategie zeigt eine grundlegende Systemveränderung auf und den Weg eine Vision technisch und organisatorisch zu erreichen. Viele Auswirkungen innerhalb der Abteilung sind bereits umgesetzt und die Vorteile nachprüfbar. Um die positiven Auswirkungen auf die Produktentwicklung überprüfen und bewerten zu können, ist es zu früh und es bleibt abzuwarten, ob diese wie erwartet eintreten. Die Strategie ist von praktischer Relevanz, da die Umsetzung aufgrund der Toolveränderungen innerhalb der Abteilung ein zweistelliges Millionenprojekt bedeutet. Die Nützlichkeit ist durch die positiven Auswirkungen innerhalb der Erprobung gegeben, da zukünftige Antriebssysteme im Gesamtfahrzeug effizienter erprobt werden können. Deshalb ist die Strategie bereits jetzt als innovativ zu bezeichnen. Gleichzeitig sind Investitionen in die Menschen und die Organisation notwendig. Die Menschen dazu zu motivieren, mit der neuen Technik zu arbeiten und ein neues Mindset anzunehmen, ist dabei die größte Herausforderung. Derartige Veränderungen bringen Hürden mit sich. Die Erfahrung der User-Groups zeigt, dass gruppendynamische Effekte die Umsetzung beschleunigen und die Wertschätzung gegenüber den Mitarbeitern steigern.

7.2 Zusammenfassung

Die Inhalte dieses Beitrags beschreiben eine grundlegende Strategie zur Entwicklung zukünftiger Automatisierungssysteme an Prüfständen zur Erprobung und Integration des Systems Antrieb in das Fahrzeug. Er beschreibt auch eine Vision über das Verständnis von Erprobung in der Zukunft. Dieser Beitrag beschreibt die Toolstrategie zur prüffeldübergreifenden Zusammenarbeit. Diese Strategie verfolgt das Ziel einer generischen, durchgängigen Erprobung über alle Prüfstände der Testkaskade vom SiL-Prüfstand bis zum Gesamtfahrzeugprüfstand. Der Unterschied zwischen dem Stand der Technik der Systemlandschaft (Bild 4) und dem Zielzustand der Toolstrategie dieses Beitrags (Bild 5) wurde klar beschrieben. Die Voraussetzungen für diese Veränderung und deren Auswirkungen wurden aufgezeigt. Die Sichtweise von einer singulären Beauftragung eines Prüfstandes durch einen Entwickler verändert sich hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung: wie Erprobungswissen über das Antriebssystem effektiver und effizienter erzeugt werden kann. Um diesen Betrachtungswechsel zu realisieren, leistet der Artikel einen Beitrag, da er die technischen und die organisatorischen Rahmenbedingungen der Prüfstände beschreibt. Die Toolstrategie fokussiert auf den interessanten Paradigmenwechsel von der Funktionsdifferenzierung zur Funktionsintegration. Diese Funktionsintegration schafft auf allen Testplattformen die Möglichkeit, mehrere Aufgaben zu erfüllen.

Durch die Integrationsstrategie auf der Ebene der Automatisierung wird eine Diversifikation auf der Ebene der Sollwertvorgaben auf allen Testplattformen möglich. Diese Diversifikation erlaubt es, für jede Erprobungsmethode das effektivste Tool einzusetzen. Die Erprobungsmethodik und die Toolstrategie tragen zur Effizienzsteigerung in der Produktentwicklung bei.

7.3 Ausblick

Die Umsetzung dieser Strategie wird Jahre in Anspruch nehmen. Jedoch wird der Weg dorthin das Verständnis der Erprobung im Rahmen der Produktentwicklung verändern. Im Vordergrund muss das aus der Erprobung erzeugte Wissen über das Produkt stehen. Dabei wird die generische und durchgängige Erprobung zentral sein.

Literatur

- Albers et al. 2016 ALBERS, A.; BEHRENDT, M.; KLINGLER, S.: *Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess*. In: *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 541-569.
- Akkaya et al. 2018 AKKAYA, F.; KLOS, W.; SCHWÄMMLE, T.; HAFFKE, G.; REUSS, H.-C.: *Holistic Testing Strategies for Electrified Vehicle Powertrains in Product Development Process*. In: *World Electric Vehicle Journal* (2018), Nr. 9(1), 5.
- Bauer 2011 BAUER, R.: *Neues Regelkonzept für die dynamische Antriebsstrangprüfung*. In: *17. Steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung*. Leibnitz : Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, TU Graz, 2011, S. 104-116.
- Granig et al. 2018 GRANIG, P.; HARTLIEB, E.; HEIDEN, B.: *Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2018.
- Gräßler und Oleff 2022 GRÄßLER, I.; OLEFF, C.: *Systems Engineering*. Berlin : Springer-Verlag, 2022.
- Karthaus et al. 2015 KARTHAUS, C.; KARLSSON, Z.; PALAND, T.; KIRSCHBAUM, F.: *Applikation auf Antriebsstrangprüfständen*. In: *Beiträge 6. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik*. Wiesbaden: AVL und TU Darmstadt, 2015, S. 36-47.
- Karthaus 2020 KARTHAUS, C.: *Methode zur Rückführung von Erprobungswissen in die Produktentwicklung am Beispiel Fahrzeugantriebstrang*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2020.
- Karthaus et al. 2021 KARTHAUS, C.; BICK, A.; HANKE, F.; BRIAN, D.: *X-in-the-Loop – A universal Testing Methodology*. In: *ATZ Electronics Worldwide 16* (2021), Nr. 11, S. 46-51.
- Klos et al. 2011 KLOS, W.; SCHENK, M.; SCHWÄMMLE, T.; BERTSCHE, B.: *Antriebsstrangerprobung bei der Daimler AG moderne Erprobungsmethodik*. In: *Beiträge 4. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik*. Wiesbaden : AVL und TU Darmstadt, 2011, S. 161-171.
- Pillas 2017 PILLAS, J.: *Modellbasierte Optimierung dynamischer Fahrmanöver mittels Prüfständen*. TU Darmstadt, Institut mechatronische Systeme, Dissertation, 2017.
- Ponn und Lindemann 2008 PONN, J.; LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- Rodenacker 1970 RODENACKER, W. G.: *Methodisches Konstruieren*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1970.
- Schenk 2017 SCHENK, M.: *Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2017.
- Schelling 1799 SCHELLING, F. W. J.: *Einleitung zu einem Entwurf eines Systems der Naturphilosophie*. Jena Leipzig : bey Christian Ernst Gabler, 1799.
- VDI 2206 2021 Richtlinie VDI 2206 November 2021. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*.

Experiment zur digitalen Erfassung anthropometrischer Maße der Hand mittels maschineller Bilderkennung

Experiment on digital anthropometric measurements of the hand using machine vision

Jonathan Kiessling, Michael Tondera, Thomas Maier

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
Jonathan.kiessling@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Im nutzerzentrierten Design von Hand-Produkt-Schnittstellen sind häufig Kenntnisse über die Maße der Hände von Nutzern relevant. Während umfangreiche Datenbanken und digitale Modelle als Hilfsmittel existieren, werden in bestimmten Fällen die akkuraten Daten spezifischer Nutzer benötigt. Diese Arbeit kombiniert ein bestehendes KI-Modul zur Erkennung von von Punkten der Hand mit maschineller Konturerkennung und einem physischen Aufbau. Dadurch wird eine Messmethode für zweidimensionale Oberflächenmaße der Hand vorgestellt. In einem Experiment mit $n = 30$ Probanden wird diese Methode mit dem gängigen Standard, der manuellen Messung mit Messschieber und Gleitzirkel verglichen. Die vergleichende Analyse basiert auf Bland-Altman. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Präzision (geringe Abweichung zwischen den Messungen) bei verbesserungsfähiger Genauigkeit (Abweichungen zu standardisierten Messverfahren). Es werden Vorschläge zur Verbesserung und zur Anwendung der Ergebnisse in Nutzerstudien, CAD-Integration und der Produktgestaltung gegeben.

Keywords (deutsch):

Bilderkennung, KI-Anwendung, Anthropometrische Messung, Experiment, Hand

Abstract (english): In the user-centered design of hand-product interfaces, knowledge of the hand's dimensions is of importance. While extensive databases and digital models exist, accurate measurements of individual users' hands are required in certain cases. Combining an AI-based landmark recognition for hands with contour recognition and a hardware setup, this work introduces a measurement method for two-dimensional hand surface measurements. An experiment with $n = 30$ participants is performed to compare this method to the established standard (manual caliper) in anthropometric measurements following Bland-Altman. As a result, the image-based measurement method shows high precision (small deviation in between measurements) and improvable trueness (deviation from standard measurement method) to achieve accurate measurements. The results can be applied to further improvements of the method, anthropometric surveys, and CAD-integration.

Keywords (english):

Computer vision, AI application, anthropometric measurements, experiment, hand

1 Introduction

In the user-centered design of handles or hand actuated human-machine interfaces, knowledge about the dimensions of users' hands is crucial. The same is true for the design of gloves or hand-held devices. In the following, approaches for acquiring anthropometric dimensions of the hand are described. Dimensions can be read from databases (e.g., DIN 33402-2 2020) or be derived from digital human models, such as RAMSIS (Bullinger-Hoffmann 2016, p. 73 ff.). Also, Kiessling et al. (2022, p. 2117 f.) summarize precise but complex methods for capturing internal hand kinematics. However, quick measurements of hands' surface dimensions are relevant as well: E.g., in subject studies, for comparing individual participants with population groups, and in the design of individualized or adaptive interface and control elements as well as medical applications, such as hand and thumb braces (Manometric 2023). 3D scans are a viable method for hand measurements (DIN EN ISO 20685-1 2018, p. 6) but are sensitive to movements and self-obstructing positioning of small body parts such as fingers. Also, they require time-consuming setup and processing. So, this work aims at finding another simple, reliable, and fast measurement method for the acquisition of two-dimensional hand surface dimensions (lengths and widths).

This paper introduces a software-supported measurement method and describes an experiment in which this tool is compared to a conventional manual measurement method. DIN EN ISO 7250-1 (2017, p. 33 ff.) lists ten measurements of the hand as the basis for defining population groups and designing technical products. Measurements are taken manually using tools (sliding compasses, calipers, and templates) that have been state of the art since 1929 (Rudolf 1929, p. 4 f.). Table 1 lists the methods and tools proposed in the literature for taking these measurements. Greiner et al. (1991) introduced an analogue photo box with digitized image storage. Further literature (Flügel et al. (1986), DIN EN ISO 15536-2 (2007),) propose positioning and capturing aids or digitized physical tools (Tilley et al. (2001)). Zhang et al. (2020) introduced "MediaPipe Hands" as a hand tracking model for virtual reality applications. The software identifies 21 landmarks on the hand surface (Zhang et al. 2020, p. 2). These landmarks can be handled as points in static images, which allows for distance measurements between them. Without more information, these distances are relative only as in Ghanbari et al. (2022). With additional information about image size and real-world scale, absolute dimensions can be derived, e.g. by manually measuring from MediaPipe landmarks to hand contours (Eichinger 2020, p. 64). None of these have so far read hand dimensions automatically from a hand photograph using contour recognition.

With a computer vision-based contour recognition, the whole measurement process can be performed automatically, as proposed in this work. Therefore, the basic methods for the hard- and software setup as well as measurement method comparison are explained. Based on these methods an experiment is conducted. The results are analyzed and discussed before an outlook on potential further work is given.

Table 1: literature proposing methods and tools for anthropometric measurements (of the hand)

Literature	Measurement methods and tools
DIN EN ISO 7250-1 2017 (2017), Rudolf (1929)	Manual with calipers, templates
US military, Greiner et al. (1991)	Photo box, analog film, digitized database
Flügel et al. (1986)	Calipers, templates, positioning aids
Dreyfuss: Tilley et al. (2001)	Caliper, proposes digital caliper connected to database
DIN EN ISO 15536-2 (2007)	Motion capturing with points and DIN EN ISO 7250
SizeGERMANY (2009), DIN EN ISO 20685-1 (2018)	3D scans
Eichinger (2020)	MediaPipe with manual measurement
Ghanbari et al. (2022)	Relative dimensions, MediaPipe w/ cropped background

2 Methods

This work focusses on three main methodological approaches:

- An experiment setup combining hardware and software is built to measure dimensions of participants' hands
- An experimental software for static image hand anthropometric measurements is created
- The software based and manual measurement methods are compared following the systematic approach for the comparison of two measurement methods by Bland and Altman (1999).

2.1 Hardware setup

Similar to Greiner et al. (1991, p. 9–13), the hardware setup contains a camera in a fixed frame and a black background with the palm facing the camera. The black background allows for a high contrast with different skin tones of the hand. To assure consistent positioning of the hands, the participant's distal forearm is placed on a soft silicone interface. The hand is positioned in front of the background without physically touching the aluminum profile frame. Thus, deformations of the hand's surface are avoided. The camera takes photos in a 1920x1080 points resolution and is centered in a fixed distance of $s = 320.00$ mm to the hand and two 100.00 mm scales on the frame. The scales are oriented horizontally and vertically. Depending on the image size and scale size the scale factor is triangulated, to translate point distance into mm measurements. The described hardware setup is shown in Figure 1, including a laptop for storing the images and running the software. The combination of hard- and software is further referred to "Computer Vision System" (CVS).

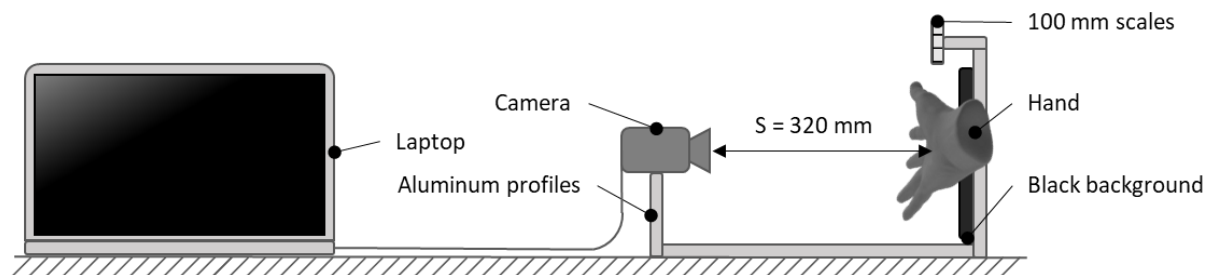


Figure 1: Experiment setup with participant's hand and hardware components

2.2 Software

The static hand measurements software's architecture is shown in Figure 2. It takes hand images as an input as well as hardware specific image size and scale factor. The operating researcher sets the sensibility of the contour recognition via threshold and indicates the desired measurements. These measurements are provided as a csv-list (data format, "comma-separated values") output for each processed image, which can easily be imported into e.g., computer-aided design (CAD) or statistics software. Additionally, annotated images with visible measurement landmarks points are exported, see Figure 3. The main software is implemented Python 3.10 and includes the static MediaPipe Hands module from Zhang et al. (2020), available at Google (2022). This module identifies 21 landmarks on the palm side of the hand. These are located on the joints of the hand, at the fingertips, and at the wrist. Their x and y coordinates are saved. The contour recognition module from the open source library OpenCV (2022) is implemented to find the hand's contours against the black background. Following Mallick (2021) and OpenCV (2022), the image is converted to gray scale. Each point in the image then contains its x- and y-coordinates and gray value between 0 and 1. The image resolution is blurred with 3x3 points to avoid contour recognition of small creases on the hand. The threshold is adapted by the researcher to adapt object recognition to lighting.

The measurements are numbered in Figure 3. From the middle fingertip point the finger center line is extended incrementally until it intersects the contour (Figure 3 (1)). The palm length is measured from the wrist point to the metacarpophalangeal joint of the middle finger (MCP_3), as seen in Figure 3 (2).

From the metacarpophalangeal (MCP_2 and 5) joints of index and little finger a line is extended bidirectionally until intersection with the contours (Figure 3 (3)). Similarly, a perpendicular to the finger center line, intersection points are identified at the index finger distal joint (Figure 3 (4)). Distances between intersection and joint points are converted from image point to mm dimension using the scale factor.

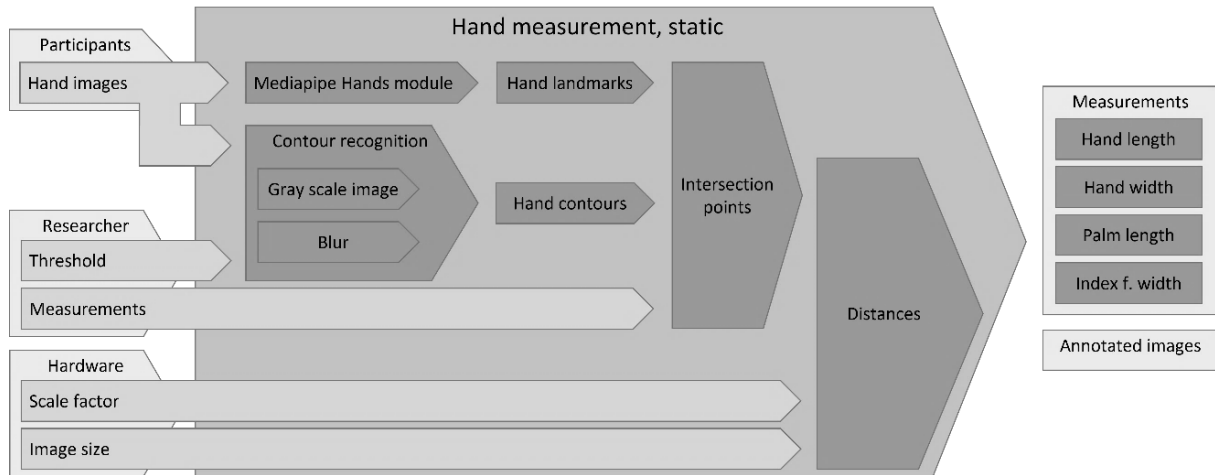


Figure 2: Software architecture with in- and outputs

2.3 Measurement method comparison

ISO 5725-1 (1997, p. 11) defines a measurement method's accuracy as combination of precision (variance around a measured mean) and trueness (proximity to the true value). Both, precision, and trueness, of the CVS in comparison to manual measurements are examined in chapter 4. The CVS's measurement's precision is analyzed descriptively. Thus mean values, variance, and standard deviation (SD) are described internally, following (Albert and Marx 2016, p. 111–118). Bland and Altman (1999) propose a method for the comparison and evaluation of two measurement methods in the context of clinical trials. The manual caliper standard method following DIN EN ISO 7250 2017 (2017, p. 33–35) is considered the gold standard, which still can include measuring errors. Therefore, the new CVS measurement is compared to standard measurement methods by their deviations from each other. First the standard error of each participant's measurement is calculated using the equation (1).

$$\text{standard error}_i = \text{measurement}_{CVSi} - \text{measurement}_{manuali} \quad (1)$$

The error's standard deviation is tested for normal distribution using the Shapiro-Wilk test (Shapiro and Wilk 1965). The test results in a test statistic $0 \leq W \leq 1$ and probability $0 \leq p \leq 1$. If the standard distribution is normally distributed, the 95 % confidence interval including the measurements can be calculated using equation (2). It limits the range in which deviations of both measurement methods will lie with a probability of 95 %.

$$95 - CI = \text{mean}(\text{standard error}) \pm 1.96 * SD(\text{standard error}) \quad (2)$$

Further, the measurement methods can be compared graphically: first, by mapping the standard error over the mean value. Second, the two measurements' values can be mapped on two dimensions and their linear regression is compared to the line of equality. This shows how close the two measurement methods are to measuring equally. (Bland and Altman 1999, p. 140–149) For 3D scans, DIN EN ISO 20685-1 (2018, p. 11) limits acceptable deviations between scanned and manually measured hands to ± 1.00 mm. This quality standard is transferred to evaluate the CVS's measurements. All described methods are applied in the following experiment and the analysis of its results.

3 Experiment

To compare the CVS with the gold standard for measuring hand dimensions – manual measurement with a caliper (DIN EN ISO 7250 2017, p. 33–35) – a within-subject design experiment is conducted.

From a sample size of $n = 30$ participants, four measurements are taken, as seen in Figure 3:

- hand length,
- palm length,
- hand width and
- distal index finger width.

Hand length and hand width are chosen as the main dimensions of the hand. The palm length can complement the hand width to measure the palm surface. The distal index finger width serves as example for a comparatively small measurement.

First, the measurements are taken with a caliper with the wrist crease and the proximal middle finger crease as easily visually recognizable landmarks. Second, $n_m = 30$ photos per hand are taken of each participant's hand in the CVS. Positioning changes in the x-y plane are accepted if the distance to the camera is kept. The pictures are saved and analyzed using the software, described in chapter 2.2. Furthermore, the time required to take the measurements is recorded and the annotated images are stored.

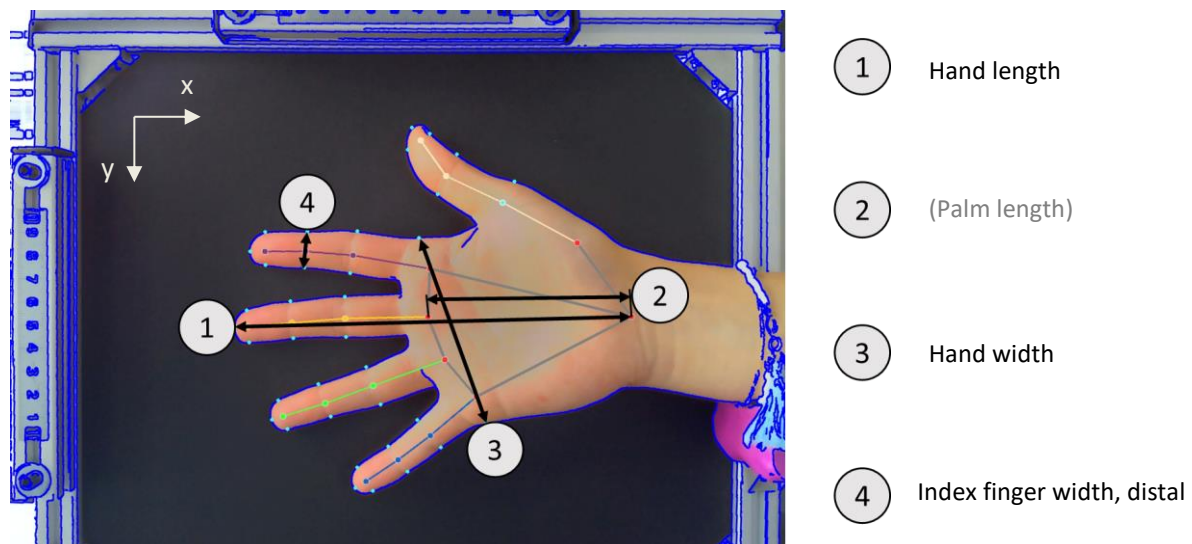


Figure 3: Output image with hand landmarks, contours, contour points, and indicated measurements

4 Results

First, measuring and recording the measurements manually requires 90 seconds on average, whereas the 30 photos are taken in less than 10 seconds. Since the photos are analyzed by the software without the researcher's involvement, they are free to conduct other research activities in that time.

The software measures the palm length from the wrist point to the MCP_3 joint of the middle finger, whereas manual measurement uses the proximal middle finger crease (DIN EN ISO 7250 2017, p. 33). Since this is not the same distance, the measurement is not valid and excluded from further analysis. Further, the results include 900 annotated images that include the identified contours and points for additional measurements, as shown in Figure 3. Therefore, the following analyses are applied to the three remaining measurements (hand length, hand width, and distal index finger width).

4.1 Descriptive analysis

The location and dispersion parameters of the three CVS measurements are shown in the tables 3 to 5 and visualized in Figures 4 to 6 (b). The tables list the internal descriptive parameters for each measurement individually. The mean values result from measuring the $n_m = 30$ photos per participant. For each participants the standard deviation (SD) is derived. The mean deviation for each measurement is calculated as the mean of all participants' standard deviations. All these internal mean deviations of the CVS measurements lie within the quality standard ± 1.00 mm borders applied to anthropometric measurements using 3D scanners.

Additionally, since the standard deviations are low compared the measured means and similar in magnitude for all three hand dimension measurement, the CVS's measurements can be described as precise, following (ISO 5725-1 1997, p. 11). Since internal descriptive analysis allows for precision evaluation only, trueness must be evaluated in the following, to evaluate the overall accuracy of the CVS' measurements.

4.2 Measurement method comparison following Bland-Altman

To evaluate the CVS measurements' trueness, they are compared to the standard manual measurements following Bland and Altman (1999, p. 140–149). Normal distribution is a requirement and is given for all three measurements' standard errors, as shown in Table 2.

Table 2: Shapiro-Wilk test for standard error normal distribution and 95 % confidence interval (95-CI)

	std. error [mm]	SD [mm]	W	p	ND	95-CI [mm]
hand length	-5.78	8.21	0.96196	0.34732	yes	-5.78 \pm 16.09
hand width	3.59	4.78	0.9775	0.75577	yes	3.59 \pm 9.37
index finger width, distal	0.13	1.21	0.93634	0.07252	yes	0.13 \pm 2.37

The 95-CI, containing the majority of the expected errors, is generally large compared to the measured values.

Figures 4 to 6 (a) show the standard errors over the mean of manual and CVS measurements. They visualize how close the two measurement methods are depending on the measured value. Tables 3 to 5 include these values under "Comparison". For all three measurements, there is a maximum of one outlier outside of the 95 % confidence interval (95-CI). Most errors lie within the 95-CI, while the variance is mainly outside the ± 1.00 mm borders (DIN EN ISO 20685-1 2018, p. 11), except for the distal index finger width. The standard errors seem to be equally distributed around the two methods' mean, indicating no correlation with the hands' sizes.

In Figures 4 to 6 (b), the manual and CVS measurement methods are compared by visualization on the y- and x-axis respectively. The diagonal line of equality ($y = x$) shows the ideal case, in which both methods measure the same values equally. Above the line of equality, the CVS method measures hand parameters larger than the manual measurement method. Below the line it is the other way round. The measurements are shown with their means and standard deviations to emphasize the aforementioned description of location and dispersion of each individual measurement.

The linear regression with equations given in Figures 4 to 6 (b), show the overall trend of the whole sample for each measured hand parameter comparison. There, differences between the three measured hand parameters are observed in the following.

For the hand length, the linear regression is close to parallel to the line of equality, see Figure 4 (b). The standard deviations are small in comparison to the measured value and close to equal for different hand lengths. The standard error between the two methods is largest for all three measurements as well as the 95-CI, as seen in Figure 4 (a).

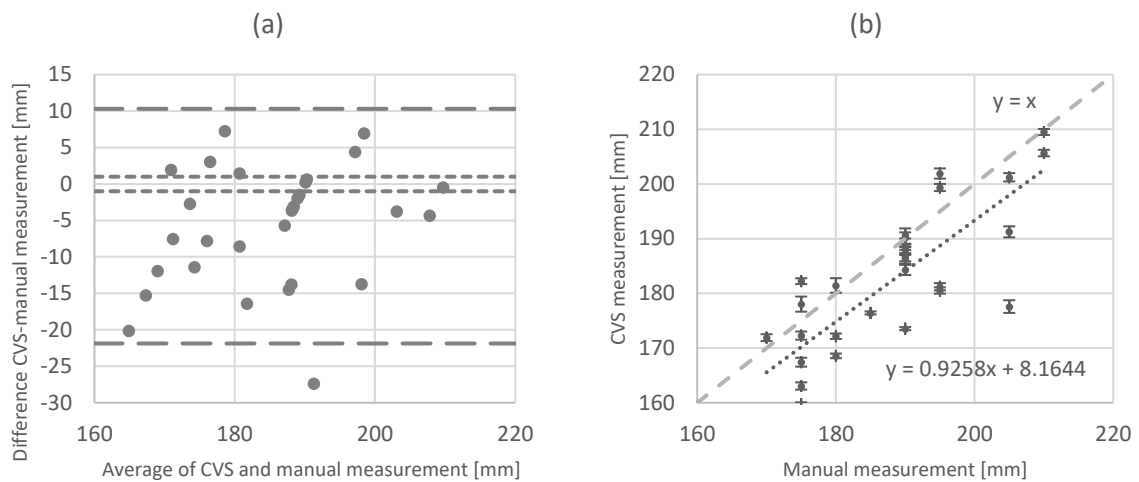


Figure 4: Hand length – Bland-Altman plot with ± 1.00 mm borders and 95-CI (a) and CVS over manual measurement with linear regression line and equation, and line of equality (b)

Table 3 includes the descriptive CVS measurements for the internal analysis, the manual measurements, and the standard error as well as the mean of both measurement methods for the Bland-Altman plot for each participant’s hand length.

Table 3: Hand length, CVS and manual measurement comparison

Participant	Hand length					Manual meas. [mm]	Comparison for Bland-Altman	
	Mean [mm]	SD [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Range [mm]		Std. error [mm] (y-axis)	Diff. Mean [mm] (x-axis)
1	177.59	1.15	175.90	179.87	3.98	205.00	-27.41	191.29
2	190.60	0.56	189.65	191.71	2.07	190.00	0.60	190.30
3	186.35	0.92	184.09	187.66	3.57	190.00	-3.65	188.17
4	190.23	1.65	188.23	196.10	7.87	190.00	0.23	190.11
5	167.42	0.82	165.97	169.30	3.33	175.00	-7.58	171.21
6	186.59	0.74	185.30	187.96	2.65	190.00	-3.41	188.30
7	159.71	0.37	159.06	160.48	1.42	175.00	-15.29	167.35
8	205.66	0.59	204.74	207.64	2.89	210.00	-4.34	207.83
9	201.92	0.93	200.18	203.36	3.17	195.00	6.92	198.46
10	201.23	0.76	198.89	202.82	3.93	205.00	-3.77	203.11
11	173.55	0.27	173.04	174.12	1.08	190.00	-16.45	181.78
12	154.85	0.27	154.16	155.42	1.26	175.00	-20.15	164.92
13	181.44	1.33	179.53	184.05	4.53	180.00	1.44	180.72
14	186.88	1.55	183.67	189.22	5.55	190.00	-3.12	188.44
15	199.36	0.65	198.19	200.81	2.62	195.00	4.36	197.18
16	191.25	1.01	189.61	193.18	3.56	205.00	-13.75	198.12
17	178.03	1.38	175.65	180.72	5.06	175.00	3.03	176.52
18	184.29	0.94	182.67	185.64	2.97	190.00	-5.71	187.15
19	181.21	0.66	179.67	182.08	2.41	195.00	-13.79	188.11
20	176.42	0.28	175.49	176.93	1.43	185.00	-8.58	180.71
21	172.28	0.74	171.04	173.48	2.44	175.00	-2.72	173.64
22	188.00	0.99	186.64	189.84	3.20	190.00	-2.00	189.00
23	171.90	0.63	170.50	173.03	2.52	170.00	1.90	170.95
24	188.49	0.58	187.40	189.61	2.22	190.00	-1.51	189.25
25	163.07	0.66	161.55	163.99	2.44	175.00	-11.93	169.03
26	209.50	0.56	208.16	210.61	2.45	210.00	-0.50	209.75
27	168.57	0.42	167.84	169.45	1.61	180.00	-11.43	174.29
28	182.23	0.53	181.14	183.30	2.16	175.00	7.23	178.62
29	172.16	0.50	171.22	173.21	2.00	180.00	-7.84	176.08
30	180.52	0.57	179.69	181.93	2.23	195.00	-14.48	187.76
Overall means		0.77			2.95		-5.79	

The hand width tends to be measured larger by the CVS compared to manual measurements. The hand width linear regression line nears the line of equality for larger hands, as seen in Figure 5 (b). So, for larger hands the difference between the two measuring methods is smaller. While the 95-Cl for errors is smaller than the one for the hand length, it is still considerably large compared to the underlying measurement, see Figure 5 (a). All except one participant's measurements fit within.

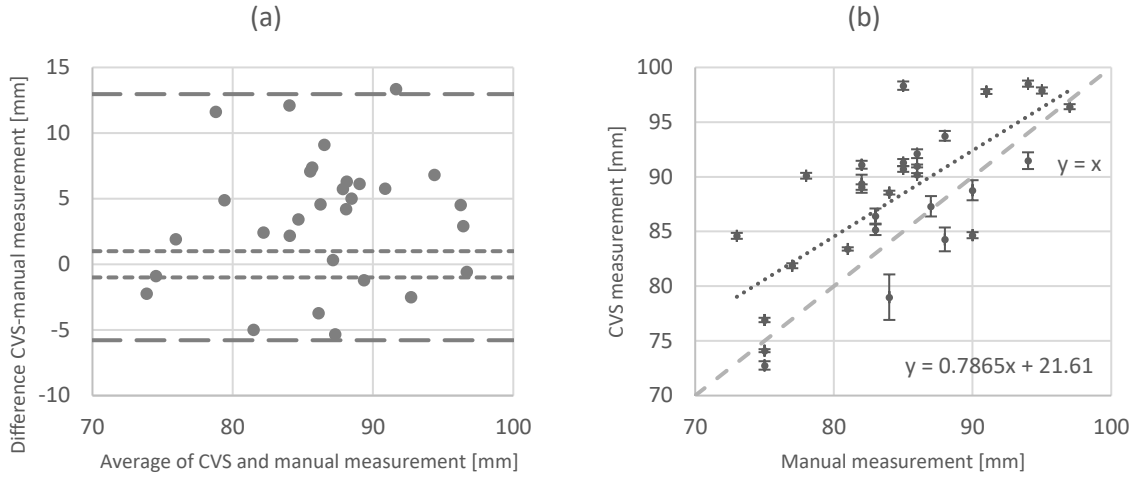


Figure 5: Hand width – Bland-Altman plot with ± 1.00 mm borders and 95-Cl (a) and CVS over manual measurement with linear regression line and equation, and line of equality (b)

Table 4 includes the descriptive CVS measurements for the internal analysis, the manual measurements, and the standard error as well as the mean of both measurement methods for the Bland-Altman plot for each participant's hand width.

Table 4: Hand width, CVS and manual measurement comparison

Participant	Hand width					Manual meas. [mm]	Comparison for Bland-Altman	
	Mean [mm]	SD [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Range [mm]		Std. error [mm] (y-axis)	Diff. Mean [mm] (x-axis)
1	88.77	0.92	85.45	90.08	4.63	90.00	-1.23	89.39
2	90.72	0.27	90.00	91.41	1.40	85.00	5.72	87.86
3	91.30	0.33	90.47	91.82	1.35	85.00	6.30	88.15
4	89.37	0.83	85.97	90.79	4.82	82.00	7.37	85.68
5	81.87	0.23	81.38	82.26	0.88	77.00	4.87	79.43
6	92.11	0.40	91.43	92.84	1.42	86.00	6.11	89.06
7	76.91	0.20	76.34	77.19	0.85	75.00	1.91	75.96
8	97.79	0.22	97.12	98.19	1.06	91.00	6.79	94.40
9	98.33	0.38	97.52	98.88	1.36	85.00	13.33	91.67
10	97.89	0.28	96.78	98.20	1.41	95.00	2.89	96.44
11	84.66	0.28	84.18	85.36	1.17	90.00	-5.34	87.33
12	74.10	0.14	73.85	74.43	0.58	75.00	-0.90	74.55
13	90.99	0.13	90.68	91.29	0.61	86.00	4.99	88.50
14	85.16	0.49	84.46	86.74	2.29	83.00	2.16	84.08
15	90.19	0.15	89.92	90.54	0.62	86.00	4.19	88.09
16	91.48	0.77	89.99	92.39	2.40	94.00	-2.52	92.74
17	86.41	0.69	85.17	87.50	2.32	83.00	3.41	84.71
18	84.28	1.09	82.42	87.09	4.67	88.00	-3.72	86.14
19	89.06	0.25	88.42	89.65	1.23	82.00	7.06	85.53
20	83.40	0.15	83.05	83.66	0.61	81.00	2.40	82.20
21	87.31	0.93	85.77	88.53	2.77	87.00	0.31	87.15
22	96.41	0.23	95.94	96.76	0.82	97.00	-0.59	96.71
23	90.10	0.27	89.36	90.43	1.07	78.00	12.10	84.05
24	93.75	0.45	92.62	94.51	1.89	88.00	5.75	90.87
25	72.75	0.38	71.65	73.32	1.67	75.00	-2.25	73.88
26	98.52	0.28	97.86	99.07	1.21	94.00	4.52	96.26
27	84.60	0.27	84.04	85.12	1.08	73.00	11.60	78.80
28	88.56	0.17	88.27	88.93	0.65	84.00	4.56	86.28
29	79.00	2.08	76.25	82.05	5.80	84.00	-5.00	81.50
30	91.10	0.36	90.40	91.98	1.58	82.00	9.10	86.55
Overall means		0.45			1.81			3.53

The distal index finger width regression line intersects the line of equality with a lower gradient. This emphasizes again, how the distal index finger width measurements provide the highest accuracy, both in precision and trueness.

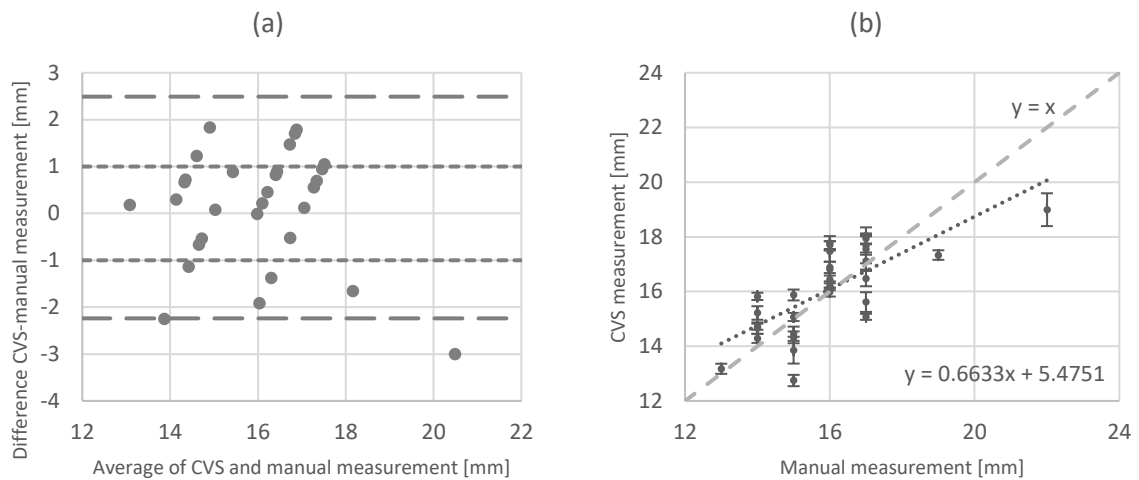


Figure 6: Index finger width, distal – Bland-Altman plot with ± 1.00 mm borders and 95-CI (a) and CVS over manual measurement with linear regression line and equation, and line of equality (b)

Table 5 includes the descriptive CVS measurements for the internal analysis, the manual measurements, and the standard error as well as the mean of both measurement methods for the Bland-Altman plot for each participant’s distal index finger width.

Table 5: Index finger width, distal, CVS and manual measurement comparison

Participant	Index finger width, distal					Manual meas. [mm]	Comparison for Bland-Altman	
	CVS measurements						Std. error [mm] (y-axis)	Diff. Mean [mm] (x-axis)
	Mean [mm]	SD [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Range [mm]			
1	15.61	0.36	14.76	16.16	1.40	17.00	-1.39	16.31
2	16.44	0.14	16.16	16.63	0.47	16.00	0.44	16.22
3	17.70	0.14	17.47	17.93	0.46	16.00	1.70	16.85
4	16.82	0.68	16.33	20.23	3.90	16.00	0.82	16.41
5	14.66	0.21	14.32	14.99	0.67	14.00	0.66	14.33
6	16.21	0.16	15.88	16.56	0.68	16.00	0.21	16.11
7	12.75	0.21	12.40	13.10	0.69	15.00	-2.25	13.87
8	17.94	0.18	17.47	18.17	0.70	17.00	0.94	17.47
9	17.46	0.38	16.78	18.34	1.56	16.00	1.46	16.73
10	17.33	0.17	16.79	17.68	0.89	19.00	-1.67	18.17
11	15.08	0.11	14.99	15.23	0.24	17.00	-1.92	16.04
12	14.29	0.17	13.98	14.68	0.69	14.00	0.29	14.14
13	17.11	0.31	16.13	17.72	1.59	17.00	0.11	17.06
14	13.86	0.49	12.98	14.82	1.85	15.00	-1.14	14.43
15	17.78	0.25	16.85	18.01	1.16	16.00	1.78	16.89
16	18.04	0.31	17.52	18.61	1.09	17.00	1.04	17.52
17	15.22	0.25	14.81	15.74	0.93	14.00	1.22	14.61
18	17.68	0.34	16.99	18.14	1.15	17.00	0.68	17.34
19	16.47	0.28	15.88	16.80	0.92	17.00	-0.53	16.74
20	14.71	0.11	14.54	14.99	0.45	14.00	0.71	14.36
21	17.55	0.52	16.40	18.21	1.80	17.00	0.55	17.28
22	18.99	0.60	17.92	20.14	2.23	22.00	-3.01	20.50
23	14.46	0.26	13.76	14.90	1.14	15.00	-0.54	14.73
24	16.88	0.21	16.55	17.29	0.74	16.00	0.88	16.44
25	13.18	0.18	12.75	13.65	0.90	13.00	0.18	13.09
26	15.98	0.16	15.71	16.33	0.62	16.00	-0.02	15.99
27	15.82	0.13	15.67	16.11	0.44	14.00	1.82	14.91
28	15.07	0.15	14.85	15.32	0.47	15.00	0.07	15.03
29	15.87	0.20	15.25	16.16	0.91	15.00	0.87	15.44
30	14.33	0.22	13.88	14.78	0.89	15.00	-0.67	14.66
Overall means		0.26			1.05		0.11	

5 Discussion

While the internal precision of the CVS measurements is high (small ranges and low standard deviations, small number of outliers from the 95-CI), the comparison with the standard manual measurement method shows improvable trueness. The match between the two methods should and could be improved. Most measurements' standard errors are inside the 95-CI, which shows high precision. Still, the 95-CI borders are too widely spread for high accuracy. While the finger measurements are mostly within the normed ± 1.00 mm borders, the larger measurements show significantly larger standard error deviations. Since the same standard border was applied to all measurements, relative borders comparable to the sized-dependent manufacturing tolerances in ISO 2768-1 1991 (1991) should be considered. The overall trends of the hand length measurements imply a systematic parallel shift from equal measurements. By analyzing the output images, different wrist landmarks are identified as a potential cause: while the manual measurements are taken from the wrist crease landmark following DIN EN ISO 7250-1 2017 (2017) procedure, the CVS identifies the point as a joint landmark more distal and closer to the palm, see Figure 3 (2). This results in the mean difference of -5.78 mm between CVS and manual measurements. However, joint identification allows for kinematic modelling of the measured hands, which provides advantages for varying hand postures and movements. The differences in hand width measurement can stem from the hand's position inside the CVS, widely spread fingers result in a higher hand width, and from the manual procedure. Since the caliper touches the hand, deformations of the skin surface can occur even when measuring carefully resulting in lower values. This is less severe for wider hands.

The experiment shows limitations in the lack of repetitive manual measurements and documentation of deviations, however since it follows DIN EN ISO 7250 2017 (2017, p. 33–35) standard procedure it is still considered a valid measurement process. The CVS is calibrated using the hardware scales, point to mm conversion, and hardware calibration. Still radial lens distortion effects might influence the results and should be considered further (Zhang 1999, p. 13–14). Further, the need for the hardware setup itself can be considered a limitation and be replaced (Suwajanakorn et al. 2015).

Still, the CVS measurement method allows for faster and precise measurements without the need for immediate physical contact. It is independent from the measuring researcher or differing researchers, therefore providing higher objectivity. Since the annotated output images are saved, time delayed analysis such as manual measurements using other software tools is possible, as shown in the identification of the wrist crease landmark point difference.

6 Conclusion and outlook

In conclusion, this work introduces a precise anthropometric measurement method with improvable trueness. Camera-based measuring of hand dimensions is realized objectively independent from the measuring researcher in a repeatable manner. The method is fast, touchless, and allows for further measurements using the taken photos. However, there is need for improving the validity of the standard measurements. Landmark and intersection point choice should be further validated to allow for measuring the same exact measurements as DIN EN ISO 7250-1 (2017, p. 33 ff.). Further, hand positioning and lens distortion should be examined. Also, the experiment could be applied to the comparison of repeated standard manual, 3D scan-, and CVS-based hand measurement methods. The hardware setup could be replaced by software altogether or be extended with more cameras to achieve stereo, 3D views or multiple perspectives for self-obstructing hand positioning. The difference in between multiple researchers performing the same measurement should be investigated to complement the measurement method comparison described here.

Despite the limitations, the shown measurement method can potentially be applied to anthropometric surveys, the csv-list of the results can be directly imported into CAD software. There, the results can support the design of hand-product interfaces or textiles, such as gloves, hand-held tools or medical applications. Further, the CVS can be extended by more hand parameters than the ones examined in this work and supports kinematic hand modelling in CAD for different postures and hand gestures.

Acknowledgement

Funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation): Universal Design for adaptive handles for adjustment to specific operating scenarios - New effective principles enabled by additive manufacturing; project no.: 452009430

Literature

- Albert and Marx 2016 ALBERT, Ruth; MARX, Nicole: *Empirisches Arbeiten in Linguistik und Sprachlehrforschung: Anleitung zu quantitativen Studien von der Planungsphase bis zum Forschungsbericht*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Tübingen: Narr Francke Attempto Verlag, 2016.
- Bland and Altman 1999 BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G.: *Measuring agreement in method comparison studies*. In: *Statistical methods in medical research* 8 (1999), Nr. 2, p. 135–160
- Bullinger-Hoffmann 2016 BULLINGER-HOFFMANN, Angelika C.: *Homo sapiens digitalis - virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- DIN 33402-2 2020 Norm DIN 33402 Teil 2 Dezember 2020: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte
- DIN EN ISO 15536-2 2007 DIN EN ISO 15536 Teil 2 Januar 2007: *Ergonomie – Computer-Manikins und Körperumriss-Schablonen*: Teil 2: Prüfung der Funktionen und Validierung der Maße von Computer-Manikin-Systemen.
- DIN EN ISO 7250-1 2017 Norm DIN EN ISO 7250 Teil 1 Dezember 2017: Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte
- DIN EN ISO 20685-1 2018 DIN EN ISO 20685 Teil 1 März 2018: *3D-Scanverfahren für international kompatible anthropometrische Datenbanken*: Teil 1: Prüfprotokoll für aus 3D-Scans extrahierte Körpermaße.
- Eichinger 2020 EICHINGER, Paul: *Entwicklung einer Prozesskette zur automatisierten Produktherstellung von personalisierten Computermäusen*. Universität Stuttgart. Master Thesis, 2020.
- Flügel et al. 1986 FLÜGEL, Bernd; GREIL, Holle; SOMMER, Karl: *Anthropologischer Atlas: Grundlagen und Daten; Deutsche Demokratische Republik*. 1. Aufl., Lizenzausg. Frankfurt/Main: Edition Wötzel, 1986.
- Ghanbari et al. 2022 GHANBARI, Sara; ASHTYANI, Zahra Parvin; MASOULEH, Mehdi Tale: User Identification Based on Hand Geometrical Biometrics Using Media-Pipe. In: *2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)* : IEEE, 2022,
- Google 2022 GOOGLE: *MediaPipe Hands*. in <https://google.github.io/mediapipe/solutions/hands>, 2022, zuletzt aufgerufen: 16.01.2023.

- Greiner et al. 1991 GREINER, Thomas M.; WAGNER, Kurt (Mitarb.); DEASON, Vance (Mitarb.): *Hand anthropometry of US army personnel*. U.S. Army Natick Research, Development & Engineering Center, Natick, MA: Anthropology Branch, Behavioral Sciences Division, Soldier Science Directorate, 1991,
- ISO 2768-1 1991 ISO 2768 Teil 1 Juni 1991: *Allgemeintoleranzen: Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*.
- ISO 5725-1 1997 ISO 5725 Teil 1 November 1997: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results: Part 1: General principles and definitions.
- Kiessling et al. 2022 KIESSLING, Jonathan Max; HILBIG, Karl Otto; DINKEL, Johanna; SCHMID, Markus; MAIER, Thomas und VIETOR, Thomas: Exploratory Analysis of Adaptively Morphing Handle Forms for Load Transfer Use Cases. In: *Proceedings of the Design Society*, (2022), Nr. 2, 2117-2126.
- Mallick 2021 MALLICK, Satya: Contour Detection using OpenCV (Python/C++). in <https://learnopencv.com/contour-detection-using-opencv-python-c/>, 2021, zuletzt aufgerufen: 06.07.2022.
- Manometric 2023 MANOMETRIC: Products: Personalized hand and thumb braces. in <https://www.manometric.nl/en/products/>, 2023, zuletzt aufgerufen: 18.04.2023.
- OpenCV 2022 OPENCV: OpenCV: Contour Features. in https://docs.opencv.org/3.4/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html, 2022, zuletzt aufgerufen: 06.07.2022.
- Rudolf 1929 RUDOLF, Martin: *Instrumentarium in Anthropometrie*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1929. S. 3-6.
- Shapiro and Wilk 1965 SHAPIRO, S. ; WILK, M.: *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. In: *Biometrika* 52 (1965), 3-4, P. 591–611.
- SizeGERMANY 2009 SIZEGERMANY 2009: iSize - News & Events - Blog - SizeGERMANY – die wichtigsten Zahlen & Fakten. URL <https://www.avalution.net/de/news-events/blog/sizegermany.html>. zuletzt aufgerufen: 16.01.2023.
- Suwajanakorn et al. 2015 SUWAJANAKORN, Supasorn; HERNANDEZ, Carlos; SEITZ, Steven M. Depth from focus with your mobile phone. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. (2015) S. 3497-3506.
- Tilley et al. 2001 TILLEY, ALVIN R., et al. *The measure of man and woman: human factors in design*. John Wiley & Sons, 2001.
- Zhang 1999 ZHANG, Zhengyou: Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: *The proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision: September 20 - 27, 1999, Kerkyra, Greece*. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society, 1999, 666-673 vol.1.
- Zhang et al. 2020 ZHANG, Fan; BAZAREVSKY, Valentin; VAKUNOV, Andrey; TKACHENKA, Andrei; SUNG, George; CHANG, Chuo-Ling und GRUNDMANN, Matthias: Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking. (2020) *arXiv preprint arXiv:2006.10214*.

Technologianwendungen für PUX entwickeln – das PUX-Potenzial-Framework

Developing technology applications for positive user experiences – the PUX Potential Framework

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Doreen Engelhardt², Denise Pottin¹, Andreas Beskid¹, Matthias Peissner³

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Stuttgart
Valeria.bopp-bertenbreiter@iat.uni-stuttgart.de, name@iao.fraunhofer.de

²Audi AG, 85057 Ingolstadt
name@audi.de

³Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 70569 Stuttgart
matthias.peissner@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Im Wettbewerb um die Kund*innen werden positive Nutzungserlebnisse (PUX) im Fahrzeug immer relevanter. Hierfür sollten PUX möglichst früh im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden. Etablierte Methoden aus dem Experience Design setzen am Nutzer oder bei Produktprototypen an, um PUX zu ermöglichen. So werden Technologien als Innovationstreiber nicht systematisch berücksichtigt, ihr Potenzial für PUX nicht ausgeschöpft oder bewertet. Daher haben wir die Methode „*PUX-Potenzial-Framework*“ entwickelt, um möglichst konkrete Ideen für PUX mit einer Technologie bei ihrer Anwendung bei einer Nutzeraktivität zu generieren. Die Methode nutzt eine Erlebniskontext- und Aufgabenanalyse (Haspel et al. 2020), den Bedürfnisansatz (Hassenzahl et al. 2010) und leitet PUX-Ideen für die Technologiefunktionen ab.

Die Methode wurde in 8 Praktikums- und 7 Gruppen in der Industrie angewandt und evaluiert. Alle Gruppen konnten mit der Methode 6-15 PUX-Ideen generieren. Die Methode wurde auf einem standardisierten UX-Fragebogen positiv bewertet. Stärken, Schwächen und Verbesserungsvorschläge der Anwender*innen werden berichtet und im Ausblick für die nächste Iteration der Methode diskutiert.

Keywords (deutsch):

PUX, Technologianwendung für positive UX, Technologiepotenzial, Ideation

Abstract (english): In the competition for customers, the relevance of positive user experiences (PUX) in the vehicle increases. PUX should therefore be considered as early as possible in the product development process. Established methods from Experience Design start with the user or product prototypes to enable PUX. Thus, technologies as innovation drivers are not systematically considered, their potential for PUX is not exploited nor evaluated. Therefore, we developed the "PUX Potential Framework" method to generate the most concrete ideas possible for PUX with a technology when it is applied for a specific user activity. The method uses an experience context and task analysis (Haspel et al. 2020), the needs approach (Hassenzahl et al. 2010), and derives PUX ideas for technology functions.

The method was applied and evaluated with 8 university internship and 7 industry groups. All groups were able to generate 6-15 PUX ideas using the method. The method was positively evaluated on a standardized UX questionnaire. Strengths, weaknesses, and suggestions for improvement of the users are reported and discussed for the next iteration of the method in the outlook.

Keywords (english):

Positive User Experience, Technology application for positive UX, Technology potential, Ideation

1 Einleitung

Die Relevanz positiver Nutzungserlebnisse (=PUX) im Fahrzeug als Wettbewerbsfaktor nimmt zu, sie werden im technologiegetriebenen Produktentwicklungsprozess (PEP) von Fahrzeugen bislang nicht systematisch ermöglicht (Rittger und Schrader 2021). Bisherige Ansätze zur Gestaltung für PUX im Fahrzeug setzen häufig am Nutzer an (Frison und Riener 2021), die systematische Analyse von Technologien und ihrem Potenzial, bei Anwendung im Fahrzeug PUX zu ermöglichen, findet daher nicht statt. Eine vollständig nutzerzentrierte Entwicklung gestaltet sich in der Automobilbranche als schwierig, da die Ingenieur*innen einen technologiezentrierten PEP gewohnt sind und bei Zeitdruck in diesen zurückfallen (Frison und Riener 2021). Zudem wird dann das Innovationspotenzial neuartiger Technologien, auch für PUX, nicht systematisch genutzt.

Es sind Methoden notwendig, die sowohl Technologien als auch Nutzer*innen berücksichtigen, um PUX zu ermöglichen. Einen Ansatz zur systematischen Identifizierung von Potenzialen für PUX bietet die Erlebnispotenzialanalyse. Sie untersucht, inwiefern ein vorhandenes Produkt Potenzial für PUX besitzt, und identifiziert es systematisch. Hierfür wird zunächst eine Nutzungskontextanalyse durchgeführt. Dann wird ein Fragebogen zu Erlebniskategorien eingesetzt, um für die Schritte einer Aufgabe mögliche PUX aufzudecken. Erlebniskategorien sind Blaupausen von PUX in einem bestimmten Kontext. (Haspel et al. 2020). Die Erlebnispotenzialanalyse ist eine vielversprechende Methode, um systematisch Potenziale für PUX zu identifizieren, funktioniert allerdings nur für bestehende Produkte und Kontexte, für die Erlebniskategorien durch aufwändige Erlebnisinterviews gebildet wurden, nicht für Technologien.

Der Beitrag beschreibt daher die Entwicklung einer Methode in Anlehnung an die Erlebnispotenzialanalyse, die frühzeitig im PEP das Potenzial einer Technologie für PUX bei Anwendung bei einer bestimmten Nutzeraktivität systematisch identifiziert. Neben der Vorstellung des Methodenbausteins enthält der Beitrag dessen Evaluation durch die Anwender*innen.

2 Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt Ansätze vor, um Potenziale für PUX zu identifizieren und Ideen für PUX bei einer bestimmten Nutzeraktivität zu entwickeln. Ansätze zur Entwicklung von Ideen für PUX, die durch die Anwendung einer konkreten Technologie bei einer konkreten Nutzeraktivität ermöglicht werden, konnten wir in der Literatur nicht identifizieren.

Verschiedene Ansätze des Experience Design nutzen den Bedürfnisansatz, um den Nutzer*innen PUX zu ermöglichen. Dieser geht davon aus, dass die Erfüllung menschlicher Grundbedürfnisse in einem positiven Gefühlseindruck resultiert. Wird dieser dem Produkt oder System zugeschrieben, so entsteht ein PUX (Hassenzahl et al. 2010). Ansätze hierzu identifizieren z.B. Muster von PUX in bestimmten Kontexten, abstrahieren diese und versuchen sie, auf neue Kontexte zu übertragen (Hassenzahl et al. 2013). Andere Studien versuchen gezielt, ein Bedürfnis in bestimmten Kontexten wie z.B. dem Fahrzeug erfüllen und nutzen die Bedürfnisse als Gestaltungsgrundlage und Ziel (Eckoldt et al. 2013). Für unsere Methode übernehmen wir die Bedürfnisse als Inspirationsbasis und Ziel einer Methode.

Ein weiterer Ansatz ist die User Experience Concept Exploration; eine Möglichkeit, um nutzerzentriert und bedürfnisorientiert Ideen für Features eines Produktkonzepts zu entwickeln (Fronemann und Peissner 2014). Hierbei steht jedoch der Feature-Gedanke im Vordergrund und das PUX-Potenzial einer Technologie wird nicht systematisch eingeschätzt, auch ist der Ansatz bisher nicht für Technologien angewendet worden. Für uns übernehmen wir den Gedanken der Nutzerpartizipation zur Ideengenerierung.

Wie zuvor beschrieben, ist die Erlebnispotenzialanalyse ein weiterer, vielversprechender Ansatz, um detailliert Potenziale für PUX zu identifizieren und Ideen für PUX zu entwickeln. Die

Erlebnispotenzialanalyse kann bisher nur für bestehende Produkte und Systeme in ganz bestimmten Nutzungskontexten angewandt werden (Haspel et al. 2020). Wir benötigen jedoch eine Methode, die möglichst für jede Nutzeraktivität und zu einem sehr viel früheren Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden kann, da sie Technologien und ihr PUX-Potenzial berücksichtigen soll. Wir nutzen einige ihrer Prinzipien und entwickeln eine eigene Methode. Den Lösungsansatz unserer Methode „PUX-Potenzial-Framework“ beschreiben wir im Folgenden genauer.

3 Lösungsansatz des „PUX-Potenzials-Frameworks“

Grundsätzlich baut das PUX-Potenzial-Framework auf ähnlichen Prinzipien auf wie die Erlebnispotenzialanalyse (Haspel et al. 2020). Auch unsere Methode umfasst eine Erlebniskontext- und Aufgabenanalyse und soll möglichst konkrete Potenziale für PUX identifizieren. Dazu nutzt das PUX-Potenzial-Framework Elemente verschiedener anderer Ansätze, die im Folgenden detaillierter beschrieben werden. Anders als Haspel et al. (2020) nutzen wir als Grundlage kein bereits bestehendes interaktives System oder Software, sondern zielen darauf ab, sehr frühzeitig im Produktentwicklungsprozess, nämlich schon für eine Technologie, Potenziale für PUX zu identifizieren. Um die Technologie für die Anwender*innen begreifbar und so konkret wie möglich zu machen, stellen wir die Technologie und ihre Möglichkeiten in Form von Technologiefunktionen (Ardilio 2013) und mit einem Video vor.

Im Vergleich zu Haspel et al. (2020) nutzen wir nicht Erlebniskategorien zur Identifizierung von PUX-Potenzialen, sondern regen die Anwendenden an, anhand aller möglichen Kombinationen von Teilschritten einer Nutzeraktivität und den Technologiefunktionen Ideen für positive Erlebnisse bei Anwendung der Technologie zu entwickeln.

Zudem nutzen wir die menschlichen Grundbedürfnisse (Auswahl nach Hassenzahl et al. 2010), um die Ideation für PUX-Potenziale anzuregen. Zu Beginn des Workshops findet eine Sensitivierung für die Bedürfnisse statt, mit denen die Anwender*innen später arbeiten. Ziel der Aktivität ist ein Verständnis der Teilnehmenden für die Bedürfnisse. Die Bedürfnisse dienen später als Basis zur Generierung von Ideen für PUX bei Anwendung der Technologie für die jeweilige Nutzeraktivität. In der Starteraktivität sollen die Teilnehmenden einen Bezug der Bedürfnisse zu ihren eigenen Erlebnissen herstellen. Durch den Bezug zu persönlichen Erlebnissen sollen die Anwender*innen laut Literatur für die Bedürfnisse sensibilisiert werden (Krüger et al. 2017).

In Schritt 1 des PUX-Potenzial-Frameworks beschreiben die Anwender*innen den Erlebniskontext der jeweiligen Nutzeraktivität. Dadurch sollen sie sich in die Situation der Nutzeraktivität hineinversetzen und für die emotionalen Ziele der Nutzer*innen sensitiviert werden. Der Erlebniskontext basiert lose auf den Fragen des Erlebnisinterviews (Zeiner et al. 2016). Zudem sollen die Anwender*innen des PUX-Potenzial-Frameworks durch Fragen für das emotionale Erleben der Nutzer*innen bei der Nutzeraktivität und ihre emotionalen Ziele sensitiviert werden. Die Motivation der Nutzer*innen bei der Nutzeraktivität und die emotionalen Konsequenzen eines Scheiterns sollen den Anwender*innen ebenfalls bewusst(er) werden.

Zur Detaillierung der Nutzeraktivität nutzen wir das Prinzip einer klassischen Usability-Methode, der Aufgabenanalyse (siehe z.B. Heinsen 2003). Ziel der Aufgabenanalyse im Kontext unserer Methode ist es, möglichst detailliert zu dokumentieren, welche Teilschritte die Nutzer*innen zum Erreichen ihrer emotionalen Ziele bei der jeweiligen Nutzeraktivität durchlaufen. Unsere Methode sieht vor, dass die Methoden-anwender*innen die Aufgabenanalyse durchführen, damit sie ein möglichst konkretes Verständnis der Nutzeraktivität und ihrer möglicherweise vielfältigen Teilschritte gewinnen. Durch diese Konkretisierung der Nutzeraktivität sollen die Anwender*innen befähigt werden, möglichst konkrete PUX-Ideen für die Anwendung der Technologiefunktionen in den jeweiligen Teilschritten der Nutzeraktivität zu generieren. Die Aufgabenanalyse entspricht Schritt 2 unserer Methode.

Schritt 3 umfasst das erneute Lesen der Technologiefunktionen, um sich diese erneut bewusst zu machen, bevor in Schritt 4 die Anwender*innen systematisch alle möglichen Kombinationen von Teilschritten der Nutzeraktivität und Technologiefunktionen bearbeiten, um Ideen für PUX zu entwickeln.

Schritt 4 basiert auf dem Gedanken der Problem-Lösungs-Matrix (siehe z.B. Hofmann et al. 2020) und einer systematischen Bearbeitung dieser. Die Bedürfnisse dienen ebenfalls als Inspirationsgrundlage für PUX-Ideen (wie z.B. auch bei Eckoldt et al. 2013 oder Körber und Bengler 2013).

Am Ende/in Schritt 5 sollen die entstandenen PUX-Ideen den Bedürfnissen zugeordnet werden, die im nächsten Methodenschritt als User Need Stories standardisiert werden können (Bopp-Bertenbreiter et al. 2022).

4 Methode „PUX-Potenzial-Framework“

Das PUX-Potenzial-Framework wurde als Methode und Werkzeug entwickelt, um PUX-Ideen möglichst detailliert zu entwickeln. Ziel der Methode ist es, möglichst konkrete und detaillierte Anwendungsideen für PUX mit einer Technologie bei einer ganz bestimmten Nutzeraktivität zu entwickeln.

Damit das PUX-Potenzial-Framework anwendbar ist, müssen jeweils die Technologie und die Nutzeraktivität bekannt sein, in welcher die Technologie angewandt werden soll, um PUX zu ermöglichen. Nutzeraktivitäten, die zu einer Technologie passen, können beispielsweise durch Brainstorming oder Ähnliches identifiziert werden. Wir wenden die Methode für Nutzeraktivitäten an, die Nutzer*innen zukünftig bei der automatisierten Fahrt im Fahrzeuginterieur durchführen könnten. Das PUX-Potenzial-Framework wurde von uns in erster Linie für den Einsatz bei Fahrzeugherstellern für die Vorentwicklung von Technologien bis zur Serienreife entwickelt.

4.1 Anwender*innen

Das PUX-Potenzial-Framework sollte von einem Team angewandt werden, das die Expert*innen für die jeweils analysierte Technologie, UX-Expert*innen mit einem Verständnis für den Bedürfnisansatz, und Power-User für die jeweilige Nutzeraktivität umfasst, die analysiert wird. Power-User definieren wir im Sinne von Bopp-Bertenbreiter et al. (2021) als Nutzer*innen, welche die Nutzeraktivität mindestens wöchentlich durchführen. Zudem sollte eine Moderation auf den Fokus der Anwender*innen und die Einhaltung der Zeitvorgaben achten.

4.2 Ablauf des „PUX-Potenzial-Frameworks“

Der folgende Ablauf beschreibt die Schritte zur Anwendung des PUX-Potenzial-Frameworks im Rahmen eines Online-Workshops. Für die Offline-Verwendung muss das Material entsprechend in Papierform vorbereitet werden.

4.2.1 Einleitung & Starteraktivität zu Grundbedürfnissen

Der Workshop beginnt nach einem Überblick und den Einwilligungserklärungen mit einer Startaktivität zu den menschlichen Grundbedürfnissen. Dafür werden die 8 menschlichen Grundbedürfnisse (Auswahl nach Hassenzahl et al. 2010, basierend auf der Arbeit von Sheldon et al. 2001) mit der Bedürfniskarten (Universität Siegen o.J.) anhand einer Definition, 3 Unteraspekten, passenden Subjektiven, Zitaten und einer Zeichnung vorgestellt. Die Anwender*innen sollen einen Bezug zu den Bedürfnissen herstellen, indem sie folgende Frage beantworten „Bei welcher Aktivität / in welcher Situation habt ihr das Bedürfnis erfüllt bekommen?“. Hierbei bereitet die Moderation im Vorfeld eigene Beispiele vor, damit die Teilnehmenden in jedem Fall konkrete Beispiele zu jedem Bedürfnis erhalten.

4.2.2 Input zur Methode „PUX-Potenzial-Framework“ und zur Technologie

Nach der Startaktivität zu den Bedürfnissen gibt die Moderation einen kurzen Input zum Thema „positives Nutzungserlebnis bzw. PUX“, damit alle Anwender*innen ein gemeinsames Verständnis des Workshopziels haben. Dann erklärt die Moderation die Einordnung (Schritte vor und nach der Methode), Problemstellung, Vorgehen und Ziel des PUX-Potenzial-Frameworks. Nach der Möglichkeit, Rückfragen zu stellen, stellt die Moderation die jeweils zu bearbeitende Technologie anhand eines kurzen Steckbriefs, der Technologiefunktionen (Bopp-Bertenbreiter et al. 2022) und eines kurzen Videos vor. Dann erfolgt eine kurze gemeinsame Aufwärmaktivität zur körperlichen und geistigen Reaktivierung der Anwender*innen. Schließlich lesen alle Teilnehmenden die Anleitung in Stillarbeit durch und haben danach die Möglichkeit, Rückfragen zu stellen. Danach erfolgt die Anwendung des PUX-Potenzial-Frameworks. Die Moderation sollte auf eine ungefähre Einhaltung der Zeitangaben achten, da Timeboxing (=feste Zeitvorgabe für das Erledigen einer Aufgabe) ein Entwicklungsteam auf die Aufgabenstellung fokussieren kann (Ovesen et al. 2011). Die Moderation leitet außerdem jeden Schritt kurz ein.

4.2.3 Anwendung des „PUX-Potenzial-Frameworks“

Schritt 1 – Erlebniskontext beschreiben

Im ersten Schritt des PUX-Potenzial-Frameworks beschreiben die Anwender*innen den Erlebniskontext der jeweiligen Nutzeraktivität. Für diesen Schritt veranschlagten wir ursprünglich 5-10 Minuten, er umfasst folgende Fragen: *Wo im Fahrzeug befinden sich die Beteiligte(n)? Welche Person(en) sind an der Nutzeraktivität beteiligt? Wie ist die Beziehung der Personen zueinander?*

Schritt 1 umfasst ebenfalls folgende Fragen zum emotionalen Erleben der Nutzer*innen im Kontext der Nutzeraktivität: *Wie möchte sich der/die Nutzer*in fühlen? Warum führt er/sie die Nutzeraktivität durch?*

*Welche der 8 Grundbedürfnisse stecken dahinter? Wie fühlt sich der/die Nutzer*in, wenn die Nutzeraktivität erfolgreich war? Wie fühlt sich der/die Nutzer*in, wenn die Nutzeraktivität nicht funktioniert hat?*

Die Anweisung an die Anwender*innen ist für Schritt 1, den Kontext (=Setting, Umgebung) des Erlebnisses entlang der Fragen auf der Vorlage zum PUX-Potenzial-Framework zu diskutieren und zu dokumentieren. Falls mehrere Varianten des Erlebniskontextes möglich sind, z.B. bei der Nutzeraktivität „Musik hören“ mehrere Nutzer*innen gemeinsam oder eine Person allein die Nutzeraktivität durchführen könnte, entscheidet die Anwender*innengruppe sich gemeinsam für eine bestimmte Variante und dokumentiert diese. In der Anleitung werden die Anwender*innen mit Beispielbild darauf hingewiesen, dass die Nutzeraktivität in einem automatisierten Fahrzeug stattfindet, die Nutzer*innen also keine Fahraufgabe mehr erfüllen müssen.

Anwendung des „PUX-Potenzial-Frameworks“: Schritt 2 – Aufgabenanalyse notieren

Im zweiten Schritt des Frameworks detaillieren die Anwender*innen die zu analysierende Nutzeraktivität anhand der Frage „Welche Teilschritte müssen die Nutzer*innen für diese Nutzeraktivität durchlaufen?“ so weit wie möglich. Dabei sollen die Teilschritte der Nutzeraktivität möglichst konkret aus Sicht der Nutzer*innen und möglichst unabhängig von einer technischen Lösung beschrieben werden. Für diesen Schritt veranschlagten wir ursprünglich 10-15 Minuten. Detailliertere Angaben zur Durchführung einer Aufgabenanalyse finden sich bei Heinsen (2003).

Die Ergebnisse der Aufgabenanalyse dokumentieren die Anwender*innen im entsprechenden Feld des PUX-Potenzial-Frameworks.

Anwendung des „PUX-Potenzial-Frameworks“: Schritt 3 – Technologiefunktionen durchlesen

Die Anwender*innen lesen die Technologiefunktionen durch, um sich diese bewusst zu machen. Für diesen Schritt plant man ursprünglich 3 Minuten ein.

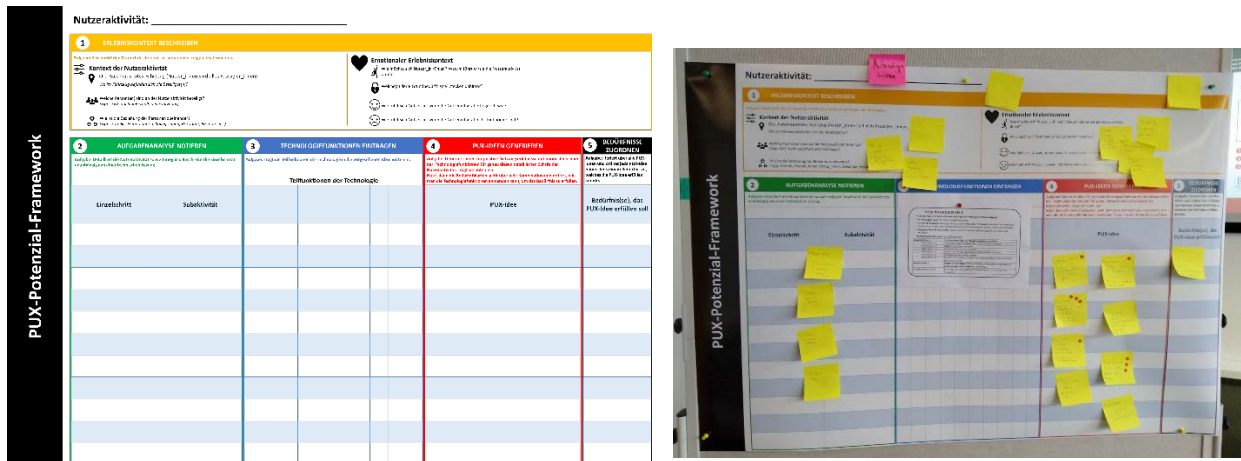


Abbildung 1: Links: PUX-Potenzial-Framework, blanko. Rechts: Bearbeitetes PUX-Potenzial-Framework aus Anwendung bei Praktikum, für Nutzeraktivität „Navigation (=Route verfolgen)“ und Technologie „Holographie“.

Anwendung des „PUX-Potenzial-Frameworks“: Schritt 4 – PUX-Ideen generieren

Die Anwender*innen nutzen die Matrix-Anordnung von Teilschritten der Nutzeraktivität (=Reihe) und Technologiefunktionen (=Spalten) und bearbeiten diese systematisch auf Basis folgender Leitfrage: „Wie kann die Technologiefunktion bei diesem Teilschritt angewandt werden, um die Nutzer*innen bei ihrer Aktivität möglichst gut zu unterstützen und ein positives Nutzungserlebnis zu ermöglichen?“. Auch die grobgranularen PUX-Ideen aus dem Methodenschritt zuvor stehen den Anwender*innen als Inspiration zur Verfügung (z.B. Bopp-Bertenbreiter et al. 2022).

Ziel der Ideen ist ein positives Nutzungserlebnis für den Nutzer oder die Nutzerin. Die Teilnehmer*innen dürfen auch andere Technologie als Unterstützung einsetzen, der Fokus liegt aber auf der jeweils analysierten Technologie. Nach Generierung einer PUX-Idee markieren die Anwender*innen dann jeweils die Spalte mit den Technologiefunktionen, welche die PUX-Idee nutzt, um den Nutzer*innen ein positives Nutzungserlebnis zu ermöglichen.

Sobald alle Kombinationen bearbeitet wurden, nehmen die Anwender*innen die Bedürfniskarten zur Hand und prüfen alle Kombinationen von Technologiefunktionen und Teilschritten der Nutzeraktivität anhand der Frage: „Wie kann diese Technologiefunktion in diesem Teilschritt der Nutzeraktivität genutzt werden, um dieses Bedürfnis möglichst gut zu erfüllen und dadurch ein positives Nutzungserlebnis zu ermöglichen?“

Anwendung des „PUX-Potenzial-Frameworks“: Schritt 5 – Bedürfnisse zuordnen

Im letzten Schritt des PUX-Potenzial-Frameworks ordnen die Anwender*innen jeder PUX-Idee ein Bedürfnis zu, indem sie überlegen, welche(s) der acht Grundbedürfnisse die PUX-Idee erfüllt und warum. Die Anwender*innen dokumentieren jedes zugeordnete Bedürfnis mit Begründung.

4.3 Forschungsfragen für die Evaluation

Das PUX-Potenzial-Framework wird mit Anwender*innen angewandt und evaluiert, um die Methode im Sinne einer nutzerzentrierten Entwicklung zu optimieren. Dabei untersuchen wir folgende Fragen:

1. Wie viele Ideen für PUX mit einer Technologie können die Anwender*innen mit der Methode entwickeln? Funktioniert die Ideengenerierung für zwei unterschiedliche Technologien?
2. Wie bewerten die Anwendenden die User Experience der Methode auf einem standardisierten UX-Fragebogen (Laugwitz et al. 2008)?
3. Welche Stärken und Schwächen weist die Methode aus Sicht ihrer Anwender*innen auf (offene Fragen)?

5 Ergebnisse

Berichtet werden jeweils der Mittelwert (MW) mit seiner Standardabweichung in Klammern. Bei den qualitativen Daten (=Stärken und Schwächen) waren jeweils Mehrfachnennungen möglich.

5.1 Anwendung bei Praktikum – Gruppe 1

Das PUX-Potenzial-Framework wandten wir im Rahmen eines Praktikums vor Ort an der Universität Stuttgart an. Hierdurch prüften wir die grundsätzliche Anwendbarkeit der Methode und sammelten Rückmeldungen zu Stärken und Schwächen der Methode.

Für die erste Gruppe werden die Ergebnisse von $N = 13$ Studierenden berichtet, welche die Methode in Kleingruppen a 4-5 Personen für die Nutzeraktivitäten „Videoanruf“, „Mediation“ und „Navigation“ (im Sinne von Routenverfolgung wie z.B. im Flugzeug) anwandten. Eine weitere Gruppe hatte die Aufgabe aufgrund einer starken Sprachbarriere nicht verstanden, daher werden ihre Antworten nicht berichtet. Für die Nutzeraktivität „Videoanruf“ konnten 10 PUX-Ideen zur Anwendung der Technologiefunktionen entwickelt werden, für die „Meditation“ 6 PUX-Ideen und für die „Navigation“ 11 PUX-Ideen.

Die Anwender*innen bewerteten das PUX-Potenzial-Framework auf den UEQ-Skalen insgesamt eher bis sehr positiv: $MW_{Attraktivität} = 1,95 (0,71)$; $MW_{Durchschaubarkeit} = 1,67 (0,88)$, $MW_{Effizienz} = 1,12 (0,67)$, $MW_{Steuerbarkeit} = 1,32 (0,73)$, $MW_{Stimulation} = 1,98 (0,72)$, $MW_{Originalität} = 1,31 (1,14)$.

Stärken der Methode: Nutzung und Förderung von Gruppenarbeit/Meinungsaustausch (x7); Anregung der Kreativität (x3); Praxisbezug (x2); sowie die gute Strukturierung (x2). Einzelnennungen waren: Sichtbarkeit der Bedürfnisse; schnelle Fortschritte; Entwicklung vieler Ideen; Eigenständigkeit der Bearbeitung; neue Perspektive/Blickwinkel; Nutzerorientierung; Ideengenerierung; Einbringen eigener Ideen; sowie Priorisierung der Technologiefunktionen über die Verbindung mit Teilschritten der Nutzeraktivität.

Schwächen: Abgrenzung Schritt 3 und 4 muss klarer sein (x2). Je einmal genannte Schwächen: Dopplungen; Aufteilung Plakat; Ausfüllen des Plakats; Hinarbeiten auf Ziele, deren Lösung bereits vorliegt [unklar, was damit gemeint ist]; Abfolge lässt zu viel offen; weniger kreativ; zu wenig Bearbeitungszeit; Aufteilung Nutzeraktivität in Teilschritte nicht für jede Aktivität durchführbar; Unterteilung in Teilschritte; sowie Subaktivitäten teils nicht verständlich.

Veränderungswünsche: Haupt und Teilfunktionen; mehr Eingrenzung innerhalb der Themen; sowie ein Beispiel vorausgefüllt auf dem Bogen stehen lassen.

5.1 Anwendung bei Praktikum – Gruppe 2

Für die zweite Gruppen fließen die Ergebnisse von $N = 13$ Studierenden für dieselben 3 Nutzeraktivitäten wie im anderen Praktikum in die Analyse ein. Die Ergebnisse von 3 weiteren Proband*innen wurden aufgrund sprachlicher Unverständlichkeit entfernt. Für die Nutzeraktivität „Videoanruf“ konnten die Anwender*innen 6 PUX-Ideen bei Anwendung der Technologiefunktionen entwickeln, für die Nutzeraktivität „Meditation“ 7 PUX-Ideen und 8 PUX-Ideen für die „Navigation“.

Die Teilnehmenden bewerteten das PUX-Potenzial-Framework auf den UEQ-Skalen wie folgt: $MW_{Attraktivität} = 1,23 (0,59)$; $MW_{Durchschaubarkeit} = 1,15 (0,98)$, $MW_{Effizienz} = 0,92 (0,62)$, $MW_{Steuerbarkeit} = 0,94 (0,70)$, $MW_{Stimulation} = 1,69 (0,53)$, $MW_{Originalität} = 1,00 (0,84)$.

Stärken: Methodisches, strukturiertes Vorgehen (x2); Kreative Gruppenarbeit (x2) und mit je einer Nennung Meinungsaustausch; Bedürfnissicht; unterstützt Nachdenken über PUX; schnell und wertvoll; Prozess gefällt; Berücksichtigen der Anwendersicht; Schritte zur Ideengewinnung sowie Verknüpfung mit emotionalem Erlebniskontext.

Schwächen: Unsicherheit bezgl. Anwendung Methode (x2) sowie Fokus auf eine Technologie schränkt Kreativität ein (x2). Einzelnennungen Schwächen: Teils unklare Aufgabenstellung; nicht für

alle Nutzeraktivitäten einsetzbar; bei Unkenntnis Technologie ist es schwer, auf konkrete Lösungen zu kommen; Zeit zum Vorbereiten; sowie ohne Kundenfeedback unklar, ob Idee sinnvoll. *Veränderungswünsche*: Mehr Bearbeitungszeit (x2), Einzelnennung: Mehr Einleitung/Beispiele; Klarere Anleitung; sowie andere Technologie.

5.2 Anwendung in Industrie – Technologie „Holographie“

Die Ergebnisse werden jeweils pro Technologie berichtet, um die Anonymität der Teilnehmenden sicherzustellen. Für die Nutzeraktivität „Meditation“ mit $N = 5$ Teilnehmenden konnten die Anwender*innen mit dem PUX-Potenzial-Framework 9 PUX-Ideen detaillieren. Für die Nutzeraktivität „Videoanruf“ mit $N = 3$ Teilnehmenden 15 PUX-Ideen und für die Nutzeraktivität „Musik hören“ mit $N = 3$ Teilnehmenden 10 PUX-Ideen. Die Teilnehmenden bewerteten das PUX-Potenzial-Framework auf den UEQ-Skalen wie folgt: $MW_{Attraktivität} = 1,20 (0,71)$; $MW_{Durchschaubarkeit} = 0,85 (0,99)$, $MW_{Effizienz} = 0,85 (0,69)$, $MW_{Steuerbarkeit} = 0,88 (0,78)$, $MW_{Stimulation} = 1,25 (0,57)$, $MW_{Originalität} = 1,23 (0,89)$.

Stärken: Strukturiert → unterstützt Strukturierung eigener Gedanken (x4) und Teamarbeit interdisziplinär (x2). Einzelnennungen: Klares Verständnis vom Vorgehen; Möglichkeit zur Standardisierung; Moderation; kleine Gruppengröße; Einführung Methode; sowie Erklärung Technologie.

Schwächen: Wahl Nutzeraktivitäten teils unklar → Dasselbe Team sollte Nutzeraktivitäten finden und PUX-Potenzial-Framework bearbeiten (x2). Einzelnennungen:

Bei PUX-Ideen-Suche unklar, was zu tun war; teils unklare Aufgabenstellung; Teilfunktion zu granular; Gruppe evtl. zu klein; zu weit entfernt von Anwendung; sowie Whiteboard funktioniert nicht gut.

Veränderungswünsche: Nutzeraktivität genau vorgeben und vorstellen (x2) sowie Technische Einschränkungen, Sitzposition und Level automatisiertes Fahren vorgeben (x2). Einzelnennungen umfassen: Mehr Bearbeitungszeit; Zeit für Einzelbearbeitung; Bedürfnisse der Nutzer einbringen; Technologieanwendung konkret für PUX beschreiben, ohne Bedürfnisse und Teilfunktionen Technologie ; reine Expertenworkshops; Paper Prototyping → Ideen tatsächlich aufzeichnen oder basteln sowie Alternative zu Whiteboard.

5.3 Anwendung in Industrie – zweite Anzeigetechnologie

Für die Nutzeraktivität „Musik hören“ konnten die Anwender*innen mit dem PUX-Potenzial-Framework 15 PUX-Ideen detaillieren, für „Über Nachrichten informieren“ 14 PUX-Ideen, für „Videoanruf“ 9 PUX-Ideen und für „Gaming“ 10 PUX-Ideen. Pro Gruppe nahmen je 3 Personen teil.

$N = 8$ der insgesamt 12 Teilnehmenden bewerteten die Methode auf den UEQ-Skalen wie folgt: $MW_{Attraktivität} = 1,65 (0,59)$; $MW_{Durchschaubarkeit} = 0,97 (0,54)$, $MW_{Effizienz} = 0,13 (0,86)$, $MW_{Steuerbarkeit} = 0,78 (0,54)$, $MW_{Stimulation} = 1,38 (0,73)$, $MW_{Originalität} = 1,28 (0,85)$.

Stärken: Alle bringen in Gruppenarbeit Ideen ein (x5). Einzelnennungen: Fokus auf spezifischen Punkt; Explorieren verschiedener Blickwinkel; Schrittweiser Aufbau → Kreativität wächst mit; Gute Aufteilung; verständlich und übersichtlich; Zuordnung der Ideen zu Technologiefunktionen; Fokus auf Customer Journey; sowie Abstraktion von technischen Lösungen und ohne Festlegung auf technischen Rahmen.

Schwächen: Keine Aufteilung in Identifizierung der Nutzeraktivitäten und PUX-Potenzial-Framework → Wissen, woher Nutzeraktivitäten kommen; anderes Whiteboard nutzen; mehr Bearbeiter → mehr Eindrücke; Sinn emotionaler Ziele war nicht 100% klar; mehr Moderation, falls man Fokus verliert; Spalte PUX-Ideen besser definieren; sowie Abstraktionsgrad teilweise zu groß.

Veränderungswünsche: Methode kann in verschiedenen Bereichen effizient sein sowie stärkere Moderation.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Anhand unserer Ergebnisse können die Forschungsfragen zur Anwendung und Evaluation des PUX-Potenzial-Frameworks beantwortet werden:

Die erste Frage zur Anzahl der PUX-Ideen, die mit der Methode entwickelt werden können, scheint von den Anwender*innen, der Nutzeraktivität und Technologie abzuhängen. Sie bewegt sich im Bereich von 6-15 PUX-Ideen pro Gruppe. Die Methode ist für mehrere Technologien anwendbar. Hierbei könnten in Zukunft – sofern vorhanden – funktionale Prototypen der Technologie mit in die Workshops gebracht werden, um die Kreativität anzuregen und die Technologie zu konkretisieren.

Die zweite Forschungsfrage zur User Experience der Methode auf dem UEQ (Laugwitz et al. 2008) zeigt Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen von Anwender*innen. Werte zwischen -0,8 und 0,8 sind als neutrale Bewertung, Werte über 0,8 als positive Bewertung zu interpretieren (Schrepp 31.12.2019). Daher liegen für die Gruppe Praktikum 1 alle UEQ-Werte in einem positiven Bereich, wobei Attraktivität und Stimulation besonders gut sind. Für die Gruppe Praktikum 2 liegen die Werte auch in einem positiven Bereich, aber nicht ganz so positiv wie bei Gruppe 1. Das ist interessant, da die Gruppen jeweils dieselben Kombinationen aus Technologie und Nutzeraktivitäten bearbeitet haben. Zur Anwendung der Methode in der Industrie für die Technologie „Holographie“ sind die Werte auf dem UEQ ebenfalls alle im leicht bis ziemlich positiven Bereich, für die zweite Anzeigetechnologie ebenfalls. Der einzige Ausreißer ist die Skala zur Effizienz, die für die zweite Anzeigetechnologie nahe 0 liegt. Die Methode hat somit aus Sicht der Anwender*innen eine mindestens neutrale bis positive User Experience, was wir für eine frühe Methoden-Version als zufriedenstellend ansehen.

Der UEQ wurde entwickelt, um die UX von Software und interaktiven Systemen zu evaluieren (Laugwitz et al. 2008). Mangels Alternativen ziehen wir ihn zur Bewertung dieser Methode heran, da die UEQ-Dimensionen wichtige Aspekte der Anwendungs-UX einer Methode abbilden. Auch eine Methode für UX-Expert*innen und Nutzer*innen sollte z.B. verständlich, effizient, stimulierend und insgesamt gut anwendbar sein, um von den Anwender*innen gerne genutzt zu werden. Durch die Verwendung eines standardisierten Fragenbogens kann das PUX-Potenzial-Framework zudem mit anderen Methoden verglichen und dadurch iterativ optimiert werden.

6.2 Ausblick: Optimierungspotenziale für zukünftige Iterationen

Ein Kritikpunkt unserer Anwender*innen war die zeitliche Aufteilung der Methode. Diese sollte nicht zu starr gehandhabt, sondern auf die zeitlichen Bedürfnisse der jeweiligen Anwendergruppe angepasst werden. Hierfür und zur Leitung der Gruppe durch die Methode sollte eine in der Methode erfahrene Moderation anwesend sein. Außerdem sollten Schritt 3 und 4 in einen einzigen Schritt zur Generierung von PUX-Ideen und Zuordnung der Ideen zu den jeweils beteiligten Technologiefunktionen umgewandelt werden, da die Unterteilung in zwei Schritte bei den Teilnehmer*innen zu Verwirrung geführt hat. Die Gruppen sollten immer mindestens 4 Anwender*innen umfassen, damit ein guter Austausch und eine Diskussion zu den PUX-Ideen möglich sind. Hiervon sollte je mindestens eine Person Expertise zur Technologie, zu UX-Methoden / Bedürfnissen sowie als Power-User zur Nutzeraktivität aufweisen.

Eine von uns beobachtete Herausforderung und somit Schwäche der Methode war, dass die Anwender*innen zwar prinzipiell alle Nutzeraktivitäten kannten und selbst durchgeführt hatten, aber keine Expert*innen für die jeweilige Nutzeraktivität waren. Dadurch dauerte die Aufgabenanalyse teilweise länger als vorgesehen, da die Anwender*innen die Nutzeraktivität und typische Abläufe erst aus eigener Erfahrung rekonstruieren mussten. Damit das PUX-Potenzial-Framework sein volles Potenzial entfalten kann, sollten für zukünftige Anwendungen Power-User für die jeweiligen

Nutzeraktivitäten eingebunden werden. Falls keine Power-User verfügbar sind, sollten im Vorfeld Nutzerforschungsmethoden zu den jeweiligen Nutzeraktivitäten wie beispielsweise Contextual Inquiries (Holtzblatt 2001), Tagebuchstudien und UX-Probes (Pollmann et al. 2018), Erlebnisinterviews (Zeiner et al. 2016) oder virtuelle, kontextuelle Interviews und Fokusgruppen (Bopp-Bertenbreiter et al. 2021) durchgeführt werden. Hierdurch können die Teilnehmenden mit Daten zur jeweiligen Nutzeraktivität unterstützt werden, so dass sie den Erlebniskontext sowie die Analyse typischer Abläufe und Teilschritte der jeweiligen Nutzeraktivität konkreter beschreiben können. Zudem erhalten die Anwender*innen so eine konkretere Vorstellung der Aktivität, für die sie PUX-Ideen detailliert entwickeln sollen. Basierend auf dieser Nutzerforschung könnte weiterhin eine Vorpriorisierung der Bedürfnisse vorgenommen werden, auf deren Erfüllung die PUX-Ideen abzielen. Wenn diese Daten in die Methode aufgenommen werden, benötigen die Anwender*innen eine entsprechende Einarbeitungszeit vor oder während des Workshops.

Ein weiterer Optimierungsvorschlag betrifft die Form von Schritt 2 – Aufgabenanalyse: Laut einigen Anwender*innen machte es die Vorlage zur Aufgabenanalyse in Tabellenform unklar, ob nur der typische Ablauf einer Nutzeraktivität oder auch Abweichungen davon detailliert beschrieben werden sollten. Wenn es z.B. bei einer Nutzeraktivität wie dem „Videoanruf mit gleichzeitigem Arbeiten“ eine Vielzahl an Möglichkeiten für das gleichzeitige Arbeiten gibt (z.B. Lesen, Präsentationen bearbeiten etc.), so wäre eine Darstellung in Baumform vermutlich geeigneter.

Falls die Entwickler*innen für die jeweilige Nutzeraktivität die Erfüllung eines bestimmten Bedürfnisses forcieren wollen, könnten die PUX-Ideen bei Schritt 4 auch jeweils unter folgender Leitfrage generiert werden: „Wie kann die Anwendung der Technologie bei diesem Teilschritt der Nutzeraktivität das [Bedürfnis] erfüllen? Wie kann Technologiefunktion X bei Teilschritt Y so angewandt werden, dass bei den Nutzer*innen später Bedürfnisgefühl Z entsteht?“.

Nach dem PUX-Potenzial-Framework sollten die generierten PUX-Ideen priorisiert werden: Vorstellbare Bewertungskriterien sind u.a. das Begeisterungspotenzial, das wirtschaftliche Potenzial sowie die Beherrschbarkeit für das jeweilige Unternehmen. Die Priorisierung kann anhand von Expertenbewertungen, Heuristiken oder breitangelegte Nutzerbefragungen vorgenommen werden.

7 Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt die Methode „*PUX-Potenzial-Framework*“ vor. Sie zielt darauf ab, für die Anwendung einer Technologie bei einer bestimmten Nutzeraktivität detaillierte und möglichst konkrete Ideen für positive Nutzungserlebnisse (PUX-Ideen) zu entwickeln. Die Methode nutzt dazu Prinzipien aus der Erlebnispotenzialanalyse wie die Nutzungskontext- und Aufgabenanalyse (Haspel et al. 2020), außerdem den Bedürfnisansatz (Hassenzahl et al. 2010) und die Kombination von Technologiefunktionen und Teilschritten der Nutzeraktivität.

Die Methode wurde bisher in 8 Kleingruppen im universitären Praktikum und 7 Kleingruppen in der Industrie, bei einem Fahrzeughersteller, angewandt und evaluiert. Dabei konnten alle Gruppen PUX-Ideen mit der Methode generieren. Die Anwendungs-User Experience der Methode wurde dabei insgesamt positiv bewertet. Wir haben Optimierungspotenziale für die Methode aus den erfragten Stärken und Schwächen der Methode abgeleitet. Für die nächste Version des PUX-Potenzial-Frameworks sollen die oben beschriebenen Optimierungspotenziale in Workshops mit UX-Expert*innen und Nutzerrepräsentant*innen umgesetzt werden.

Danksagung

Wir danken unseren Führungskräften Michael Herter (Audi AG) und Harald Widlroither (Fraunhofer IAO) für die Chance, diese Methode zu veröffentlichen. Danke an alle Anwender*innen für die wertvolle Rückmeldung. Vielen Dank an die beiden Reviewer*innen für die konstruktive Kritik.

Literatur

- Ardilio 2013
 ARDILIO, Antonino: *Eine Vorgehensweise zur strategischen Technologieentwicklungsplanung für Forschungseinrichtungen*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Dissertation, 2013. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2013 (Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement 6).
- Bopp-Bertenbreiter et al. 2022
 BOPP-BERTENBREITER, Valeria; ENGELHARDT, Doreen; RITTGER, Lena; POTTIN, Denise: *Tech4UX - An Approach to Systematically Assess the Potential of a Technology for Positive User Experience*. [Konferenzposter]. 13th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2022) and the Affiliated Conferences. New York, USA, 24.-28.07.2022.
- Bopp-Bertenbreiter et al. 2021
 BOPP-BERTENBREITER, Valeria; RITTGER, Lena; DIEDERICH, Frederik: MatchUT: Matching Need-Based User Requirements and Technology Impacts to Create UX. In: BINZ, Hansgeorg; BERTSCHE, Bernd; SPATH, Dieter; ROTH, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021: Stuttgart, 20. Mai 2021, Wissenschaftliche Konferenz*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2021.
- Eckoldt et al. 2013
 ECKOLDT, Kai; HASSENZAHL, Marc; LASCHKE, Matthias; KNOBEL, Martin: Alternatives: Exploring the Car's Design Space from an Experience-Oriented Perspective. In: *DPPI '13: Proceedings of the 6th International Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces*. New York: Association for Computing Machinery, 2013, S. 156-164.
- Fronemann und Peissner 2014
 FRONEMANN, Nora; PEISSNER, Matthias: User experience concept exploration. In: ROTO, Virpi (Hrsg.): *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: fun, fast, foundational: Helsinki, Finland - October 26 - 30, 2014*. New York, NY: ACM, 2014, S. 727-736.
- Haspel et al. 2020
 HASPEL, Christina; STOCKINGER, Christopher; LAIB, Magdalena; BURMESTER, Michael: Positive Erlebnisse bei der Interaktion mit Assistenzsystemen gestalten – Die Erlebnispotentialanalyse. In: HANSEN, Christian; NÜRNBERGER, Andreas; PREIM, Bernhard (Hrsg.): *Mensch und Computer 2020 - Workshopband*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., 2020.
- Hassenzahl et al. 2010
 HASSENZAHL, Marc; DIEFENBACH, Sarah; GÖRITZ, Anja: *Needs, affect, and interactive products – Facets of user experience*. In: *Interacting with Computers* 22 (2010), Nr. 5, S. 353-362.
- Hassenzahl et al. 2013
 HASSENZAHL, Marc; ECKOLDT, Kai; DIEFENBACH, Sarah; LASCHKE, Matthias; LENZ, Eva; KIM, Joonhwan: *Designing Moments of Meaning and Pleasure. Experience Design and Happiness*. In: *International Journal of Design* 7 (2013), Nr. 3.
- Heinsen 2003
 HEINSEN, Sven (Hrsg.): *Usability praktisch umsetzen: Handbuch für Software, Web, Mobile Devices und andere interaktive Produkte*. München: Hanser, 2003.
- Hofmann et al. 2020
 HOFMANN, Peter; JÖHNK, Jan; PROTSCHKY, Dominik; URBACH, Nils: Developing Purposeful AI Use Cases – A Structured Method and Its Application in Project Management. In: GRONAU, Norbert; HEINE, Moreen; KRASNOVA, Hanna; POUSTTCHI, Key (Hrsg.): *Proceedings der 15. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik 2020*. [Berlin]: [GITO mbH Verlag für Industrielle

- Informationstechnik und Organisation], 2020 (Entwicklungen, Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung / Gronau, N., Heine, M., Krasnova, H., Pousttchi, K. (Hrsg.), Band 1), S. 33–49.
- Holtzblatt 2001
HOLTZBLATT, Karen: Contextual Design: Experience in Real Life. In: H. Oberquelle; R. Oppermann; J. Krause (Hrsg.): *Mensch & Computer 2001: 1. Fachübergreifende Konferenz*, 2001, S. 19–22.
- Körber und Bengler 2013
KÖRBER, Moritz; BENGLER, Klaus: Measurement of momentary user experience in an automotive context. In: TERKEN, Jaques (Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Eindhoven, 2013, [October 28 - 30, 2013]*. New York, NY: ACM, 2013, S. 194–201.
- Krüger et al. 2017
KRÜGER, Anne Elisabeth; KUROWSKI, Sebastian; POLLMANN, Kathrin; FRONEMANN, Nora; PEISSNER, Matthias: Needs profile. In: SORO, Alessandro (Hrsg.): *OzCHI 2017 - Human Nature: Proceedings of the 29th Australian Computer-Human Interaction Conference (OzCHI 2017): Brisbane 28th November -1st December, 2017*. New York, New York: The Association for Computing Machinery, 2017 (ICPS), S. 41–48.
- Laugwitz et al. 2008
LAUGWITZ, Bettina; HELD, Theo; SCHREPP, Martin: Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire, Bd. 5298. In: HOLZINGER, Andreas (Hrsg.): *HCI and usability for education and work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society, USAB 2008, Graz, Austria, November 20 - 21, 2008; proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 (Lecture Notes in Computer Science, 5298), S. 63–76.
- Ovesen et al. 2011
OVESEN, Nis; ERIKSEN, Kaare; TOLLESTRUP, Christian: *Speeding up Development Activities in Student Projects with Time Boxing and Scrum*. In: *DS 69: Proceedings of E&PDE 2011, the 13th International Conference on Engineering and Product Design Education, London, UK, 08.-09.09.2011 (2011)*, S. 559–564.
- Pollmann et al. 2018
POLLMANN, Kathrin; FRONEMANN, Nora; KRÜGER, Anne; BAUER, Wilhelm: User-driven Innovation mit UX Probes. In: MATT, Dominik (Hrsg.): *KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Berlin: GITO Verlag, 2018 (Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation), S. 150–167.
- Schrepp 31.12.2019
SCHREPP, Martin: *User Experience Questionnaire Handbook: All you need to know to apply the UEQ successfully in your projects*. 31.12.2019.
- Sheldon et al. 2001
SHELDON, K. M.; ELLIOT, A. J.; KIM, Y.; KASSER, T.: *What is satisfying about satisfying events? Testing 10 candidate psychological needs*. In: *Journal of personality and social psychology* 80 (2001), Nr. 2, S. 325–339.
- Universität Siegen o.J.
UNIVERSITÄT SIEGEN: *Bedürfniskartenset: Experience Design Tools*. o.J.
- Zeiner et al. 2016
ZEINER, Katharina M.; LAIB, Magdalena; SCHIPPERT, Katharina; BURMESTER, Michael: Das Erlebnisinterview –Methode zum Verständnis positiver Erlebnisse. In: HESS, S.; FISCHER, H. (Hrsg.): *Mensch und Computer 2016: Gesellschaft für Informatik e.V. und die German UPA e.V. 2016*, 2016.

Bewertung des Methods Time Measurement-Verfahrens als Analysewerkzeug für Bewegungszeiten während der Fahrtätigkeit

Evaluation of Methods Time Measurement as an Analysis Tool for Movement Times During Driving Activities

Miriam Schäffer, Philipp Pomiarsky, Wolfram Remlinger

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart

miriam.schaeffer@iktd.uni-stuttgart.de

philipp.pomiarsky@iktd.uni-stuttgart.de

wolfram.remlinger@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Die Nutzung von automatisierten Fahrfunktionen nach SAE Level 3 und 4 beschränkt sich zunächst auf bestimmte Anwendungsgebiete. Dadurch sind Übernahmen an den Fahrer innerhalb definierter Zeitspannen notwendig. Um diese Übernahmen abzusichern ist für den OEM die Kenntnis über zeitdominierende, beeinflussbare Faktoren elementar. Ein Aspekt ist die notwendige Dauer von kognitiven Prozessen und physisch-motorischen Bewegungsabläufen des Fahrers. Für die Vorhersage, Kalkulation und Analyse dieser Zeiten werden in diesem Beitrag existierende Modelle der Zeitermittlung aus dem fahrzeugfernen Umfeld (MTM, Fitts' Gesetz) herangezogen. Um die Übertragbarkeit der Modelle auf Übernahmeszenarien zu untersuchen, wird hier die Nutzbarkeit der Modelle bei der manuellen Fahrtätigkeit anhand einer Nutzwertanalyse überprüft. Demnach ist MTM v. a. bei physischen Bewegungen geeigneter als Fitts' Gesetz und bietet Potenziale für die Analyse von Übernahmeprozessen. Limitierungen ergeben sich bei der Nutzung existierender MTM-Zeitwerten und bei der Analyse von kognitiven Prozessen.

Keywords:

Bewegungszeiten, Fahrerübernahme, automatisiertes Fahren, Methods Time Measurement (MTM), Nutzwertanalyse

Abstract: The use of automated driving functions according to SAE Level 3 and 4 is initially limited to certain areas of application. Therefore, take-overs to the driver within defined time periods are required. In order to secure these take-overs, knowledge of time-dominating factors that can be influenced is elementary for the OEM. One aspect is the duration required for driver's cognitive processes and physical-motor movements. For the prediction, calculation, and analysis of these times, existing models of time determination from the non-vehicle environment (MTM, Fitts' Law) are used in this work. In order to examine the transferability of the models to take-over scenarios, the usability of the models for manual driving activities is reviewed here using a utility analysis. According to this, MTM is more suitable than Fitts' Law, especially for physical movements, and offers potential for the analysis of take-over processes. Limitations arise in the use of existing MTM time values and in the analysis of cognitive processes.

Keywords:

Movement Times, Driver Take-over, Automated Driving, Methods Time Measurement (MTM), Utility Analysis

1 Introduction

Automated driving is defined as independent driving through a software-based vehicle function. According to SAE J3016, automated driving is divided into Levels from 0 to 5. In Level 0, no support through the system is available. In Level 1 and 2, the driver is only assisted in the driving task. In Level 3, the driver can temporarily devote himself or herself to non-driving related activities (NDRA). However, the driver still serves as a fallback level if the system reaches its limits. Level 4 allows the driver a continuous devotion from the driving task. A take-over is no longer necessary, since the vehicle is always in safe state. In Level 5, a driver is no longer required, and it is even possible to drive without passengers.

Initially, SAE Level 3 and 4 are limited to certain areas of application (SAE J3016). Then, take-overs back to the driver within defined time periods are necessary (see Fig. 1). Since the vehicle manufacturer is liable for safe automated operation including responsible take-over, knowledge of the necessary take-over times is significant for the approval of the system. In particular, cognitive processes and anthropometric movements of the driver and their correlation are decisive for take-over times (Marberger et al. 2017).



Fig. 1: Take-over scenario from NDRA *Reading a book* (Schäffer et al. 2021)

Currently, take-over times are being investigated in many cases with different influencing factors, such as NDRA (Yoon et al. 2021; Marberger et al. 2017). The determined time values diverge strongly in some cases and the use of different methods makes comparability difficult. Marberger et al. (2017) provide an approach for structuring the transition time of the driver during take-over. The approach is extended in the *HoMoTo* model (Schäffer et al. 2021) by a decomposition into further substeps and by a concept for time determination. In addition, cognitive processes during take-overs are frequently investigated in the context of system ergonomics (Bubb et al. 2015a), driver behavior modeling (Kupschick 2021) and take-over studies (Scharfe-Scherf et al. 2022). Nevertheless, a link to physical-motor movement behavior is missing.

For the development of automated vehicles, a tool for precise and reliable prediction, calculation, and analysis of the duration of cognitive processes and for physical motion sequences during take-over is required. Furthermore, the identification of time-limiting factors is necessary. The tool shall be based on the existing *HoMoTo* approach. For this purpose, as a first step, existing models for time determination from the non-vehicle environment are investigated here regarding their transferability to manual driving activities using a utility analysis. The decision criteria are derived in the following literature review. First, the general control loop of the manual driving task is analyzed and time factors are identified. Based on this, the time-influencing characteristics are elaborated in particular for the cognitive and physical processes associated with the driving task. All factors influencing the movement time are then used for the evaluation of the models within the utility analysis.

2 Control Loop of the Driving Task

Guiding a motor vehicle is a complex monitoring and control task consisting of cognitive and physical-motor activities (see Fig. 2). The driver translates the driving task into information and transfers the

result to the human-machine system. However, the driving task is constantly influenced by environmental factors. The output variable is the vehicle movement, which the driver compares with the driving task and corrects if necessary. (Lemmer et al. 2021)

Within the **primary driving task**, *navigation*, *guidance*, and *stabilization* of the vehicle take place. To *guide* the vehicle the human determines a mental target course and target speed. For this purpose, the driver usually performs a continuous route preview at intervals of approximately 2 sec. To achieve the target values the driver operates the steering wheel, accelerator, brake, and, if necessary, the clutch pedal and gearshift lever within the *stabilization task*. The driver receives feedback, for example, via the steering wheel and the speedometer. For stabilization, the driver has a time capacity of 100 ms to a maximum of 300 ms while driving. (Lemmer et al. 2021; Donges 2015)

Within the **secondary driving task**, the driver either informs other road users of his or her intentions, for example by using turn signals, or reacts to external conditions, for example by operating the windshield wiper. **Tertiary driving tasks** are independent of the actual driving task, such as setting comfort conditions or operating the infotainment system. (Lemmer et al. 2021)

Therefore, physical movements are generally influenced in time by different factors: external factors, such as the traffic and environmental situation, internal factors, such as strength, mobility, and human cognition, and the (technical) framework of the vehicle, such as the force that can be transmitted to the steering system or movement space.

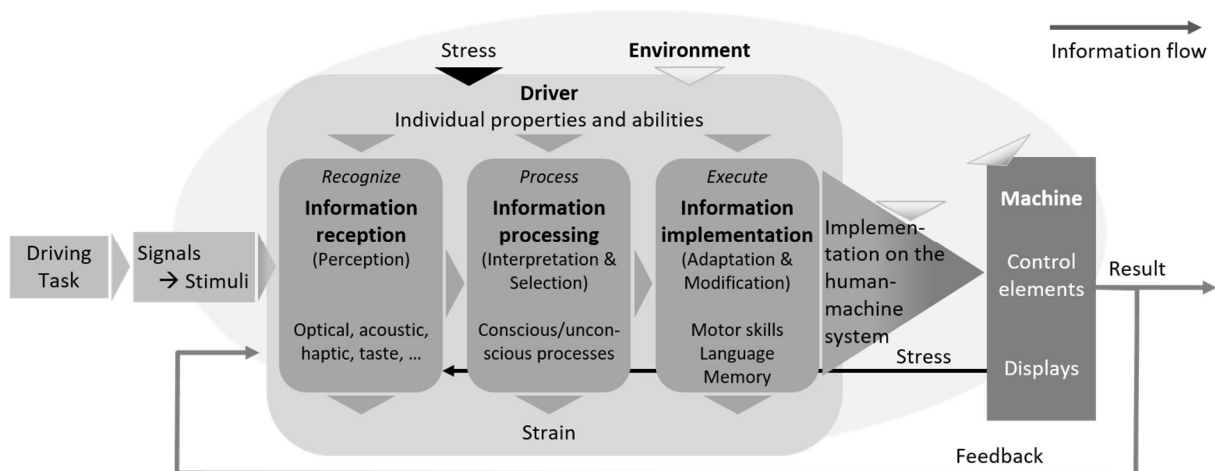


Fig. 2: Control Loop of the Driving Task (based on Bubb 2015; Bubb et al. 2015b)

2.1 Cognitive Processes

The processes of cognitive *information reception*, *processing*, and *implementation* can significantly influence the duration of a movement. First, *information is received* as stimuli with the help of receptors (Schlick et al. 2018). The majority of traffic-relevant information, about 80-90 %, is received via the visual sensory channel (Rockwell 1972). Presentation times of at least 150-250 ms under optimal conditions, like lighting, have been determined for the perception of visual information (Bubb et al. 2015b). Approximately 180 ms are required to fully perceive a sound or noise (ebd.). Information is transmitted fastest through the kinesthetic and haptic channels, so thresholds are relevant for perception (ebd.). In general, an information acquisition time of 200 ms is assumed (ebd.).

Within *information processing* the meaning of signals is recognized, relevant features are identified, decisions are made between alternative actions, and information is linked to memory content in order to plan the *implementation*. Based on this, the human responds through a motor activity, information output, or memory performance. (Schlick et al. 2018)

The duration of cognitive processes depends on the channel of information reception and individual experience. In the case of low experience and unknown situations, the **knowledge-based behavior** takes place. Then, high cognitive capacities are required and a time expenditure of at least several

seconds (Rasmussen 1986). Reaction times to unexpected driving events require 2-3 sec or more, depending on complexity (Donges 2015). With increasing experience and routine, humans act in a **rule-based manner**. Information is recognized and the necessary cognitive capacity decreases, especially that of information processing. The processing time is in the range of 1-2 sec. The **skill-based behavior** is associated with the lowest cognitive capacity. Highly trained actions run quasi-automatically, since received signals are directly converted into information outputs (Lemmer et al. 2021). Reaction times such as control interventions in case of control deviations of the stabilization task amount to a few 100 ms (usually 200 ms). Stabilization and guidance tasks are predominantly skill-based (Donges 2015). This makes vehicle control possible at all, despite the many stimuli from the environment. Varieties of cognitive human models exist to model these cognitive processes in temporal terms. Control approaches describe the stabilization and guidance task, and cognitive architectures depict the decision-making behavior of humans. With regard to the future readiness to take over and the take-over behavior, these models are constantly being further developed. (Scharfe-Scherf et al. 2022)

2.2 Vehicle Operation and Physical Movement Processes

On the one hand, visual information can be received via “scanning” views. The continuous acquisition of the environment is of very short duration, on average approximately 400 ms. On the other hand, so-called areas of interest such as displays and mirrors are fixed with “processing” looks. These views require about twice the time on average. Touchscreen operation requires gaze control of mostly > 800 ms due to the lack of haptic feedback so far. (Bubb et al. 2015a; Schweigert 2003)

Information is transmitted between the driver and the vehicle via human-machine interfaces. **Displays** transmit information in optical, acoustic, and haptic ways. As a result, the user receives information about the environment and feedback about the state of the vehicle. (Bubb et al. 2015a)

The intended purpose is realized via mechanical actuation of **control elements** by human extremities, such as hand, finger, and foot. Control elements include levers, buttons, keys, and pedals. Information can also be transmitted via sensors, such as microphone, camera for speech, facial expression, and gesture recognition. Touchpads are used to enter alphanumeric characters. Control elements with lockability and touchscreens also function as displays. (ebd.)

Control elements can be categorized according to the category *Operation*. *Operation* assigns human extremities to the operating elements for actuating them. With the contact grip, the force is transferred vertically to the element with the finger, usually the index finger. With grasp, a friction or form fit is created with two or three fingers. With the grasping grip, higher orthogonal and tangential forces can be applied. Furthermore, the category *Movement Type* divides the operation into translatory and rotary movements. (ebd.)

3 Models and Systems for Motion Time Determination

The determination and calculation of the duration of movements is widely examined. Here, the focus is on holistic approaches and models or their further developments.

Working time data can be determined via random sample observations, continuous observations and mathematically analytical methods. Only the latter are relevant in this work. Whereby, Methods Time Measurement (MTM) and the methods WORK-FACTOR (WF) and Maynard Operation Sequence Technique (MOST) based on it are of particular importance in practice. Another relevant method for determining the movement time is Fitts' Law and its further developments.

3.1 Predetermined Motion Time Systems

Methods Time Measurement (MTM)

MTM is an analytical-calculation method for determining the time required to carry out an activity. All movements are described using 19 basic motion elements. Standard times are assigned to these basic

motions. The times vary depending on factors, such as distance, required strength, and task complexity. The movements are performed with the finger, hand, arm, eyes, foot, leg, body, or with a combination of these. (MTM Association e. V. 2019)

Work processes are systematically structured and divided into individual movements. The total working time is calculated by summing up these individual times. The MTM basic system (MTM-1) was created in the context of individual mass production. Therefore, the standard times relate to highly practiced movements and base on a uniform standard for human skill, ability, and effort. According to MTM, fully influenceable motion sequences during an assembly task consist of about 80-85 % of the MTM basic motion elements *Reach*, *Grasp*, *Move*, *Position*, and *Release*. MTM is not applicable to mental activities that require more than yes/no-decisions. (MTM Association e. V. 2019)

WORK-FACTOR (WF)

As with MTM, the basic procedure of WF is used for the detailed analysis of movement sequences with regard to their movement elements and the temporal sequence. In this way, variables influencing the duration of elementary movements can be identified. There are six systems, two of which apply to simple mental processes, such as checking and controlling. WF is primarily designed for the analysis of large series and mass production. However, the systems are also used in medium and small series production. (Quick et al. 1962)

Since MTM has become more established on the market, WF is more of a niche product.

Maynard Operation Sequence Technique (MOST)

The MOST system was also developed on the basis of MTM. The system mainly differs from MTM in the use of standardized movement sequence models (Schlick et al. 2018).

3.2 Fitts' Law

The model by Paul M. Fitts predicts the average time required for pointing tasks and touching an object with the hand or finger. The time needed to point quickly and directly at the target object is determined from the distance and the target size. More time is required when an object is farther away or smaller. (Fitts 1954)

Fitts' Law has been extended and supplemented many times. For example, movements according to Fitts were divided into two movement phases. The initial movement is primarily determined by the distance to the object. This movement is characterized through a fast and rough motion in the approximate direction of the target (Graham, MacKenzie 1996). In the final movement, the hand slows down progressively to reach the exact target (ebd.).

Furthermore, the model was extended to targets with a time constraint or limitation, such as blinking or moving targets (Lee, Oulasvirta 2016). Foot movements also follow Fitts' Law and depend on the same geometric parameters (Hoffmann 1991). However, the movement times are twice as long as with visually controlled arm movements or 1-7 times longer than with ballistic arm movements (ebd.). In addition, the approach was adapted to the movement times for operating pedals (Drury 1975). The approach has also been expanded for individual parts of the arm, like fingers, hand, forearm, and upper arm (Hoffmann, Hui 2010). In contrast, the application of Fitts' Law to eye movements is rather controversial (Drewes 2010). Furthermore, the approach has already been discussed for the use in vehicle guidance systems. In time-critical situations, depending on the spatial arrangement, the manual input of information requires a larger dimensioning of the targets and an increase in the distance (MacKenzie 1992).

4 Method

Since the models presented here cannot be evaluated numerically, a qualitative evaluation is carried out. The utility analysis is suitable for examining several alternatives with regard to individual criteria

and to the overall utility value. Although the criteria are evaluated subjectively, the procedure delivers comprehensible, comparable results, since each alternative is evaluated using the same criteria. Due to the similarity between MTM and WF or MOST and the acceptance of MTM on the market, only MTM and Fitts' Law are used for the evaluation.

4.1 Definition of the Decision Criteria

Decision criteria are derived from the requirements for a demanded solution (Breiing, Knosala 1997). For example, duplications, simultaneity or contradictions must be avoided, all requirements must be covered, and criteria must be valid for all alternatives (ebd.). The weighting of criteria is too detailed for this work. Furthermore, the criteria are only rated with 0 points (no fulfillment), 1 point (fulfilment) or 2 points (very good fulfillment).

The tool should provide a precise and reliable prediction, calculation, and analysis of time durations of cognitive processes and for physical motion sequences during manual driving activities. To adequately calculate the duration of a movement, the method must take into account all factors that influence or characterize the movement time. These factors were elaborated in chapter 2. In the following, the factors were translated into decision criteria. Tab. 1 lists these target criteria and a short justification.

Tab. 1: Overview of the decision criteria (target)

Decision criterion (target)	Justification, derivation
Evaluation of the distance from the starting position	Distance functions as basis for time calculation of physical movements in the vehicle
Evaluation of the movement space	Restricted movement space in vehicles may increase complexity of a movement and consequently the movement time
Evaluation of the gaze behavior	Level of practice and dimensioning of display or control element influence the duration of gaze behavior in vehicle
Evaluation of the channel of information reception	Significant differences in time required for information reception depending on the addressed channel
Evaluation of the operating human extremity	See category <i>Operation</i> of control elements; different movement times depending on human extremity used
Evaluation of the gripping method	Gripping method influences the motor performance depending on the required precision
Evaluation of simultaneous movements	Driving task mainly consists of simultaneous movements, which increase the complexity in case of parallel (different extremities) or combined movements (multiple movements of one extremity)
Evaluation of the level of practice	Knowledge-, skill-, or rule-based behavior or frequency of use leads to significant differences of movement times
Evaluation of driver-specific characteristics	Cognitive and motor performance influence movement time through e.g., strength, mobility, comprehension, reaction time
Evaluation of the Movement Type of the control element	See category <i>Movement Type</i> of control elements (translational, rotational); movement type influences time through the extremity used, gripping method, sensitivity, strength
Evaluation of the dimensioning	Required precision (also of the eye) depends on dimensioning of the target object (e.g., display, control element) and influences the motor performance and time
Evaluation of the sensitivity and force	Required precision or force on the control element impacts the motor performance and time
Modularity , analysis of partial movements	For implementation in <i>HoMoTo</i> approach, analysis of individual and overall movements is needed

The space between a starting position and the target object functions as basis for the time calculation of physical movements. Therefore, the model should take into account geometric-spatial factors, such as the **distance**. Since the restricted movement space in vehicles may increase the complexity and consequently the movement time, the available **movement space** must be considered. The dimensioning of the object and the level of practice affect the **viewing time** (search, focus). The **channel of information reception** significantly influences the total duration. The **human extremity** (category *Operation* of control elements) and the **gripping method** of the human influence the movement duration depending on the motor performance and required operating precision. **Simultaneous movements** of different or the same human extremities have a strong impact on cognitive abilities, which improve with a higher level of practice. More precise movement times are achieved by differentiating the **level of practice** and linking them to the activities of the primary, secondary, and tertiary driving tasks. Furthermore, **driver-specific characteristics** and personal cognitive and motor performance must be taken into account. The duration of a movement is influenced by the object to be operated in terms of its **Movement Type** (category of control elements), **dimensioning**, required **sensitivity and force**. Finally, the model should determine the total movement duration, but also enable the analysis and calculation of the times of individual movements in a **modular** manner.

For the evaluation of the transferability of the models to driver take-overs in automated driving, desired criteria were also identified and listed in Tab. 2.

Tab. 2: Overview of the decision criteria (desired)

Decision criterion (desired)	Justification, derivation
Evaluation of movements of the entire body	To return back to the driving task from an NDRA, complex movements, like straightening or turning the body may be required
Integration of adjustment paths of interior components	NDRAs may require complex seat adjustments. During take-over, the time for reconfiguration needs to be considered as well as the time for further driver-independent factors
Evaluation and linking with vehicle dynamics	Duration of complex movements of the human may be influenced through (unpredictable) vehicle dynamics
Evaluation of comfort	Perceived comfort differs according to movement times and spaces
Identification of time-dominating factors and optimization potentials	Since time is a critical factor and influences the perceived comfort when taking over, recommendations for the design of the take-over and the vehicle interior is required (in terms of time, ergonomics)

During driving automatically, depending on the level of automation, new and complex activities in the vehicle and correspondingly more complex movements of the entire body, like straightening up from a lying position, are possible. Therefore, the tool must take into account movements of the **entire body** and the interaction of individual extremities when determining the movement time. Furthermore, **adjustment paths of interior components** must also be included in the time calculation. The **vehicle dynamics** have a stronger effect on the complex movements during the take-over with extended movement spaces than on the usual movements associated with the driving task. In addition, the vehicle dynamics can be anticipated during manual driving and body movements can be adjusted accordingly. Therefore, a link with the driving dynamics is desirable. In the future, the perception of **comfort** during take-over phases will e.g., defined by the available movement times and spaces. Finally, the tool should serve to optimize driver take-over phases. For this purpose, the **time-dominating factors** should be identifiable and **optimization potentials** should be shown.

4.2 Evaluation of the Models and Result

The evaluation of the models according to the developed criteria is shown in Tab. 3. For each criterion, the rating from 0 to 2 points and a short explanation is given. A selection of the criteria is discussed in more detail below. To reduce complexity only the basic MTM system (MTM-1) is evaluated here.

Tab. 3: Evaluation of the models

Decision criterion	MTM	Fitts	Evaluation, assessment
Distance	2	2	MTM, Fitts: serves as basis parameter for time prediction
Movement space	0	0	MTM, Fitts: considered indirectly through changing parameter <i>Distance</i>
Gaze behavior	2	0	MTM: basic movement element <i>Eye Motions</i> with case variants; Fitts: application for eye movements rather controversial
Channel of information reception	0	0	MTM, Fitts: <i>not considered</i>
Human extremity	2	1	MTM: differentiation between hand, body, leg, foot movements; Fitts: included in further developments of the model
Gripping method	2	1	MTM: differentiation between gripping method within basic movement element <i>Grasp</i> ; Fitts: originally only pointing tasks, later for several parts of the arm
Simultaneous movements	2	0	MTM: differentiation between movement combinations (simultaneous, combined, complex, compound); Fitts: <i>not considered</i>
Level of practice	1	0	MTM: MTM-1 bases on skill-based behavior. Further systems, like small series production, may be applicable to other levels of practice; Fitts: <i>not considered</i>
Driver-specific characteristics	0	0	MTM, Fitts: <i>not considered</i> (MTM is used and orientated to a standard performance)
Movement Type	2	0	MTM: differentiation through basic motion elements <i>Position, Apply Pressure, Turn</i> ; Fitts: <i>not considered</i> (pointing tasks only)
Dimensioning	1	2	MTM: considered indirectly through case description of target object position; Fitts: by parameter <i>width of the target object</i>
Sensitivity, force	1	0	MTM: subjective evaluation through case variants of the basic motion elements <i>Position, Apply Pressure</i> ; Fitts: <i>not considered</i>
Modularity	2	1	MTM: model bases on division into partial movements; Fitts: division of movements and summarization are possible
Entire body	1	0	MTM: basic motion elements like <i>Turn Body</i> , but under assembly conditions; Fitts: further developments for individual body parts only
Adjustment paths (interior components)	1	0	MTM: calculation analog to <i>Process Times</i> ; Fitts: <i>not considered</i>
Vehicle dynamics	0	0	MTM: consideration of external load, but for assembly conditions only; Fitts: <i>not considered</i>
Comfort	1	0	MTM: aims for comfortable movements, consideration of the difficulty of a task; Fitts: <i>not considered</i>
Time-dominating factors, optimization potentials	2	1	MTM: model bases on division into partial movements; Fitts: by adjusting the parameters of the calculation formulas
Total	22	8	

The MTM approach receives 17 points of the target criteria and a total of 22 points, and Fitts' Law receives 7 and 8 points respectively.

Relevant geometric-spatial factors can be mapped well to very well by MTM. However, restricted **movement spaces** (0 p.) can only be evaluated by changing parameters, such as **distance** (2 p.). For example, a small distance can negatively affect the movement. **Gaze behavior** can be assessed by the

MTM basic motion element *Eye Motions* and differentiated according to case variations, such as *Eye Focus*, *Eye Travel* or *Read*. This allows the visual information reception to be calculated in terms of time (2 p.). Other information acquisition channels are not taken into account (0 p.). Also, during the driving task information is permanently taken in via all sensory channels, whereby the predominant part (80-90 %) visually (Rockwell 1972). Movement times of different **human extremities** can be mapped well by MTM (2 p.). The MTM time values are based on a standard performance, which assumes a defined **level of practice**. Thus, the time values of MTM-1 can be assumed to approximate the level of skill-based behavior of an experienced driver, whereby highly practiced movements can generally be described well (1 p.).

On the other hand, cognitive processes can only be described to some extent and implicitly, for example with the aid of the time values of the motion elements for *Simultaneous* or *Complex Motions*. To differentiate between the levels of cognitive control other MTM systems must be used, e.g. for individual production. Even though the basic system takes different levels of difficulty into account, no **individual performance** is assessed (0 p.).

The first studies for the transferability of MTM to isolated movements of the primary and secondary driving task have already been conducted at the Institute for Engineering Design and Industrial Design at the University of Stuttgart. The motion sequences can be described with the MTM basic motion elements in most cases. The movement times determined by way of example deviate considerably from the MTM standard time values. Reasons for this include the fact that movement times can be predetermined by external circumstances, such as steering speed. In addition, the focus is not on time-optimized motion, but on safe and comfortable vehicle control.

The model according to Fitts shows only low suitability for time determination in driving activities. Geometric-spatial factors can be assessed well, but less extensively than with MTM: Like MTM, Fitts' Law considers the restricted **movement space** (0 p.) only by means of the **distance** (2 p.). The analysis and calculation of **eye movements** is considered rather controversial (0 p.) (Drewes 2010). Likewise, the **channel of information reception** is not considered (0 p.). The time assessment refers only to single **human extremities**. The differentiation according to the moving extremities was investigated sporadically in further developments of the model, especially for different parts of the arm and foot movements (1 p.). Thus, it is possible to distinguish between different types of **gripping** (1 p.). Fitts' model needs to be extended for **simultaneous movements**, taking into account the mutual influence of parallel movements (0 p.). **Levels of practice** (0 p.) and cognitive processes are not assessed, nor are the required **sensitivity and force** (0 p.).

Due to its origins in the manual manufacturing environment, MTM is designed to evaluate movements of the **entire body**. In some cases, suitable basic motion elements (such as *Turn Body* or *Bend*) already exist for the extension to take-over processes. However, the conditions there are very different from those in the vehicle interior (1 p.). Necessary process times of machines are also calculated in the MTM process. Similarly, **adjustment paths of interior components** could be evaluated (1 p.). Basically, the model aims to improve processes from an ergonomic point of view, thereby maximizing the perceived **comfort** during the execution of movements (1 p.). A comfort evaluation is currently not possible. Identifying **time-dominating factors** is one of the main goals of MTM (2 p.).

The calculation formulas according to Fitts' Law show partially transparent the individual relevant **influencing parameters on time** (1 p.). Therefore, the model also has the potential to adapt individual existing parameters for suitability to the vehicle interior. However, the original model and the current further developments are not sufficient for a description capability of take-over processes.

5 Discussion

The utility analysis suggests that the MTM method is significantly better suited for calculating movement times in manual vehicle control than Fitts' Law.

The established decision criteria were derived from the previous literature review for the manual driving task. Due to the limited scope of this work, the number of criteria was restricted. Whereby, not all relevant criteria were considered. For the transfer to take-over processes an in-depth literature research and practical studies to determine typical, common motion sequences in take-over scenarios is necessary. This allows more appropriate criteria for model evaluation to be identified. The omission of weighting as well as the scoring from 0 to 2 points proved to be appropriate for the subject of this work. Even if the criteria partially influence each other duplications, simultaneity, and contradictions could be avoided.

The MTM method is a comprehensive, systemic tool for making qualitative and quantitative influencing variables visible. The underlying short-cycle, repetitive workflows are similar to the motion sequences during the stabilization task and other frequent movements. This has already been proven to some extent in an initial study at the Institute for Engineering Design and Industrial Design at the University of Stuttgart. An extension of the basic MTM system investigated here to more driving tasks is possible through new and further developments of existing basic MTM movements, and with the help of additional MTM systems, e.g. for small series production. This also enables to focus more on the differences in motion sequences depending on the degree of practice and the frequency of operation. Since MTM cannot be used to calculate movement times during the driving task, these values must be linked to values determined from previous movement studies, possibly from sports and movement science, or re-examined. Furthermore, other parameters influencing the movement time, such as physical-spatial conditions of the driver, like seat position, posture, anthropometry, interior dimensions, and design, cognitive factors, like stress and strain and the situation awareness, and (technical) framework conditions must be identified and the impact of these has to be investigated. In particular, parameters that influence cognition, like mood, affects, and emotions, must be included in the process. These parameters were not considered in the above evaluation. With regard to external factors, a distinction must be made between intrinsically motivated movements, especially in the case of tertiary driving tasks, and extrinsically motivated movements, such as the necessary steering speed. In contrast, humans react to the vehicle movements during an automated journey and adapt their motor movement to the vehicle dynamics.

MTM has already been criticized for not taking into account the holistic character of human work from an occupational psychology perspective consisting of planning, executing, directing, and controlling activities (Schlick et al. 2018). The evaluation here has also shown that no predictions of necessary times of cognitive processes, especially information reception and processing, are possible. As the multisensory interaction of vehicle interior and occupants will intensify in the future, channels of information reception need to be put more into focus.

As of today, comfort evaluation, which is increasingly relevant for take-over scenarios, is yet not possible with MTM. However, the time available to the driver may determine his or her perceived comfort. By identifying time-dominating factors, the OEM is able to optimize the interior design resulting into an increased comfort. In automated vehicles, the channels of information reception as well as situation awareness assessment will gain in importance. The driver shares the driving task with the vehicle during the take-over phase, which is why correct communication between human and machine determines the safety of the ride. These gaps can be closed by linking them with existing cognitive architectures, such as ACT-R, and with previously determined times of cognitive processes. ACT-R is also based on the description logic by means of individual modules. Furthermore, an integration of the results into already existing digital human models is useful.

Due to its modular structure, the MTM method as of now offers potential for the analysis and evaluation of take-over scenarios and durations. Also the *HoMoTo* approach (Schäffer et al. 2021) rests on a modular principle, as the entire take-over phase is divided into sub-steps and tasks. Based on assessment results outlined above, a combination of the two approaches appears to be promising.

6 Summary and Outlook

MTM is basically suitable as a calculation and analysis tool as well as for the prediction of movement times in manual driving, especially for the analysis of times of physical movements. Nevertheless, MTM standard times have to be recalculated in practical studies and on the basis of previous findings. A large number of the basic MTM motion elements can be transferred to driving activities, however further or new development is necessary. Further limitations arise in the case of infrequent, less practiced movements and, above all, in the case of cognitive processes.

The results above point out a potential for transferring MTM to take-over scenarios in automated vehicles. But yet, a link with the *HoMoTo* approach and the integration of existing cognitive human models, such as ACT-R, is applicable for calculating and predicting movement times during driver take-overs. By integrating the tool into digital human models the OEM can be supported in the design of take-over scenarios and in securing different NDRA already in the development process.

Literature

- Breiling und Knosala 1997 BREILING, Alois; KNOSALA, Ryszard: *Bewerten technischer Systeme - Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- Bubb 2015 BUBB, Heiner: Einführung. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN, Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 1–16.
- Bubb et al. 2015a BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; BREUNINGER, Jurek; GOLD, Christian; HELMBRECHT, Magnus: Systemergonomie des Fahrzeugs. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN, Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 259–344.
- Bubb et al. 2015b BUBB, Heiner; VOLLRATH, Mark; REINPRECHT, Klaus; MAYER, Erhard; KÖRBER, Moritz: Der Mensch als Fahrer. In: BUBB, Heiner; BENGLER, Klaus; GRÜNEN, Rainer E.; VOLLRATH, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 67–162.
- Donges 2015 DONGES, Edmund: Fahrerhaltensmodelle. In: WINNER, Hermann; HAKULI, Stephan; LOTZ, Felix; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 17–26.
- Drewes 2010 DREWES, Heiko: *Eye Gaze Tracking for Human Computer Interaction*. Ludwig-Maximilians-Universität, Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik, Dissertation 2010.
- Drury 1975 DRURY, Colin G.: *Application of Fitts' Law to Foot-Pedal Design*. In: *Human Factors* 17 (1975), Nr. 4, S. 368–373.
- Fitts 1954 FITTS, Paul M.: *The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement*. In: *Journal of Experimental Psychology* 47 (1954), Nr. 6, S. 381–391.
- Graham und MacKenzie 1996 GRAHAM, Evan D.; MACKENZIE, Christine L.: *Physical Versus Virtual Pointing*. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (1996), S. 292–299.
- Hoffmann 1991 HOFFMANN, Errol. R.: *A Comparison of Hand and Foot Movement Times*. In: *Ergonomics* 34 (1991), Nr. 4, S. 397–406.

- Hoffmann und Hui 2010 HOFFMANN, Errol R.; HUI, Michael C.: *Movement Times of Different Arm Components*. In: *Ergonomics* 53 (2010), Nr. 8, S. 979–993.
- Kupschick 2021 KUPSCHICK, Stefan: *Modellierung menschähnlichen Fahrerverhaltens*. Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation 2021.
- Lee und Oulasvirta 2016 LEE, Byungjoo; OULASVIRTA, Antti: *Modelling Error Rates in Temporal Pointing*. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2016), S. 1857–1868.
- Lemmer et al. 2021 LEMMER, Karsten; JIPP, Meike; BUBB, Heiner; VÖGEL, Hans-Jörg; JUNG, Matthias; LAUKART, Georg; VORBERG, Thomas: *Mensch-Technik-Kooperation und Fahrzeuginnenraum*. In: PISCHINGER, Stefan; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021, S. 1161–1249.
- MacKenzie 1992 MACKENZIE, I. Scott: *Movement Time Prediction in Human-Computer Interfaces*. In: *Proceedings of the Conference on Graphics Interface '92* (1992), S. 140–150.
- Marberger et al. 2017 MARBERGER, Claus; MIELENZ, Holger; NAUJOKS, Frederik; RADLMAYR, Jonas; BENGELER, Klaus; WANDTNER, Bernhard: *Understanding and Applying the Concept of "Driver Availability" in Automated Driving*. In: *8th Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (2017), S. 595–605.
- MTM Association e. V. 2019 MTM ASSOCIATION E. V.: *MTM-1 Lehrgangsunterlage*. Hamburg: Eigenverlag MTM Association e. V., 2019.
- Quick et al. 1962 QUICK, Joseph H.; DUNCAN, James H.; MALCOLM, James A.: *Work-Factor Time Standards: Measurement of Manual and Mental Work*. New York: McGraw-Hill, 1962.
- Rasmussen 1986 RASMUSSEN, Jens: *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. New York: North-Holland, 1986.
- Rockwell 1972 ROCKWELL, Thomas H.: *Skills, Judgment and Information Acquisition in Driving*. In: FORBES, Theodore W. (Hrsg.): *Human Factors in Highway Traffic Safety Research*. New York: John Wiley & Sons, 1972, S. 133–164.
- SAE J3016 2014 Norm SAE J3016 2014. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*.
- Schäffer et al. 2021 SCHÄFFER, Miriam; POMIERSKY, Philipp; REMLINGER, Wolfram: *Hand Over, Move Over, Take Over - What Automotive Developers Have to Consider Furthermore for Driver's Take-Over*. In: BERTRAM, Torsten (Hrsg.): *Automatisiertes Fahren 2021*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021, S. 127–142.
- Scharfe-Scherf et al. 2022 SCHARFE-SCHERF, Marlene S. L.; WIESE, Sebastian; RUSSWINKEL, Nele: *A Cognitive Model to Anticipate Variations of Situation Awareness and Attention for the Takeover in Highly Automated Driving*. In: *Information* 13 (2022), Nr. 9, S. 418.
- Schlick et al. 2018 SCHLICK, Christopher; BRUDER, Ralph; LUCZAK, Holger: *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- Schweigert 2003 SCHWEIGERT, Manfred: *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation 2003.
- Yoon et al. 2021 YOON, Sol H.; LEE, Seul C.; JI, Yong G.: *Modeling Takeover Time Based on Non-Driving-Related Task Attributes in Highly Automated Driving*. In: *Applied Ergonomics* 92 (2021).

Design for TRL – Technologiereifes Design entlang von Entwicklungsprozessen der angewandten Forschung

Design for TRL – Technologically Mature Design Along Development Processes of Applied Research

Christian Hermeling^{1,3}, Thomas Theling^{1,2}, Markus Forytta^{1,2}, Jens Krzywinski^{1,4}

¹Technische Universität Dresden, Professur für Technisches Design, Dresden
christian.hermeling@tu-dresden.de

²Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, 01277 Dresden
thomas.theling@iws.fraunhofer.de

³Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 09126 Chemnitz

⁴Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, 01069 Dresden

Abstract (deutsch): Das vorliegende Paper beschreibt die Entwicklung eines Prozesses zur systematischen Einbindung von Designern in die Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Kontext angewandter, technologieorientierter Forschungs- und Transferfragestellungen. Design ist in vielen Lebensbereichen zunehmend unverzichtbar und als Disziplin in industriellen Entwicklungsprozessen weitgehend etabliert. Auch für die angewandte Forschung gewinnt Design vermehrt an Bedeutung, da es helfen kann, den Weg von Technologien in den Markt zu realisieren. Technology-Readiness-Level (TRL) erlauben eine standardisierte Bewertung der Technologie und geben Auskunft über Reife und Überführbarkeit dieser in eine marktrelevante Umsetzung. Trotz dieser genormten Bewertung beurteilen Außenstehende in der Praxis häufig subjektiv – vorzugsweise anhand des äußeren Eindrucks und im Abgleich mit persönlichen Erfahrungen statt objektiven Kriterien. Die Studie untersucht diese Diskrepanz, erprobt Designmethoden in sechs Projekten und diskutiert Erkenntnisse. Vorgeschlagen wird ein Prozess, der eine Ausgewogenheit von technologischer und designtechnischer Reife durch strukturierte designmethodische Unterstützung gewährleisten kann.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Industriedesign, Angewandte Forschung, TRL, Demonstrator, Entwicklungsprozess

Abstract (english): This paper describes the development of a process for systematically involving designers in research and development work in the context of applied, technology-oriented research and transfer issues. Design is increasingly indispensable in many areas of life and is widely established as a discipline in industrial development processes. Design is also becoming increasingly important for applied research, as it can help to realise the path of technologies into the market. Technology readiness levels (TRL) allow a standardised assessment of the technology and provide information about its maturity and transferability into a market-relevant implementation. Despite this standardised assessment, in practice non-involved persons often judge subjectively – preferably on the basis of external impressions and in comparison with personal experience rather than objective criteria. The study examines this discrepancy, tests design methods in six projects, and discusses findings. A process is proposed that can ensure a balance of technological and design maturity through structured design methodological support.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Industrial Design, Applied Research, TRL, Demonstrator, Development Process

1 Einleitung: Problemstellung und Motivation

Im Alltag sind Menschen heute von professionell gestalteten Produkten und Lösungen umgeben. Design ist in vielen Lebensbereichen zunehmend unverzichtbar. In der Studie „Die Schönheit des Mehrwertes“ geben nahezu 70% der befragten Unternehmen an, dass Design einen großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse ihres Unternehmens hat, bei der Markteinführung neuer Produkte wird Design sogar von 95% als ein wichtiger Faktor angesehen (Markenverband et al. 2010). Design in seinen unterschiedlichen Disziplinen und Ausprägungen gewinnt damit auch für die Arbeit von Institutionen der angewandten, technologieorientierten Forschung vermehrt an Bedeutung. Moultrie stellte bereits 2015 fest, dass sich zahlreiche Studien explizit mit der Einbeziehung von Design-Fachwissen in die Entwicklung neuer Technologien im industriellen Kontext befassen und es Anhaltspunkte für eine resultierende Potenzialsteigerung für die künftige Anwendung gibt. Trotzdem gebe es wenige Arbeiten, die sich mit potenziellen Auswirkungen von Design auf die wissenschaftliche Forschung im akademischen Bereich befassen und klären, ob eine Überwindung des „Valley Of Death“ positiv beeinflusst werden kann (Moultrie 2015). Eine tiefgreifende Veränderung innerhalb der angewandten Forschung ist seitdem nicht zu erkennen und innovativ orientierte Prozesse sind auf diese Entwicklungen oft noch nicht angepasst. Offen ist ebenso die Frage, wie man den Wissenschaftlern den Wert von Designmethodik bewusstmachen kann (Mesa et al. 2019).

Außer Frage steht, dass erfolgreiche Innovationen auf dem Weg von der Idee zum Markt nicht nur technisches mit ökonomischem Wissen verbinden, sondern Kunden und Anwendende einen Nutz- und Mehrwert in neuen Angeboten finden müssen. Technology-Readiness-Level (TRL) (Mankins 1995) erlauben eine standardisierte Bewertung des Entwicklungsstandes verschiedener Technologien und geben in dieser Form Auskunft über die Reife und Überführbarkeit einer Technologie in die wirtschaftliche Umsetzung. Trotz dieser genormten Bewertung ist das Erleben von Produkten – im Umfeld der angewandten, technologieorientierten Forschung als Forschungs(zwischen)ergebnisse in Form von Demonstratoren und Prototypen oder auch Visualisierungen zu verstehen – jedoch durch individuelle und zum Teil stark subjektive Faktoren der Nutzer geprägt (Krzywinski & Wölfel, 2021). Der subjektive Eindruck ist dabei maßgeblich vom äußeren Erscheinungsbild und dem Abgleich mit persönlichen Erfahrungen statt objektiver Kriterien bestimmt (Moser 2012; Trauernicht 2015). Dieses Verhalten kann in der Forschungspraxis in weiten Teilen auf Projektpartner, potenzielle Kunden sowie Gutachter übertragen werden. Krzywinski und Wölfel (2021) stellen ferner fest, dass es gerade bei komplexen Produkten entscheidend ist, dass deren Funktionen und Eigenschaften klar erkennbar sind und ein Verständnis für die Anwendung erzielt werden kann.

Zusammengenommen entsteht hier in vielen Fällen eine Lücke, die diese Studie als „TRL-Gap“ bezeichnet, da zwischen technologischer Reife und subjektivem Empfinden eine Diskrepanz vorherrscht. Anhand einer qualitativen Beobachtung an drei Fraunhofer-Instituten (Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU sowie Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI) wurde festgestellt, dass diese in einem überwiegenden Teil negativ ist – bedeutet, dass das subjektive Empfinden niedriger ausfällt, als es das TRL objektiv begründen ließe. Dies behindert nicht selten eine ambitionierte Fortsetzung des Forschungs- und Entwicklungsprojekts (i.d.F. FuE-Projekt), verlangsamt die industrielle Überführung oder bedeutet gar das Ende des Forschungsvorhabens.

Design in seinen unterschiedlichen Disziplinen und mit seinen Methoden ist in der Lage, den subjektiven Eindruck von Forschungs(zwischen)ergebnissen (i.d.F. Forschungsergebnisse) zu beeinflussen. Moultrie (2015) gibt basierend auf den Erörterungen von Sainsbury, Rust und Driver eine Reihe von Vorteilen und Mehrwerten an, die eine Einbindung von Design mit sich bringen könnte. Als zentrale Elemente können hier die Einbeziehung potentieller Nutzer und des Marktes, die Unterstützung bei der Kommunikation durch Visualisierungen, die Evaluation mittels Prototyping sowie die Verbreitung der Ergebnisse durch Demonstratoren aufgeführt werden. Eine wissenschaftlich fundierte Datenlage, die diese Behauptungen stützen würde, ist bislang nicht bekannt.

Die vorliegende Studie teilt daher Moultries Hypothese, dass eine systematische Einbindung von Designern in die wissenschaftliche Arbeit erhebliche Vorteile mit sich bringen würde. In Form eines Forschungsdesigns im Kontext der angewandten, technologieorientierten Forschung an den drei Fraunhofer-Instituten IWS, IWU und IVI sowie mit Rückkopplung zu vorangegangenen Arbeiten der Professur für Technisches Design der TU Dresden gibt die vorliegende Studie einen systematischen Ansatz für eine Zusammenarbeit von Forschern und Designern. Sie dokumentiert Beobachtungen und diskutiert erste Erkenntnisse im Rahmen der Arbeit an sechs Fallstudien. Abschließend gibt das Paper einen Ausblick auf die zukünftige Forschung.

2 Betrachtete Arten von Forschungsergebnissen

Die angewandte, technologieorientierte Forschung ist auch im Kontext der Fraunhofer-Gesellschaft ein weitgefasstes Feld. Ebenso sind die an dieser Studie beteiligten Fraunhofer-Institute vielseitig ausgerichtet, ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeit erstreckt sich über unterschiedliche Branchen und Forschungsfelder. Darüber hinaus variieren die Forschungsergebnisse mitunter stark von FuE-Projekt zu FuE-Projekt. Für die Betrachtungen innerhalb dieser Studie sowie die Auswahl der zu evaluierenden und zu bearbeitenden sechs Fallstudien wurden daher vier Arten von Forschungsergebnissen definiert:

Zentral sind dabei Demonstratoren (1) und Prototypen (2), welche sich in ihrer jeweiligen Definition in der Literatur nicht immer deutlich voneinander trennen lassen. Die Studie bedient sich daher der Definition nach Bobbe et al. (2023). Die Autoren leiten in ihrer Arbeit für Forschung und Industrie gleichermaßen gültig ab, dass Demonstratoren hauptsächlich kommunizieren und nicht zwingend Ideen über die Zukunft bewerten. Für Prototypen stellen sie das Gegenteil fest – sie bewerten hauptsächlich und kommunizieren nicht unbedingt eine Idee über die Zukunft. Wie Bild 1 verdeutlicht, sind die Grenzen in der Praxis dabei fließend und ein entsprechendes Forschungsergebnis kann gleichzeitig mehrere Zwecke erfüllen, wie es Moultrie (2015) bereits für Demonstratoren belegte.

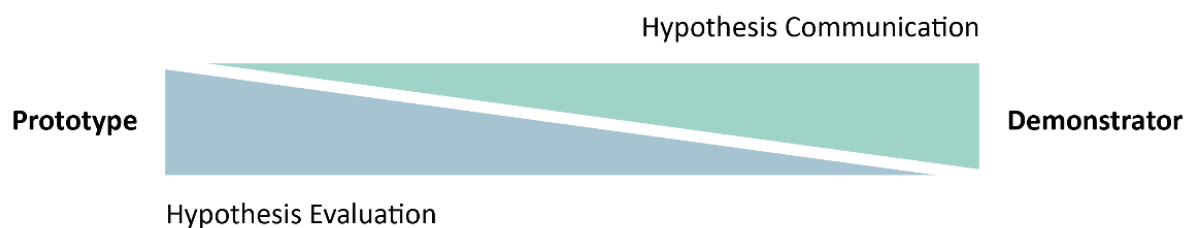


Bild 1: Prototypen und Demonstratoren (Bobbe et al. 2023, S.4)

In selteneren Fällen kann im Rahmen der Arbeit an den Fraunhofer-Instituten zudem von seriennahen Industrieanwendungen oder Kleinserien (3) gesprochen werden. Von Demonstratoren und Prototypen unterscheidet diese ein hohes TRL (ab ca. 7) und damit verbunden ein Produkt-naher Charakter.

Im Bereich früher Forschungs- und Entwicklungsstadien sowie niedriger TRL definiert die Studie Zukunftsvision oder Konzeptstudien (4) als Forschungsergebnisse. Hier werden nicht unmittelbar umsetzbare Visionen für die Zukunft skizziert und es entstehen nicht-physische Forschungsergebnisse in Form von Bildmaterial, Grafiken, Videoanimationen oder ähnlichem.

3 Objektive Parameter und subjektive Einschätzungen

Die Studie bedient sich auf Seite der objektiven Kriterien den TRL, die im Ursprung auf eine Entwicklung der NASA zurückgehen (Mankins 1995). TRL erlauben eine vergleichbare Bewertung des Entwicklungsstandes verschiedener Technologien und wurden in den vergangenen Jahren auf einige Entwicklungsbereiche übertragen. So werden diese auch im Kontext der angewandten,

technologieorientierten Forschung bereits eingesetzt, um die Zustände einer Technologie im Transfer von der Forschung hin zum Markt zu beschreiben. Sie bieten grundsätzlich eine gute Passfähigkeit für den auch im Rahmen dieser Studie betrachteten Forschungs- und Entwicklungsbereich (vergleiche Bild 2). Allerdings besteht kein allgemeingültiger Konsens über die Definition von Technologie-Reifegraden im Kontext der angewandten, technologieorientierten Forschung – auch bei Fraunhofer selbst kommen unterschiedliche Beschreibungen dieser Stufen zum Einsatz.

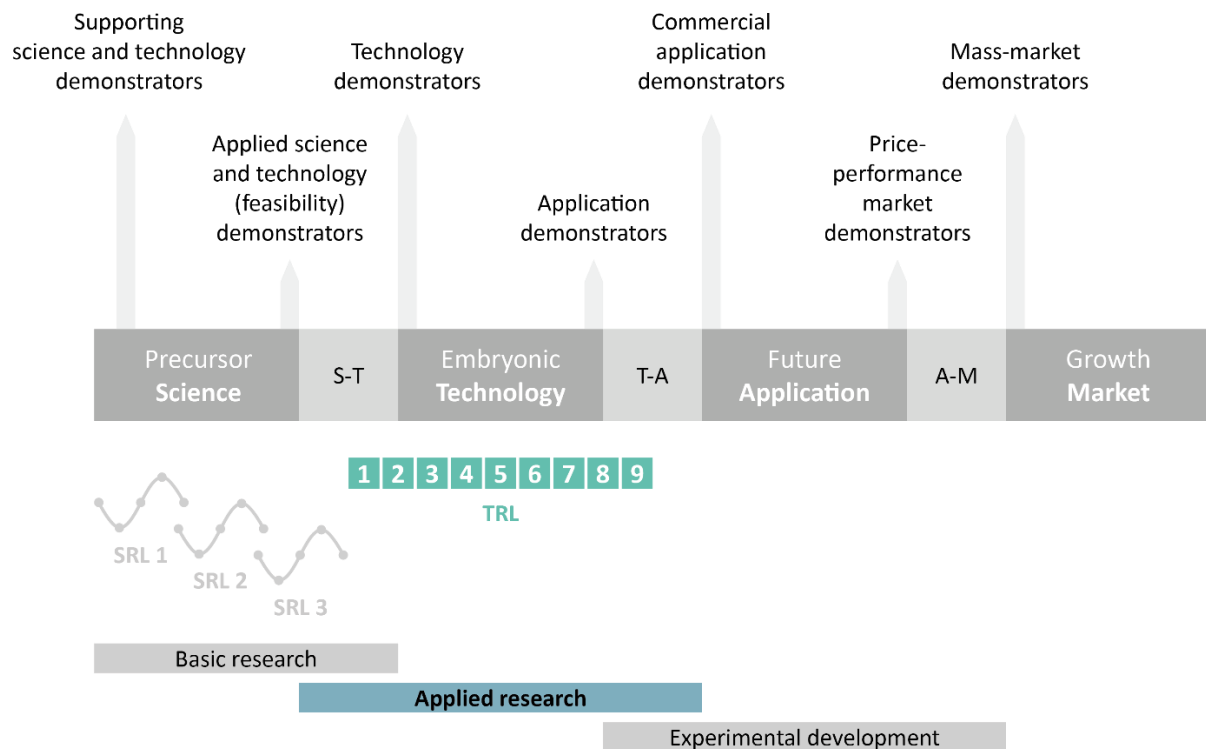


Bild 2: Vergleich von OECD, STAM, TRL und ASRL (Moultier 2015, S.5, Fig.3)

Während die TRL ein ziemlich genau definiertes (eindimensionales) Spektrum zwischen TRL 1 und TRL 9 aufzeigen, ist eine konkrete Definition auf subjektiver Ebene schwer möglich, da die Einflussfaktoren sehr divers sind.

Krzywinski und Wölfel verstehen Produkte als interaktive Objekte „innerhalb von technischen, sozialen, kulturellen, ökologischen und ökonomischen Kontexten“ (Krzywinski und Wölfel 2021, S. 684). Daraus resultierend müssten nicht nur technische Anforderungen, sondern auch psychologische und physiologische Bedürfnisse verschiedener Stakeholder, vor allem der Nutzer, über den Lebenszyklus der Objekte hinweg Berücksichtigung finden.

Nach Moser (2012) ist ein passender Funktionsumfang die Grundlage eines erfolgreichen Produkts, für eine gute User Experience müssten diese Funktionen jedoch zusätzlich in einer bestimmten Qualität vorhanden sein. Nur so könne man in allen Situationen die Erwartungen der Nutzer erfüllen. Nach ISO-Norm 9126 sind diese nicht-funktionalen Anforderungen für den Software-Bereich als Funktionalität, Benutzbarkeit, Zuverlässigkeit, Effizienz und Wartbarkeit zusammengefasst. Im Zuge des Entwicklungs- und Designprozesses könnten diese Anforderungen über Methoden wie Stakeholder-Interviews, Marktanalyse und Nutzerforschung erarbeitet werden oder aus Vorgaben und Rahmenbedingungen resultieren (Moser 2012).

Aus dem Software-Bereich heraus transferieren Wölfel et al. (2013) das Modell der Benutzererfahrung im Interaktionsdesign von Anderson (vergleiche Bild 3) auf das Industriedesign. Produkte müssten demnach nicht nur funktional, zuverlässig und benutzbar (untere Ebenen), sondern zudem bequem,

angenehm und bedeutungsvoll (obere Ebenen) für die Nutzer sein. Erleben sei ein ganzheitlicher Prozess, an dem alle Sinnesorgane beteiligt sind. Das wichtigste Element des Erlebens ist dabei die visuelle Wahrnehmung (Wölfel et al. 2013).

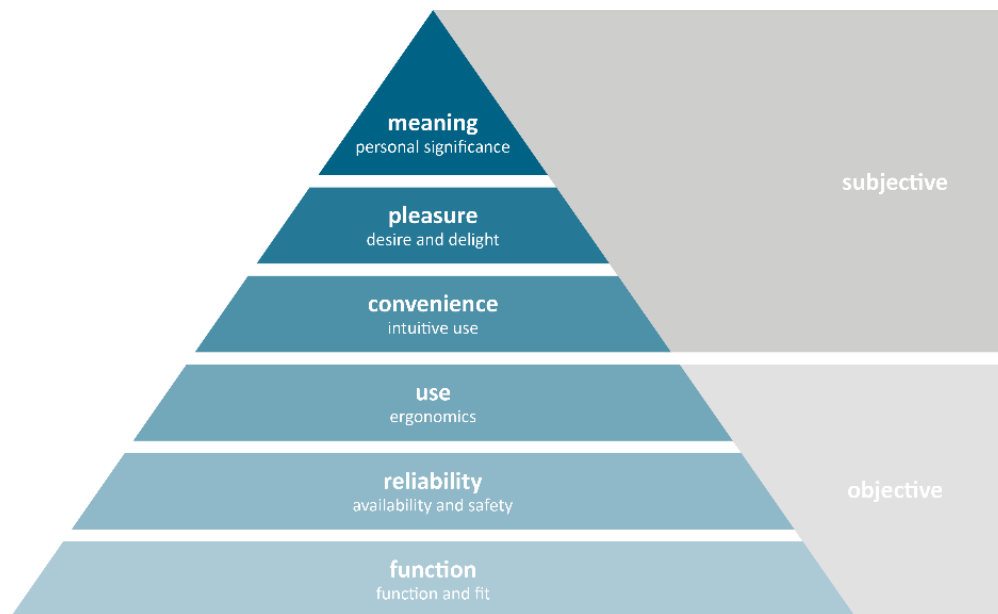


Bild 3: Pyramidenmodell der Benutzererfahrung (Anderson 2006, S.15)

Zusammenfassend definiert sich ein „gutes“ Forschungsergebnis durch die Abbildung dieser funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen, des jeweiligen Einsatzszenarios sowie des Evaluations- bzw. Demonstrationsziels. Auf den letzten Punkt bezugnehmend identifiziert Moultrie (2015, Kapitel 5) in seiner Studie zwölf Arten von Demonstratoren und nimmt eine Klassifizierung vor. Zu diesen Arten zählen unter anderem:

- Visualisierungen potenzieller zukünftiger Anwendungen
- Demonstrationen der technischen Machbarkeit potenzieller künftiger Anwendungen
- Demonstration des Potenzials zur Vergrößerung und Reproduktion in großem Maßstab
- Demonstratoren, um potenzielle Geldgeber zu überzeugen

Abhängig von diesen Arten und den damit verbundenen Zielen kann eine Bewertung erfolgen und auch eine Messbarkeit erreicht werden: So können beispielsweise ergonomische Aspekte mit entsprechenden Tabellenwerken abgeglichen werden. Das Erleben vor, während und nach der Nutzung durch eine schnelle, sichere und einfache Montage des Gerätes, eine intuitive Bedienung oder eine gute Wartbarkeit bewertet werden.

4 Ziele und Vision

Ziel ist es, Designmethoden im frühestmöglichen Projektstadium in FuE-Projekte der angewandten, technologieorientierten Forschung zu integrieren und über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg den wahrgenommenen Technologiereifegrad derart zu erhöhen, dass er stets dem jeweiligen technischen Entwicklungsstand entspricht. Dies soll durch eine zielgerichtete und strukturierte, designmethodische Unterstützung gewährleistet werden, die vor allem eine Stärkung der Nutzersicht fokussiert. Im Rahmen von sechs realen Fallstudien werden verschiedene Methoden und Tools des Designs exploriert und evaluiert, um im Ergebnis einen Vorschlag für einen angepassten Designprozess samt einem dazu ausgelegten Methodenset zu unterbreiten.

5 Stand der Forschung und Ausgangssituation

5.1 Designprozesse

In Literatur und Praxis finden sich diverse Designprozesse. Basierend auf zahlreichen Übersichten identifizieren Krzywinski und Wölfel (2021) die Abfolge von vier Phasen als Gemeinsamkeit: Analyse, Definition, Entwurf und Ausarbeitung finden sich mit leichten Unterschieden sowohl in linearen als auch iterativen Ansätzen wieder. Diese vier entsprechen weitestgehend ebenso den Phasen des Double Diamond Models, welches international als eines der verbreitetsten Modelle eingeschätzt werden kann. Die Autoren stellen weitergehend fest, dass viele der Designprozessmodelle darüber hinaus durch explizite Phasen der Evaluierung ergänzt sind. Ebenso sind Rückkopplungen (zu vorangegangenen Phasen) sowie Iterationsschleifen (innerhalb von Phasen) vorgesehen.

5.2 Anforderungen aus heutigen Prozessen

Parallel zur Betrachtung der Designprozesse wurden im Rahmen eines Workshop-Formats die Fraunhofer-internen Sichtweisen in Bezug auf Designmethodik, heutige Problem- und Fragestellungen, heutige und künftige Anforderungen sowie auch Wünsche qualitativ gesammelt. An diesem Format beteiligt waren Vertreter der Bereiche Geschäftsmodellentwicklung und Innovationsmanagement, Startup-Inkubatoren und Transfer, Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation bzw. Öffentlichkeitsarbeit, Forschung und Entwicklung (Konstruktion, Elektrotechnik, Software) sowie Industriedesign. Die Ergebnisse der qualitativen Erhebung spiegeln die folgenden Kernaspekte wieder:

- Es fehlt vielerorts die Kenntnis, was Industriedesign mit seinen vielfältigen Methoden konkret für angewandte, technologieorientierte Forschungs- und Transferfragestellungen leisten kann. Man ist sich unsicher, ob, wann und wie der erste gemeinsame Schritt in einem FuE-Projekt erfolgen kann
- Eine Beteiligung von Designern in FuE-Projekten scheitert an formalen Hürden wie Ausschreibungsmodalitäten oder Nicht-Förderfähigkeit
- Es fehlt oft ein zentraler Ansprechpartner, ein strukturiertes und kalkulierbares Angebot

In der Folge wurden drei für die Darstellung der Studienergebnisse essentielle Kriterien definiert:

- Die Darstellung ist für einen niederschweligen Einstieg in das Themenfeld Design geeignet und verschafft den Forschern einen für ihren Kontext relevanten Überblick mit konkreten Fallbeispielen aus unterschiedlichen Forschungsbereichen.
- Das Studienergebnis gibt konkrete Handlungsempfehlungen für eine strukturierte und umfassende Integration von Design und seinen Methoden in Form eines Leitfadens für die Institute.
- Das Studienergebnis unterstützt die gemeinsame Erarbeitung einer passfähigen und zielgerichteten Ergänzung des FuE-Projekts durch deren Entwickler und die Designer.

6 Methodisches Vorgehen: Forschungsdesign

6.1 Allgemeine Projektplanung und Meilensteine

Im Wesentlichen lässt sich der Projektverlauf in drei Bereiche gliedern, die jedoch keine strikte Trennung in ihrer Abfolge zulassen, sondern sich untereinander bedingen:

1. Erarbeitung einer methodischen Grundlage bestehend aus Designprozess(en) und einem Pool von Methoden des Designs
2. Erprobung und gleichzeitige Konkretisierung sowie Verbesserung der Methodik mittels der Fallstudien aus der Forschungs- und Entwicklungspraxis
3. Evaluation und Finalisierung von Designprozess und Methodenset

Im Fokus stehen dabei insbesondere Methoden aus den Disziplinen Industriedesign, Interaktionsdesign, User Experience Design, Generative Design und Design Thinking (i.d.F. zusammenfassend Design genannt). Mit ihnen sollen Anforderungen aus Nutzer- und Anwendungssicht stärker als bisher und vor allem frühzeitig eingebunden werden. Als konkrete Ergebnisse werden anvisiert:

- Die Entwicklung eines geeigneten Prozessmodells,
- die Auswahl und Beschreibung geeigneter Design- und Entwicklungsmethoden,
- eine angepasste Definition der Technology-Readiness-Level sowie
- die Überführung aller Ergebnisse in einen Leitfaden.

6.2 Entwicklung eines Prozessmodells und Auswahl geeigneter Methoden

Die methodischen Grundlagen wurden im Rahmen zweier Experten-Workshops erarbeitet. Beteiligte Kompetenzen waren hier Geschäftsmodellentwicklung und Innovationsmanagement, Startup-Inkubatoren und Transfer, Unternehmenskommunikation sowie Öffentlichkeitsarbeit, Forschung und Entwicklung sowie Industriedesign aus den drei Fraunhofer-Instituten, aus der Fraunhofer-Zentrale sowie von der Professur für Technisches Design. In diesen wurden zum einen vergangene Fraunhofer-Projekte analysiert sowie Stakeholder-Befragungen durchgeführt. Die Teilnehmer diskutierten unterschiedliche Prozesstypen und Entwicklungsansätze (Stage-Gate, Agile, Design Thinking) und definierten im Ergebnis eine sechs-phasige Prozessstruktur nach dem Stage-Gate-Prinzip:

VERSTEHEN > DEFINIEREN > ENTWERFEN > ENTWICKELN > VALIDIEREN > FINALISIEREN. Dieses eignet sich aus Sicht der Workshop-Teilnehmer für die in der Regel physischen Entwicklungen der beteiligten Fraunhofer-Institute besser als beispielsweise ein agiler Prozess mit kurzen Entwicklungsintervallen. Mit Blick auf den Stand der Forschung stellte dies keine disruptive Veränderung dar.

Im zweiten Teil des Workshops trugen die Workshop-Teilnehmer auf Basis der jeweils eigenen Expertise und Praxiserfahrung zunächst einen Pool aus etwa 70 Design- und Entwicklungsmethoden zusammen. Diese wurden grundlegend kategorisiert und mit dem Vorgehen in bisherigen FuE-Projekten der beteiligten Fraunhofer-Institute verglichen. Auf dieser Basis erfolgte eine Vorauswahl von 40 für das Projekt als relevant angesehenen Design- und Entwicklungsmethoden. Diese wurden auch den definierten sechs Phasen der Prozessstruktur vorläufig zugeordnet.

Ebenso wurde eine Zusammenstellung von TRL-Definitionen, deren Verwendung bei den beteiligten Fraunhofer-Instituten zuvor recherchiert wurde, diskutiert. Im Folgenden formulierten die Projektmitglieder einen Vorschlag für eine zu Fraunhofer-FuE-Projekten passfähige TRL-Definition (vergleiche Tabelle 1). Dabei sind in der angewandten Forschung gängige Bezeichnungen aufgegriffen. Der Vorschlag klammert jedoch eine zeitliche Einordnung von Entwicklungszyklen aufgrund der Diversität der FuE-Projekte bewusst aus. Um die Bedeutung des Projektvorlaufs mit Ideenfindung und Antragsstellung abbilden zu können, wurde der Skala ein TRL 0 hinzugefügt.

Tabelle 1: Vorschlag einer TRL-Definition für die angewandte, technologieorientierte Forschung

Kommerzielles System	9	Das System wurde intensiv geprüft und erfolgreich in den kommerziellen Einsatz überführt.
	8	Das System ist vollständig entwickelt, in betriebliche Hard- und Softwaresysteme integriert und in Betriebsszenarien funktionsgeprüft. Ausbildungs- und Wartungs-Dokumentationen sind verfügbar.
Gesamtsystem	7	Der Prototyp wurde in ein (Demonstrations-) System im betrieblichen Umfeld überführt und verifiziert. Alle sicherheits- und systemrelevanten Eigenschaften sind integriert.

	6	Der Prototyp wurde in ein Gesamtsystem implementiert und seine Funktion in realistischer Umgebung (unter Einsatzbedingungen) nachgewiesen.
Prototyp	5	Der (skalierte) Prototyp wurde in einen maßstabsgetreuen Prototyp überführt und in relevanter Umgebung erprobt.
	4	Das technologische Konzept wurde in einen (skalierten) Prototypen überführt.
Konzept	3	Das technologische Konzept wurde experimentell validiert und der Anwendungsfall auf dessen Realisierbarkeit überprüft.
	2	Das technologische Konzept wurde definiert und ein Anwendungsfeld spezifiziert.
Vision	1	Das Funktionsprinzip wurde wissenschaftlich beobachtet und beschrieben.
	0	Die Forschungsidee und der dazugehörige Projektrahmen wurden definiert.

6.3 Zur Erprobung durchgeführte Fallstudien

Bei den sechs Fallstudien handelt es sich um reguläre FuE-Projekte aus der Praxis der beteiligten drei Fraunhofer-Institute. Aufgrund der unterschiedlichen Forschungsfelder der Institute (u.a. Werkstoff- und Strahltechnik, Sensorik, Prozesstechnik, Werkzeugmaschinenbau, Verkehrssysteme und Infrastruktur) ergibt sich auch für die Fallstudien eine recht breite thematische Streuung. Die Fallstudien befanden sich zudem in jeweils unterschiedlichen Projektstadien und Reifegraden. Zwei Fallstudien durchliefen im Rahmen der Studie den gesamten Prozess. Vier weitere wurden bis in die Phase 4 ENTWICKELN bearbeitet. Die Vorschläge für eine weitere, dann auch physische Umsetzung, wurden in Form aussagekräftiger Bildmaterialien, CAD-Modelle und Renderings dokumentiert. Eine Übersicht gibt die folgende Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht über die bearbeiteten sechs Fallstudien

	Bearbeitete Prozessphasen*	[Anz. bet. Personen] und bet. Kompetenzen	Zeitaufwand für Industriedesign **	Start-TRL und Ziel-TRL
Fallstudie A: Sensorkomponente zur Anwendung in einer Produktionsanlage	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[2] Design, FuE	① ② ③	⑤ ⑦
Fallstudie B: Interfacedesign / HMI-Terminal zur Prozessüberwachung	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[3] Design, FuE, Programmierung	① ② ③	③ ⑥
Fallstudie C: Messdemonstrator für eine innovative Kupplungstechnologie	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[3] Design, FuE	① ② ③	③ ④
Fallstudie D: Fertigungsanlage / Versuchsanlage zur Batteriezellenproduktion	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[3] Design, FuE	① ② ③	⑤ ⑥

Fallstudie E: Messgerät zur Qualitätssicherung	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[2] Design, FuE	① ② ③	③ ⑤
Fallstudie F: Fahrrad-Lastenanhänger mit intelligenter elektronischer Unterstützung	① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[4] Design, FuE, Nutzer- und Marktrecherche, (expl. Grafikdesign)	① ② ③	① ③

* ① Verstehen > ② Definieren > ③ Entwerfen > ④ Entwickeln > ⑤ Validieren > ⑥ Finalisieren, vergleiche auch Bild 4.

** grobe Vergleichsangabe zwischen den Fallstudien. Umfänge von rund 40 bis 160 Stunden.

6.4 Design- und Entwicklungsmethoden

Im Anschluss an die Erprobung erfolgte eine Anpassung des Prozessmodells auf Detailebene. So wurden die Projektphasen und Gates textlich beschrieben und final definiert. Das Ergebnis zeigt Bild 4. Die aufeinander aufbauenden Prozessphasen gewährleisten einen sachlogischen Ablauf, in dem zunächst eine Wissensgrundlage geschaffen wird sowie konzeptionelle und erprobende Arbeiten stattfinden, bevor eine aufwandsintensive technische Entwicklung und Umsetzung erfolgt.

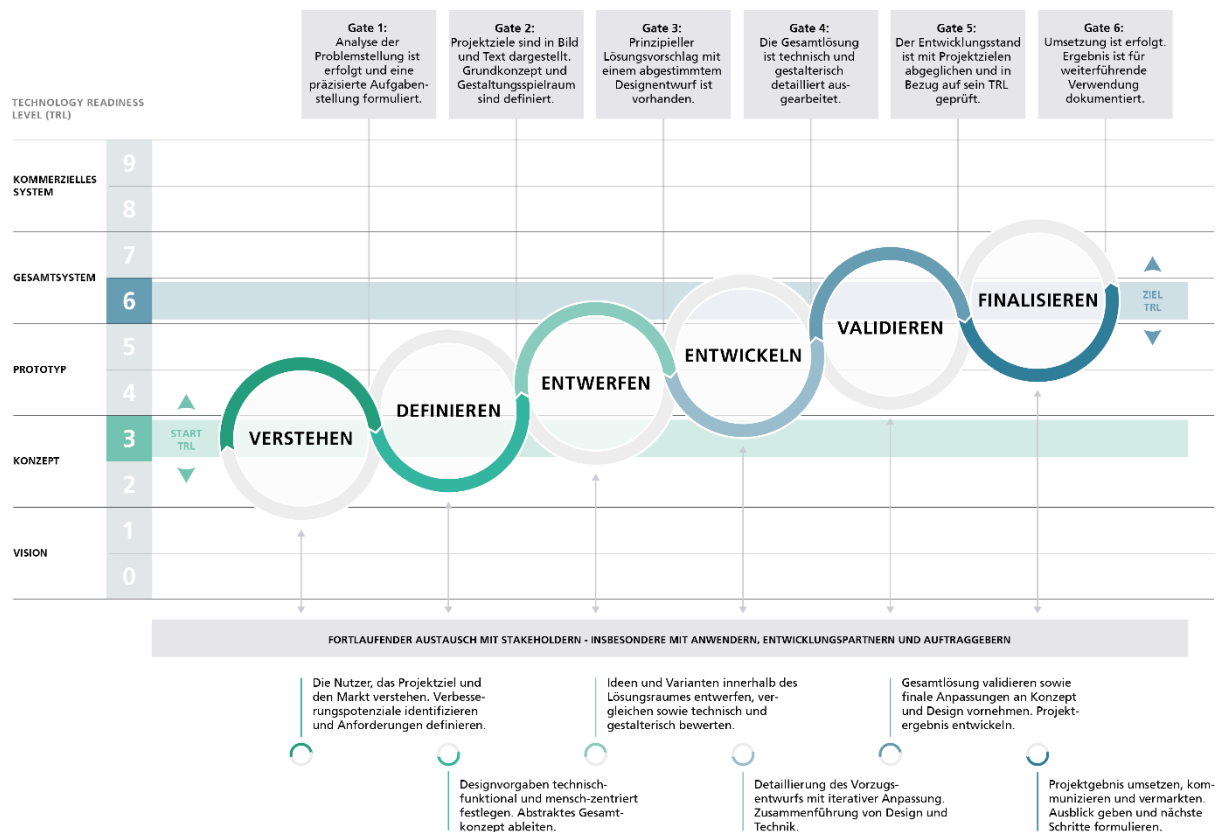


Bild 4: D4TRL-Prozessmodell

Im Detail werden in der ersten Phase VERSTEHEN Markt, Nutzer sowie technische Rahmenbedingungen untersucht und aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen Projektanforderungen abgeleitet. In der zweiten Projektphase DEFINIEREN werden Ideen und

Lösungsansätze generiert und in einem Gesamtkonzept zusammengefasst. Auf dessen Grundlage werden in der dritten Phase ENTWERFEN Designentwürfe erstellt. Die Phasen 4 ENTWICKELN und 5 VALIDIEREN dienen der Umsetzung, Erprobung und Optimierung. Die sechste Phase FINALISIEREN gewährleistet einen geregelten Projektabschluss, in dessen Zuge die Projektergebnisse dokumentiert und für weitere Schritte, wie z. B. die Kommunikation und Vermarktung, aufbereitet werden. Für das Fortschreiten in die jeweils nächste Prozessphase ist gemäß dem Stage-Gate-Prinzip jeweils ein Zwischenziel zu erfüllen, sodass eine für die nächste Phase ausreichende Basis vorliegt und sich große Iterationsschleifen vermeiden lassen. Des Weiteren erfolgte eine Auswertung, welche der vorher ausgewählten 40 Methoden in welcher Häufigkeit in den einzelnen Prozessphasen zum Einsatz kamen. Hieraus ergab sich eine konkretisierte Zusammenstellung aus 26 Methoden, die mit Text und Bild definiert und beschrieben sind und als Methodenkartenset zur Verfügung stehen.

7 Interpretation der Ziele

Die Erprobung anhand der Fallstudien ergab, dass das „D4TRL-Prozessmodell“ (Bild 4) geeignet ist, um Methoden des Designs und der nutzerzentrierten Produktentwicklung effektiv und über den ganzen Projektverlauf hinweg in die Forschungspraxis der beteiligten Fraunhofer-Institute zu integrieren. Sie zeigte auch, dass sich die unterschiedlichen FuE-Projekte der einzelnen Institute nicht in einem starren Prozessschema bearbeiten lassen. So dient das Prozessmodell mit seinen sechs aufeinander aufbauenden Phasen sowie jeweils den Phasen zugeordneten Methoden als ein Rahmen. Von der Zusammenstellung der methodischen Ergänzung bis zur Umsetzung kann innerhalb dieses Rahmens gemeinsam mit den FuE-Teams eine passfähige Design-Unterstützung entwickelt werden. Designer und FuE-Teams können mit Blick auf die individuellen Anforderungen des jeweiligen FuE-Projekts situationsbedingt entscheiden, in welchem Umfang einzelne Projektphasen bearbeitet werden und welche Methode(n) dafür jeweils die zielgerichtete Variante darstellt/en. Das Zusammenspiel aus „D4TRL-Prozessmodell“ und dem Methodenkartenset gewährleistet einen evaluierten Einsatz der Designmethoden an geeigneten Stellen. So konnten in den Fallstudien große Iterationsschleifen vermieden und mit Blick auf die Technologiereife gute Zwischenstände und Ergebnisse erzielt werden.

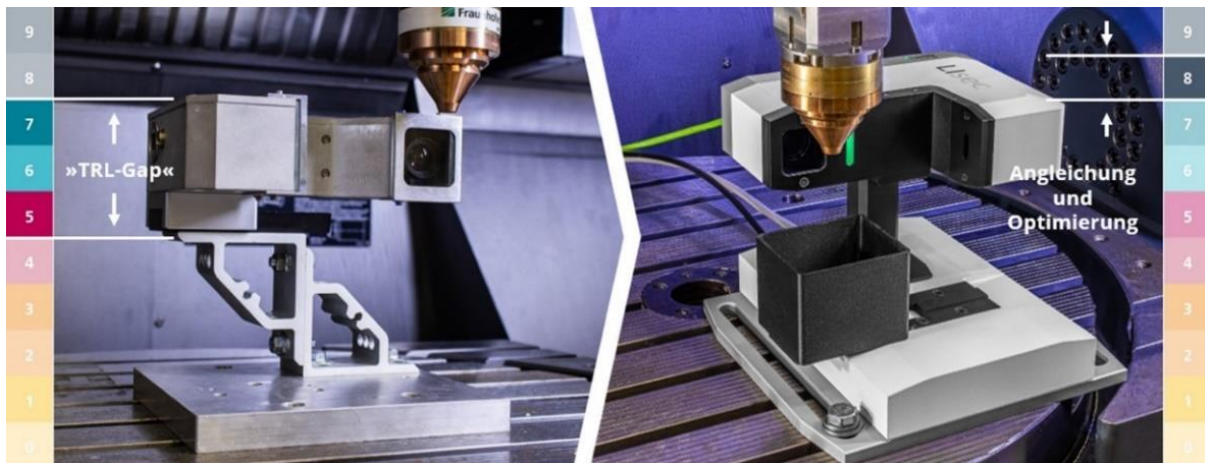


Bild 5: Fallstudie im Vergleich zwischen Ausgangssituation und D4TRL-Ergebnis

Im Beispiel aus Bild 5 konnte so die rein aus technischer Sicht erarbeitete Lösung (links) hinsichtlich einer schnelleren Montage, einer hochwertigen Gehäusegestaltung inklusive professionellem Branding, einer optimierten Prozesseinbindung und dem User-Feedback mittels Statusleuchte verbessert werden (rechts). Aus den Erkenntnissen sollen an dieser Stelle die folgenden Aspekte herausgegriffen werden, da sie im Besonderen zu einer effektiven Bearbeitung der Fallstudien sowie zur Angleichung von objektivem Technologiereifegrad und subjektiver Wahrnehmung beitragen.

7.1 Visualisierungen

Problemfelder, Lösungsansätze oder Konzepte lassen sich mit Bildern und schnellen Handskizzen mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand visualisieren und im Team besprechen. Auch für Präsentationen gegenüber Projektträgern oder Auftraggebern bieten überzeugende Visualisierungen der jeweiligen Projektstände einen starken Mehrwert. So können selbst CAD-Screenshots eine starke Überzeugungskraft entwickeln, wenn es darum geht, eine technische Lösung zu kommunizieren. Materialeinstellungen und Shader erreichen mittlerweile in fast allen CAD-Programmen präsentabile Darstellungsqualitäten, ohne dass explizit Renderings erstellt werden müssen. Für die Vermarktung einer Entwicklung entsteht spätestens in der dritten Projektphase (ENTWERFEN) in Form von digitalen Renderings geeignetes Bildmaterial. Am Ende des Prozesses kommen professionelle Fotografien hinzu. Darüber hinaus konnte eine motivierende Wirkung festgestellt werden, wenn Fortschritte sichtbar werden und eine Vorschau auf das finale Projektergebnis frühzeitig entsteht. Als sehr hilfreich während der Bearbeitung der Fallstudien erwies sich die Darstellung der Projektzwischenstände auf digitalen Whiteboards (z.B. miro, Conceptboard o.ä.) oder anderen niederschwellig zugänglichen Kollaborations-Tools. So können Ideen immer wieder vor Augen geführt und flexibel weiterentwickelt werden. Die gute Übersichtlichkeit und schnelle Möglichkeit der Kommentierung von Entwurfsständen (auch außerhalb von Meetings) erzielte positive Wirkung.

7.2 Schnelle Konzeptentwicklung und -validierung im CAD

Die Kubatur einer Entwicklung und ihrer wesentlichen Komponenten lässt sich im CAD mit verhältnismäßig geringem Aufwand aufbauen. So entsteht schnell ein zwar nicht detaillierter, aber grundsätzlich maßgenauer, dreidimensionaler Projektstand. Auf diesem Wege lassen sich viele konzeptionelle Aspekte (u.a. benötigte Bauräume und Aufstellflächen, Kollisionsgefahr bei beweglichen Teilen, geeignete Arbeitshöhen und Erreichbarkeit von Stellteilen) bereits konkret bewerten. So können mit verhältnismäßig geringem Aufwand viele Unwägbarkeiten eliminiert werden bevor aufwändige, detailliertere CAD-Modelle und Fertigungsdaten erstellt werden.

7.3 Prototyping und Testing

Prototyping in seinen unterschiedlichen Formen sowie die damit durchgeführten regelmäßigen Validierungen vermeiden i. d. R. aufwändige Fehlentwicklungen. So machen bereits simple Papiermodelle oder maßstabsgetreue Printouts einen Projektstand haptisch erlebbar und vermitteln – anders als CAD-Modelle – einen konkreten Eindruck der Dimensionen einer Entwicklung. Ausgereifte Prototypen ermöglichen es, Funktion und Usability zu überprüfen, bevor die finale Umsetzung erfolgt.

8 Fazit und Ausblick

Design kann starke Mehrwerte für die Forschung und Entwicklung in der angewandten, technologieorientierten Forschung bieten. Die Bearbeitung der Fallstudien hat im Besonderen gezeigt, dass das „D4TRL-Prozessmodell“ keine disruptive Veränderung bestehender Arbeitsprozesse darstellt, sondern sich zusammen mit dem Einsatz der Designmethoden effizient im Arbeitsalltag bei Fraunhofer etablieren lässt. Noch ist die Designkompetenz in vielen Projektteams unterrepräsentiert, sodass sich der Aufbau agiler Strukturen empfiehlt. Offen bleibt dabei die Frage, wie die Zusammenstellung von FuE-Teams in Zukunft aussehen soll, welche Kompetenzen neben der Ergänzung von Designern notwendig sein werden. Auf diesem Weg könnte es Ziel sein, ein Angebot zu schaffen, mit dem sich Designdisziplinen, aber auch Kompetenzen wie Nutzer- und Marktrecherche oder die Softwareentwicklung, flexibel und bedarfsgerecht in die Forschungsteams einbinden lassen.

Die vorliegende Studie zeigt an sechs praktischen Fallstudien, wie eine Ausgewogenheit zwischen technologischer und designtechnischer Reife mittels zielgerichteter und strukturierter designmethodischer Unterstützung sowie einer Stärkung der Nutzer- und Anwendungssicht möglich

ist. Dieses Forschungsdesign bildet den Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen. So werden aus den Fallstudien Messkriterien für eine quantitative Untersuchung zur „TRL-Gap“ ermittelt. Gleichzeitig findet der „D4TRL-Prozess“ im von Fraunhofer-Gesellschaft und TU Dresden gegründeten „DesignLab for Applied Research“ bereits Anwendung. Somit wird sukzessive die Breite an bearbeiteten Themen und FuE-Projekten wachsen und damit zu einer gesteigerten Aussagekraft zukünftiger Untersuchungen sowie der Optimierung des Prozesses an sich beitragen.

Literatur

- Anderson 2006 ANDERSON, Stephen P.: *Creating Pleasurable Interfaces: Getting from Tasks to Experiences*, 2006. Online verfügbar unter <https://www.slideshare.net/stephenpa/creating-pleasurable-interfaces-getting-from-tasks-to-experiences>.
- Bobbe et al. 2023 BOBBE, Tina; OPESKIN, Lenard; LÜNEBURG, Lisa-Marie; WANTA, Helge; POHLMANN, Joshua; KRZYWINSKI, Jens: *Design for Communication: How Do Demonstrators Demonstrate Technology?*. 23.02.2023, in: *Design Science*, Vol. 9, e3.
- Krzywinski et al. 2021 KRZYWINSKI, Jens; WÖLFEL, Christian: Industriedesign und nutzerzentrierte Produktentwicklung. In: Bender, B. & Gericke, K. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Auflage. Berlin: Springer Verlag, S. 684-704.
- Mankins 1995 MANKINS, John C.: *Technology Readiness Levels. NASA White Paper*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/247705707_Technology_Readiness_Level_-_A_White_Paper
- Markenverband 2010 MARKENVERBAND; SCHOLZ & FRIENDS; RAT FÜR FORMGEBUNG: *Die Schönheit des Mehrwertes. Deutschlands größte Studie zur Bedeutung von Design für den Unternehmenserfolg*. Online verfügbar unter <http://www.markenverband.de/publikationen/studien/Designstudie>
- Mesa et al. 2019 MESA, David; THONG, Christine; RANSCOMBE, Charles; KUYS, Blair: *Integrating the Product Development Process in Scientific Research. Bridging the Research-Market Gap*. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*. Delft: 2019, 1, S. 2805-2814.
- Moser 2012 MOSER, Christian: *User Experience Design*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- Moultrie 2015 MOULTRIE, James: *Understanding and Classifying the Role of Design Demonstrators in Scientific Exploration*. *Technovation*, 43/44, 2015, S. 1–16. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2015.05.002>
- Trauernicht 2015 TRAUERNICHT, Gert: *Produktdesign. Die Botschaft der Maschine richtig überbringen*. In: *ke-next*. Online verfügbar unter <https://www.ke-next.de/karriere-management/management/produktdesign-die-botschaft-richtig-ueberbringen-224.html>.
- Wölfel et al. 2013 WÖLFEL, Christian; KRZYWINSKI, Jens; DRECHSEL, Frank: *Knowing, Reasoning and Visualizing in Industrial Design*. In: *The Knowledge Engineering Review* 28(3) (2013), S. 287-302. doi:10.1017/S0269888913000258

Die Inspirationsmatrix – Anwendungsfälle mit UX-Mehrwert für eine Technologie identifizieren

The Inspiration Matrix – identifying use cases for a technology with added value regarding UX

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Doreen Engelhardt², Andreas Beskid¹, Denise Pottin¹, Batuhan Kara¹, Matthias Peissner³

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Stuttgart
Valeria.bopp-bertenbreiter@iat.uni-stuttgart.de, name@iao.fraunhofer.de

²Audi AG, 85057 Ingolstadt
name@audi.de

³Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 70569 Stuttgart
matthias.peissner@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Positive User Experience (PUX) im Fahrzeug ist ein wichtiger Differenzierungsfaktor. Dafür müssen Fahrzeughersteller frühzeitig die richtigen Technologien für die Implementierung auswählen. (Rittger und Schrader 2021). Hierfür wird die Methode *Inspirationsmatrix* vorgestellt. Ihr Ziel ist es, für eine Technologie Anwendungsfälle mit PUX-Potenzial im Fahrzeuginterieur zu identifizieren. Das PUX-Potenzial wird operationalisiert, indem die Anwender*innen mit der Methode erste PUX-Ideen entwickeln. Die erste Iteration wurde mit 6 Gruppen evaluiert. Auf Basis der Rückmeldungen wurde die zweite Iteration entwickelt und 4 Mal angewandt. Die Methode wurde mit der Methode 635 verglichen. Evaluiert wurde die Inspirationsmatrix hinsichtlich Anwendungs-UX, Systematik, Nutzerzentriertheit, Inspirationsfähigkeit, Nachvollziehbarkeit & Transparenz sowie durch offene Fragen. Die Methode erfüllt die Anforderungen im Schnitt gut. Stärken umfassen z.B. Förderung des Ideenflows, Ideation im Team sowie Inspirationsfähigkeit. Optimierungspotenziale sind mehr Bearbeitungszeit, größere Teams und ein anderes Whiteboard. Zukünftige Iterationen sollen die Ergebnisse zur Optimierung der Methode nutzen.

Keywords (deutsch):

Use Cases für Technologie identifizieren, Matching Nutzeraktivitäten und Technologiefunktionen, Technologiepotenzial hinsichtlich positiver UX, Inspirationsmatrix

Abstract (english): Positive User Experience (PUX) in the vehicle is an important differentiation factor. To achieve this, vehicle manufacturers must select the right technologies for implementation at an early stage. (Rittger and Schrader 2021). Therefore, the “Inspiration Matrix” method is presented. Its goal is to identify use cases for a technology with PUX potential in the vehicle interior. The PUX potential is operationalized by developing first ideas for PUX with the method. The first iteration was evaluated with 6 groups. Based on the feedback, the second iteration was developed and applied 4 times. The method was also compared to method 635. The Inspiration Matrix is evaluated in terms of applicational UX, systematicity, user-centeredness, inspirational ability, traceability & transparency, and through open-ended questions. On average, the method meets the requirements well. Strengths include, e.g., promotion of idea flow, ideation in the team as well as inspirational ability. Potentials for optimization are longer processing time, larger teams, and a different whiteboard. Future iterations should use the results to optimize the method.

Keywords (english):

Identifying use cases for a technology, matching use activities and technology functions, technology potential for positive UX, Inspiration Matrix

1 Einleitung

Die Relevanz positiver Nutzungserlebnisse (engl. Positive User Experiences, PUX) im Fahrzeug nimmt zu (Rittger und Schrader 2021), da das automatisierte Fahren zusätzliche Zeitfenster für Nutzungserlebnisse eröffnet (SAE International J3016 APR2021). Zudem geben Kund*innen ihr frei verfügbares Einkommen zunehmend für erlebnisorientierte Käufe aus (Gilovich und Gallo 2020). PUX werden daher für Fahrzeughersteller zu einem Differenzierungsfaktor mit zentraler Bedeutung (Frison und Riener 2021). Es existieren Methoden, um gezielt für positive Nutzungserlebnisse zu entwickeln. Diese stammen aus dem Bereich des Experience Design (z.B. Krüger et al. 2020; Diefenbach und Hassenzahl 2017), setzen bei den Nutzenden an und berücksichtigen dadurch das Potenzial von Technologien für PUX nicht systematisch. Andere Methoden nutzen beispielsweise menschliche Bedürfnisse als Startpunkt der Gestaltung (Desmet und Fokkinga 2020), berücksichtigen Technologien aber ebenfalls nicht. Weitere Methoden wie die Erlebnispotenzialanalyse benötigen bestehende Software oder Produkte, um darin Potenziale für PUX aufzuzeigen (Haspel et al. 2020).

Der Produktentstehungsprozess der Automobilbranche ist jedoch aktuell noch stark technologiezentriert (Reichelt et al. 2022), wohl auch durch das Innovationspotenzial technologiegetriebener Entwicklung (Schimpf und Lang-Koetz 2010). Häufig liegen Technologien vor, die noch keinen klaren Anwendungsfall mit einem Mehrwert hinsichtlich PUX aufweisen.

Um im technologiezentrierten Produktentwicklungsprozess rechtzeitig einen Fokus auf PUX zu legen, sollten Technologien frühzeitig hinsichtlich ihres Potenzials für positive Nutzungserlebnisse eingeschätzt werden (Bopp-Bertenbreiter et al. 2022).

Ein wichtiger Schritt hierbei ist es, für eine Technologie passende Anwendungsfälle zu identifizieren, in denen die Technologie den Nutzer*innen später positive Nutzungserlebnisse bieten kann. Eine solche Technologieanalyse hinsichtlich des PUX-Potenzials wird bisher in der Literatur nicht abgedeckt. Deshalb wird im Folgenden eine Methode beziehungsweise ein Werkzeug gesucht, um effizient eine erste Einschätzung darüber vorzunehmen, in welchen Anwendungsfällen die Technologie positive Nutzungserlebnisse ermöglichen oder verbessern kann.

Folgende Anforderungen werden an die Methode gestellt:

- Systematik: 1) Abfolge und Durchführung der einzelnen Methodenschritte klar beschrieben. 2) Systematischer, schrittweise Ablauf durch Methode ermöglicht. (Becerril et al. 2019)
- Nachvollziehbarkeit und Transparenz: 1) Vergleichbare Ergebnisse. 2) Entscheidungen werden begründet, so dass sie für dasselbe Bearbeitungsteam zu späterem Zeitpunkt oder anderes Team nachvollziehbar sind.*
- Erweiterbarkeit: 1) Neue Technologien können integriert werden. 2) Neue Nutzeraktivitäten können integriert werden. (Becerril et al. 2019)
- Praxistauglichkeit: 1) Angemessener Zeitaufwand. 2) Passung zur Strategie der Firma. (Becerril et al. 2019)
- Anwendungs-User Experience (UX): Gut und einfach anwendbar. (Becerril et al. 2019)
- Nutzerzentriertheit: 1) Soll Rückmeldung von Nutzer*innen an Entwickler*innen beinhalten.* 2) Keine reine Expertenmethode, soll zukünftigen Nutzer*innen miteinbeziehen.
- Inspirationsfähigkeit der Methode: Ermöglicht es, viele erste Ideen für positive Nutzungserlebnisse mit der Technologie abzuleiten.

*Anforderung stammt aus Workshopserie mit $N = 5$ Expert*innen aus Vorentwicklung eines Fahrzeugherstellers.

2 Stand der Forschung: Methoden für das Identifizieren relevanter Anwendungsfälle für eine Technologie

In diesem Kapitel geben wir einen kurzen Überblick über bestehende Ansätze für das Generieren bzw. Identifizieren passender Anwendungsfälle für Technologien und zeigen so die Forschungslücke auf. Zum Generieren von Anwendungsfällen steht den Entwickler*innen von Technologien prinzipiell viele Kreativitätsmethoden zur Verfügung, wie z.B. Brainstorming oder morphologische Kästen (siehe Ardilio 2013 für einen Überblick zu Kreativitätsmethoden). Diese Methoden sind teils eher unsystematisch und nicht technologiefokussiert. Dadurch sind die Ergebnisse von z.B. Brainstormings für verschiedene Technologien nicht vergleichbar. Daher gehen wir im Folgenden auf Methoden ein, die gezielt Anwendungsfälle für Technologien identifizieren sollen.

In der Literatur werden Frameworks oder Werkzeuge vorgestellt, die häufig für eine bestimmte Technologie oder Technologiegruppe Anwendungsfälle identifizieren wollen. Diese nutzen als Basis z.B. das vorhandene Geschäftsmodell einer Firma und versuchen, hierin Anwendungsfälle für die Technologie zu identifizieren (Klein et al. 2018). Andere Autoren versuchen, bekannte Probleme in einem bestimmten Geschäftsbereich anhand von Leitfragen mit einer bestimmten Technologie zu lösen (Pokorni et al. 2021). Unklar bleibt, wie Anwendungsfälle identifiziert werden können, wenn keine konkrete Problemstellung vorliegt, wie also ein generelles Technologiepotenzial eingeschätzt werden kann. Aus der Arbeit von Pokorni et al. (2021) nutzen wir für die vorliegende Arbeit den Gedanken eines standardisierten Werkzeugs als Unterstützung in interdisziplinären Workshops.

Andere Autoren nutzen eine Literatur- sowie Industrietrendanalyse, um für die Technologie „vollautomatisiertes Fahren“ mögliche Anwendungsfälle zu identifizieren. Hierbei untersuchten sie, welche Aktivitäten Nutzer in der implementierten Form der Technologie, also vollautomatisierten Fahrzeugen, gerne durchführen möchten (Lee et al. 2022, S. 228–230). Diese Vorgehensweise ist zeitintensiv, nicht über mehrere Technologien hinweg vergleichbar und bindet Nutzer*innen nur als Sekundärquelle ein. Für unsere eigene Methodenentwicklung verwenden wir ebenfalls von Nutzer*innen gewünschte Nutzeraktivitäten in automatisierten Fahrzeugen.

Die Methodik der TechnologiePotenzialanalyse ermöglicht ein systematisches Vorgehen beim Auffinden potenzieller Anwendungsfälle und technischer Weiterentwicklungspotenziale von Technologien (Ardilio 2013). Dabei wird eine Technologie auf Funktionsebene charakterisiert, dann werden in der Applikationsanalyse das eigene/ Wettbewerberportfolios analysiert, um relevante Anwendungsfälle zu identifizieren. Danach werden mögliche Anwendungsfälle auf Basis des NACE-Branchenkatalogs und Kreativitätstechniken bestimmt (Ardilio 2013). Die TechnologiePotenzialanalyse identifiziert Anwendungsfälle für eine Technologie, jedoch mit Schwerpunkt auf Marktattraktivität, Wettbewerbsintensität und Weiterentwicklungsintensität statt auf PUX. Für die Entwicklung unserer eigenen Methode übernehmen wir die abstrakte und vergleichsfähige Beschreibung einer Technologie anhand der Technologiefunktionen und die Nutzung einer standardisierten Liste, um mögliche Anwendungsfälle zu identifizieren.

Eine weitere Methode nutzt Problem-Lösungs-Matrizen, um abstrahierte Probleme und Lösungsansätze (in diesem Fall für KI-Technologien) zu kombinieren (Hofmann et al. 2020). Dadurch sollen sinnvolle Anwendungsfälle für bestehende Lösungen, also KI-Technologien, identifiziert werden. Der Ansatz geht von bestehenden Lösungen aus und berücksichtigt auch diese. Für unsere Methode übernehmen wir die Form der Problem-Lösungs-Matrix, um systematisch mögliche Kombinationen von Technologiefunktionen (=Lösungen) und Nutzeraktivitäten (=Problemen) hinsichtlich ihres PUX-Potenzials zu analysieren.

Ein interdisziplinärer Ansatz ermöglicht das Einschätzen des PUX-Potenzials von Technologien und beinhaltet eine systematische Ideation für PUX-Ideen, also Ideen für PUX bei Technologieanwendung

während einer Nutzeraktivität (Bopp-Bertenbreiter et al. 2022). Auf Basis dieses Ansatzes wird in diesem Beitrag die Methode *Inspirationsmatrix* vorgestellt. Ziel der Inspirationsmatrix ist es, für eine vorliegende Technologie passende Anwendungsfälle im Fahrzeuginterieur zu identifizieren, in denen die Technologie ein Potenzial hinsichtlich PUX aufweist.

3 Lösungsansatz und Ableitung der „Inspirationsmatrix“

Fahrzeughersteller müssen Technologien mit Anwendungsfällen zusammenbringen, in denen die Anwendung der jeweiligen Technologie den Nutzenden ein positives Nutzungserlebnis ermöglicht, um langfristig erfolgreich zu sein (Rittger und Schrader 2021). Bisherige Lösungsansätze setzen z.B. bei konkreten technischen Lösungen an und verknüpfen sie mit Nutzungsanforderungen aus einem Anwendungsfall (Riddoch 23.03.2021). Dadurch werden die Potenziale von Technologien für positive Nutzungserlebnisse nicht berücksichtigt, sondern nur bekannte technische Lösungen miteinbezogen, die schon konkret umgesetzt vorliegen. Innovative Kombinationen von Technologien und Anwendungsfällen bleiben dadurch außen vor, zudem können Technologien nicht gezielt für die Anwendungsfälle oder Nutzeraktivitäten vorangetrieben werden, in denen ein hohes Potenzial der Technologie für positive Nutzungserlebnisse erkennbar ist.

Unter dem Potenzial von Technologien für positive Nutzungserlebnisse (PUX-Potenzial) verstehen wir die Möglichkeiten einer Technologie, den Nutzer*innen durch ihre Anwendung bei einer konkreten Nutzeraktivität positive Nutzungserlebnisse zu ermöglichen. Operationalisiert wird dieses PUX-Potenzial als Ableitung von Ideen für positive Nutzungserlebnisse mit Funktionen einer Technologie. Basierend auf dem Stand der Forschung entwickeln wir die Methode der „Inspirationsmatrix“: Die Inspirationsmatrix nutzt als Ausgangsbasis das Vorgehen nach Ardilio (2013): Dieser beschreibt eine Technologie anhand ihrer Funktionen und nutzt eine Branchenliste zur Identifikation potenzieller Anwendungsfälle einer Technologie. Da die Methode Technologieanwendungen für das Fahrzeuginterieur identifizieren soll, nutzt die Inspirationsmatrix als kontextspezifische Basis bzw. Checkliste zum Identifizieren von Anwendungsfällen Nutzeraktivitäten, die Nutzer*innen in zukünftigen Fahrzeugen durchführen möchten (Dungs et al. April 2016). Hierdurch erfolgt die Analyse auf erste PUX-Potenziale der Technologie auf vergleichbare Art und Weise und für ein Standardset an Nutzeraktivitäten, kann aber die Potenziale der einzelnen Technologie individuell erfassen. Wie bei Pokorni et al. (2021) umfasst unsere Methode interdisziplinäre Workshops, um verschiedene Perspektiven einzubringen. Zudem stellt auch unsere Methode ihren Anwender*innen ein standardisiertes Werkzeug bereit, um das Identifizieren passender Anwendungsfälle und die Analyse der Technologie hinsichtlich ihres PUX-Potenzials zu unterstützen.

Als Grundlage des Matchings von Technologiefunktionen und Nutzeraktivitäten nutzt die Inspirationsmatrix wie Hofmann et al. (2020) eine angepasste Problem-Lösungs-Matrix. Die Funktionen der Technologie werden als Spalten, die Nutzeraktivitäten als Reihen der Matrix aufgetragen. Anhand einer Leitfrage diskutieren Anwender*innen im Team, ob die jeweilige Technologiefunktion bei der Nutzeraktivität einen Beitrag zu einem PUX leisten kann und dokumentieren ihre Entscheidung.

4 Methode „Inspirationsmatrix“

Die Inspirationsmatrix wurde als Werkzeug zur Identifikation erster PUX-Potenziale von Technologien entwickelt. Ziel der Methode ist es, aus Kombinationen von Technologiefunktion und Nutzeraktivität erste Ideen für die Anwendung der Technologie bei der Nutzeraktivität mit dem Fokus „positive Nutzungserlebnisse“ zu generieren und dadurch das PUX-Potenzial der Technologie systematisch zu identifizieren. Die Methode soll in Workshops im Rahmen der Vorentwicklung von Premiumfahrzeugen bei Fahrzeugherstellern zum Einsatz kommen.

4.1 Anwender*innen

Ein interdisziplinäres Team mit Experten für UX, Technologie, Innovationsmanagement, Produktion, Ergonomie, Nutzerperspektive plus ggf. Enablern für die Technologie sollte gemeinsam die Inspirationsmatrix durchführen, um möglichst vielfältige Perspektiven einzubringen. Zusätzlich sollten Nutzer*innen teilnehmen, um die Nutzerperspektive unmittelbar einzubringen und eine frische, kontextdifferenzierte Sichtweise auf die jeweilige Technologieanwendung im Team zu repräsentieren. Die Teilnahme der Nutzerrepräsentant*innen erleichtert es dem Workshopteam, PUX-Ideen zu generieren und so die PUX-Potenziale einer Technologie zu identifizieren: Das Team ist dann weniger durch aktuell bekannte Limitationen der Technologien eingeschränkt. Für eine pragmatische Umsetzung der Nutzerperspektive und um die Geheimhaltung zu gewährleisten, können Praktikant*innen oder Doktorand*innen des jeweiligen Herstellers als Repräsentant*innen der Nutzerperspektive eingesetzt werden.

4.2 Werkzeug & Vorgehen „Inspirationsmatrix“

Neben einer Einordnung der Methode umfasst das Material eine Anleitung zur Methode, Informationen zur jeweiligen Technologie in einer standardisierten Form sowie eine Vorlage der Inspirationsmatrix.

Die Einordnung der Methode umfasst eine Begriffsdefinition für PUX bzw. Nutzungserlebnis, die Beschreibung der Problemstellung sowie die Einordnung in die Vorgehensweise nach Bopp-Bertenbreiter et al. (2022). Die Anleitung (siehe Abbildung 1) bietet den Anwender*innen eine Erklärung zum Vorgehen, zu den Nutzeraktivitäten und Technologiefunktionen und die Leitfrage für den Abgleich aller Kombinationen von Nutzeraktivitäten (=Reihen der Matrix) und Technologiefunktionen (=Spalten der Matrix). Die Leitfrage für den Abgleich lautet „Wie könnte genau diese Technologiefunktion bei genau dieser Nutzeraktivität im Fahrzeug ein positives Nutzungserlebnis unterstützen oder ermöglichen?“.

Eingangsgröße der Methode ist eine standardisierte Beschreibung der Technologien anhand eines Technologiesteckbriefs (Bopp-Bertenbreiter et al. 2022). Diese beinhaltet neben Name und Gruppe der Technologie zudem die von der Technologie angesprochenen Sinneskanäle des Menschen (basierend auf Augstein und Neumayr 2019). Zudem umfasst der Technologiesteckbrief die Möglichkeiten einer Technologie anhand ihrer Funktionen, abstrahiert beschrieben als Substantiv-Verb-Kombinationen (basierend auf VDI Richtlinie VDI 2803 Blatt 1). Hierdurch können Funktionen auch außerhalb bestimmter Technologiegruppen miteinander verglichen werden (Ardilio 2013) und sind außerdem für Laien verständlicher. Zusätzlich stellten wir die jeweils analysierte Technologie ab der zweiten Iteration mit einem kurzen Video vor.

Die Nutzeraktivitäten, mit denen die Funktionen der jeweiligen Technologie abgeglichen werden, um das PUX-Potenzial der Technologie zu identifizieren, nutzen als empirische Grundlage die Arbeit von Dungs et al. (April 2016). Nutzeraktivitäten, die Menschen in automatisierten Fahrzeugen gerne durchführen möchten, sind in der Inspirationsmatrix thematisch in 5 Cluster untergliedert. Die 5 Cluster sind in der Inspirationsmatrix entsprechend durch Anordnung, Farbcodierung und Beschriftung strukturiert (siehe Abbildung 1): „Schlafen und Entspannen“ (blau) beinhaltet Nutzeraktivitäten wie „Tiefschlaf“ und „Entspannungsübungen“. Der Cluster „Schönheit, Wellness und Fitness“ (grün) umfasst Aktivitäten wie „Ganzkörperpflege“ und „Sport“. Der Cluster „Essen und Trinken“ (gelb) enthält Aktivitäten wie „Verzehr von kleinen Snacks“ und „Kaffee/Tee trinken“. Cluster „Unterhaltung“ (orange) enthält z.B. „Spielen“, „Serie schauen“ und „Malen“. Der Cluster „Arbeiten und produktiv sein“ (rot) enthält Nutzeraktivitäten wie „Telefonieren“, „Schreiben von Dokumenten“ und „Online einkaufen“.

Jede Nutzeraktivität entspricht einer Reihe der Inspirationsmatrix. Die Technologiefunktionen aus dem Technologiesteckbrief der zu analysierenden Technologie werden jeweils in die Spalten der Inspirationsmatrix eingetragen und sind daher variabel.

Anhand der Leitfrage diskutieren die Anwender*innen für jede mögliche Kombination von Technologiefunktion und Nutzeraktivität kurz, ob die Anwendung der Technologiefunktion bei dieser Nutzeraktivität aus ihrer Sicht ein Potenzial für ein positives Nutzungserlebnis aufweist. Falls ja, so wird die resultierende erste PUX-Idee (= PUX-Potenziale der Technologiefunktion für die jeweilige Nutzeraktivität) auf einem grünen Post-It festgehalten. Können die Anwender*innen für die Kombination kein PUX-Potenzial identifizieren, so notieren sie dies mit einer Begründung auf einem roten Post-It. Die Begründungen sollen es ermöglichen, die Entscheidung über das PUX-Potenzial einer Kombination auch in späteren Entwicklungsphasen noch nachvollziehen zu können. Die Kombinationen werden für die erste Spalte von oben nach unten, dann für die zweite Spalte auf ihr PUX-Potenzial hin analysiert.

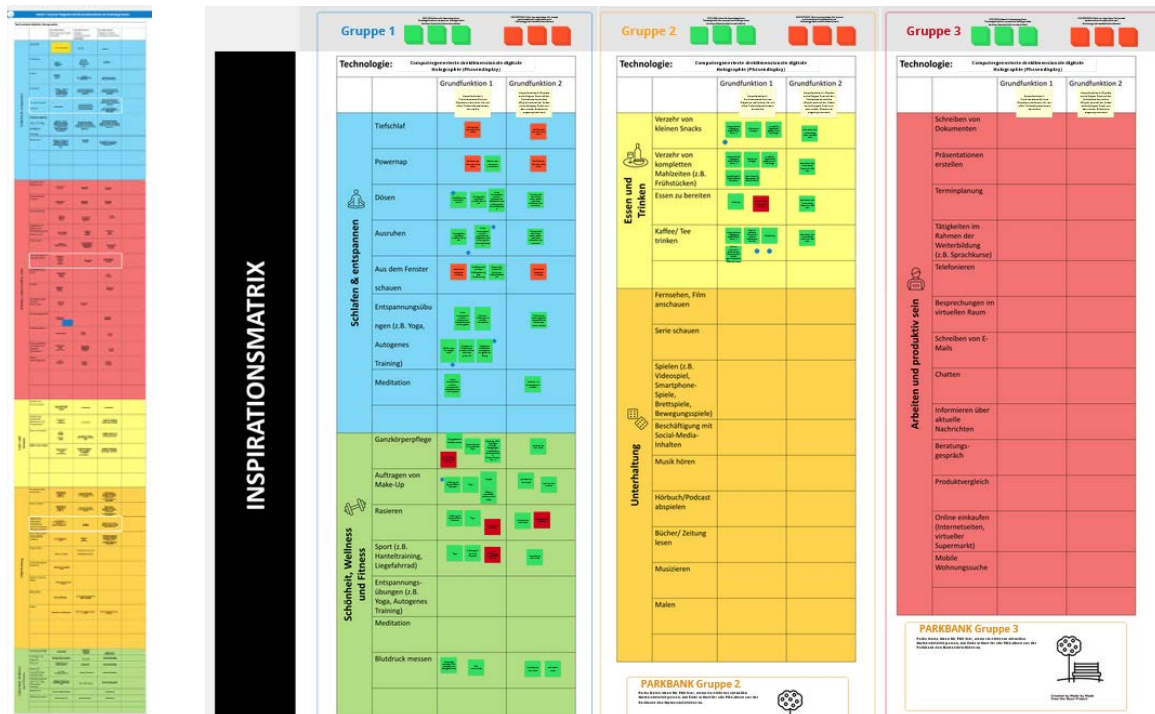


Abbildung 1: Links: Erste Iteration der Inspirationsmatrix. Rechts: Zweite Iteration der Inspirationsmatrix, Online-Version (World Usability Day 2022 – Stuttgart). Grüne Post-Its enthalten erste PUX-Ideen, stellen also PUX-Potenziale der Technologiefunktion für die jeweilige Nutzeraktivität dar. Rote Post-Its enthalten die Ablehnung einer Kombination mit Begründung. Zudem kam die „Parkbank“ für PUX-Ideen hinzu.

Durch die Nutzeraktivitäten als Inspirationsgrundlage, die immer gleichbleiben, sind die Ergebnisse der Inspirationsmatrix über verschiedene Technologien vergleichbar. Gleichzeitig ermöglicht es die Inspirationsmatrix, die Potenziale der einzelnen Technologiefunktionen für die Nutzeraktivitäten technologiespezifisch zu identifizieren und so auf die Möglichkeiten der einzelnen Technologiefunktionen individuell einzugehen. Die Visualisierung der PUX-Potenziale erlaubt es Betrachter*innen zudem, sehr schnell einen Überblick darüber zu bekommen, welche Funktionen einer Technologie zu vielen PUX-Ideen angeregt hat, mit dem Fokus PUX also besonders wertvoll und entwicklungsrelevant sind. Mit einem Dot-Voting können die Anwender*innen effizient die PUX-Ideen kennzeichnen, die ihrer Meinung nach das höchste PUX-Potenzial haben, mit je 3 Stimmen.

4.3 Forschungsfragen & Operationalisierung

Für die iterative Anwendung und Evaluation der Inspirationsmatrix ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. Können mit der Inspirationsmatrix erste PUX-Ideen für die Technologieanwendung bei einer Nutzeraktivität entwickelt werden?
2. Können mit der Inspirationsmatrix im Vergleich zu einer etablierten Ideation-Methode mehr PUX-Ideen entwickelt werden?
3. Wie bewerten die Anwender*innen das Verfahren?

Für die Forschungsfragen 1 und 2 wird die Anzahl erster PUX-Ideen pro Technologiefunktion als Maß operationalisiert. Für Forschungsfrage 3 wird die Anwendungs-UX für alle Anwendungen der zweiten Iteration mit dem standardisierten Fragebogen UEQ gemessen (Laugwitz et al. 2008), hierbei entspricht ein Mittelwert von -3 „sehr schlecht“ und 3 „sehr gut“ für die jeweilige Dimension. Zur Evaluation der zweiten Iteration der Methode leiteten wir die oben genannten Anforderungen ab und operationalisierten diese als 7-Punkt-Likert-Skalen von je „Lehne vollständig ab“ (-3) bis „Stimme vollständig zu“ (3). Zudem stellen wir offene Fragen zu Stärken, Schwächen und Änderungswünschen bezüglich der Methode. Aufgrund interner Unternehmensrichtlinien zum Datenschutz konnten zu den Stichproben keine demographischen Daten erhoben werden.

5 Iterative Anwendung & Evaluation der „Inspirationsmatrix“

5.1 Erste Iteration

$N = 29$ Studierende aus dem Master Technologiemanagement wandten die Inspirationsmatrix online in Kleingruppen von 4-5 Personen an.

Alle Gruppen nutzen die Methode für die Technologie Holografie, nur Gruppe 4 analysierte die Technologie OLED mit der Methode. Gruppe 1 entwickelte 77 unterscheidbare und grundsätzlich verständliche PUX-Ideen, Gruppe 2: 61 PUX-Ideen, Gruppe 3: 20 PUX-Ideen, Gruppe 4: 15 PUX-Ideen, Gruppe 5: 22 PUX-Ideen und Gruppe 6: 29 PUX-Ideen. 18 Teilnehmende evaluierten die erste Iteration der Methode, laut ihnen sind die Stärken der Inspirationsmatrix: Zusammenarbeit im Team (Kreativitätsförderung), strukturiertes und schrittweises Vorgehen, Struktur der Vorlage und geringe Kosten. Verbesserungswünsche umfassen: Anwesenheit vor Ort, detailliertere Anleitung und ausgefüllte Mustervorlage, kleinere Gruppen, mehr Bearbeitungszeit, ggf. Erklärung per Video.

5.2 Zweite Iteration

Anhand der Rückmeldungen der Anwender*innen in der ersten Iteration veränderten wir vor allem die Anleitung der Inspirationsmatrix: Wir spezifizierten die Leitfrage (1. Iteration: „Bei welcher Tätigkeit kann diese Grundfunktion der Technologie sinnvoll eingesetzt werden?“ zu 2. Iteration: „Wie könnte diese Technologiefunktion bei dieser Nutzeraktivität im Fahrzeug ein positive Nutzungserlebnis unterstützen?“), detaillierten die Anleitung und unterlegten die Vorlage der Inspirationsmatrix mit einem konkreten Anwendungsbeispiel. Zudem stellten wir den Anwender*innen in der zweiten Iteration die Anleitung direkt auf dem Whiteboard (Online-Anwendung) bzw. ausgedruckt zur Verfügung, um den Anwender*innen die gedankliche Verbindung zwischen Anleitung und Vorlage zu vereinfachen. Außerdem gestalteten wir die Inspirationsmatrix so um, dass sie visuell leichter zu erfassen war (Hoch- zu Querformat).

5.2.1 Pilotierung sowie Anwendung bei UX-Event in Industrie

$N = 2$ Teilnehmende pilotierten die 2. Iteration der Inspirationsmatrix für die Technologie Holografie. Hierbei bearbeiteten die Teilnehmenden in 20 Minuten den Cluster „Arbeiten und produktiv sein“ und generierten so 13 PUX-Ideen. Die Teilnehmenden bewerteten die Inspirationsmatrix auf den UEQ-Skalen wie folgt: $MW_{Attraktivität} = 1,58 (0,01)$; $MW_{Durchschaubarkeit} = 1,25 (0,50)$, $MW_{Effizienz} = 0,063 (0,78)$, $MW_{Steuerbarkeit} = 0,13 (0,28)$, $MW_{Stimulation} = 2,00 (0,50)$, $MW_{Originalität} = 1,88 (0,03)$. Nach der

Pilotierung führten wir das Konzept „Parkbank“ ein: Hier können PUX-Ideen zwischengespeichert werden, die aufkommen und nicht zur aktuellen Nutzeraktivität passen.

Bei einem UX-Event bei einem Fahrzeughersteller wandten $N = 6$ Teilnehmende die Inspirationsmatrix für die Technologie Holografie an. Als Vergleich wandten wir in einem anderen Workshop beim selben Event mit $N = 4$ Teilnehmenden die Kreativitätsmethode Brainwriting 635 (Schawel 2014) an. Da die Workshops im Rahmen eines UX-Eventtages stattfanden, war die Zeit für jede Methodenanwendung auf 50 Minuten begrenzt. Für die Inspirationsmatrix wurde nur der Cluster „Arbeiten und produktiv sein“ bearbeitet, damit wurden 24 PUX-Ideen generiert. 4 Teilnehmende füllten die UEQ-Skalen für die Inspirationsmatrix vollständig aus: $MW_{Attraktivität} = -0,04$ (0,64); $MW_{Durchschaubarkeit} = 0,50$ (2,63), $MW_{Effizienz} = 0,25$ (2,96), $MW_{Steuerbarkeit} = 0,50$ (0,42), $MW_{Stimulation} = 0,06$ (0,56), $MW_{Originalität} = -0,69$ (0,01).

Die Vergleichsmethode Brainwriting635 wurde entsprechend instruiert, Ideen für Nutzeraktivitäten im Fahrzeug zum Thema „Arbeiten und produktiv sein“ zu generieren, damit wurden 42 PUX-Ideen generiert. Die Teilnehmenden bewerteten das Brainwriting635 auf den UEQ-Skalen wie folgt: $MW_{Attraktivität} = 1,33$ (0,80); $MW_{Durchschaubarkeit} = 1,81$ (0,06), $MW_{Effizienz} = 1,25$ (0,54), $MW_{Steuerbarkeit} = 0,69$ (0,27), $MW_{Stimulation} = 1,81$ (0,89), $MW_{Originalität} = 0,25$ (1,13). Zustimmungsskalen zu den Anforderungen sind in Abbildung 2 abgebildet.

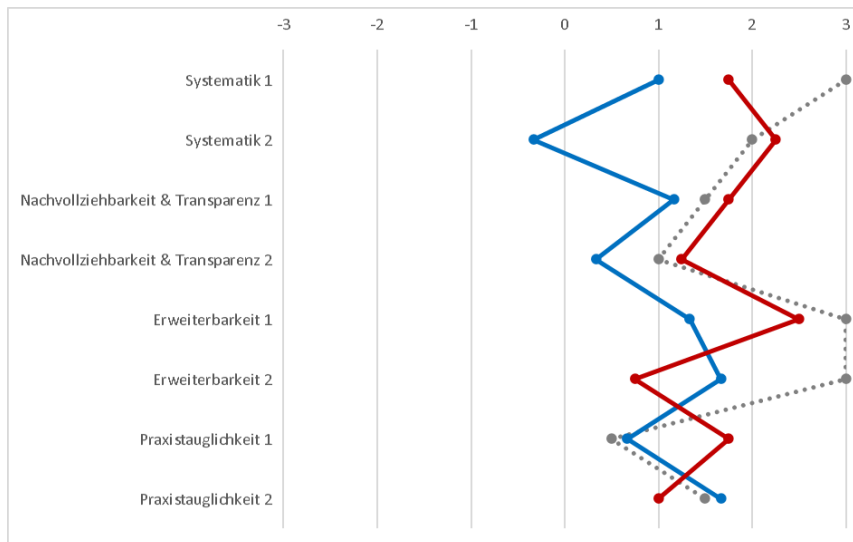


Abbildung 2: Anforderungserfüllung gemessen mit Zustimmungsskalen. Abgebildet sind Mittelwerte für die 2. Iteration der Inspirationsmatrix sowie eine Vergleichsmethode. Pilot-Workshop für Cluster „Arbeiten und produktiv sein“ für Holografie (grau gepunktet), Workshop bei UX-Event bei Fahrzeughersteller für Holografie: Inspirationsmatrix (dunkelblau) sowie für die Methode 635 (dunkelrot).

5.2.2 Anwendung bei WUD 2022 und in Industrie

Wir wandten die Methode auf dem World Usability Day Stuttgart 2022 mit $N = 3$ UX-Expert*innen ($M_{Alter} = 29,67$ Jahre) an. Die Teilnehmerinnen stammten aus UX-Design / Design und hatten im Schnitt eine „eher hohe“ Erfahrung mit UX-Methoden. Der Online-Workshop dauerte 90 Minuten, davon waren 40-45 Minuten Anwendungszeit.

Im Workshop überprüften die Teilnehmerinnen 3 von 5 Aktivitätencluster der Inspirationsmatrix systematisch für 2 Technologiefunktionen der Holografie auf deren PUX-Potenzial, damit wurden 34 eindeutige PUX-Ideen generiert. Die Antworten auf den UEQ-Skalen: $MW_{Attraktivität} = 2,51$ (0,06); $MW_{Durchschaubarkeit} = 2,25$ (0,44), $MW_{Effizienz} = 2,25$ (0,75), $MW_{Steuerbarkeit} = 1,5$ (0,06), $MW_{Stimulation} = 2,25$ (0,06), $MW_{Originalität} = 1,25$ (0,56).

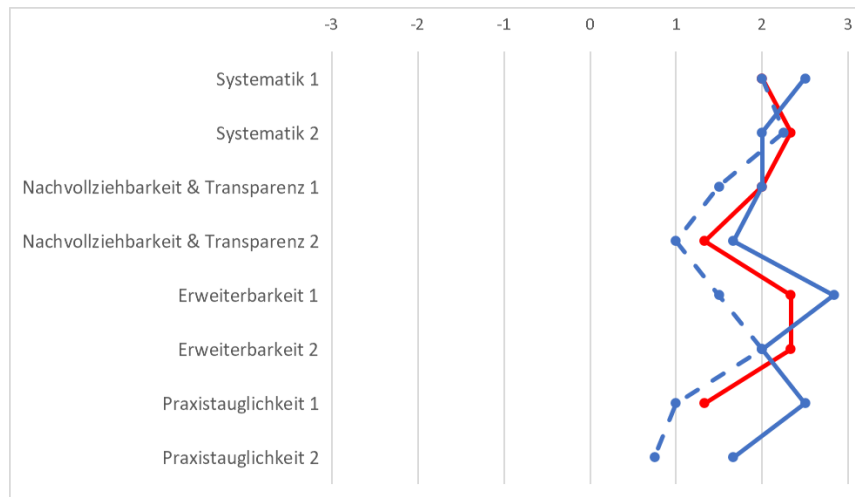


Abbildung 3: Anforderungserfüllung gemessen mit Zustimmungsskalen. Abgebildet sind Mittelwerte für Anwendung der 2. Iteration der Inspirationsmatrix. Links: WUD 2022 für Holografie (rot), in Workshop bei Fahrzeughersteller für Holografie (blau) sowie für eine zweite Anzeigetechnologie (blau gestrichelt).

Bei einem Fahrzeughersteller wandten wir die Inspirationsmatrix für die Holografie sowie eine zweite Anzeigetechnologie an, die Teilnehmenden waren Mitarbeitende des Fahrzeugherstellers.

Für die Holografie nahmen $N = 5$ Personen teil. Der Online-Workshop dauerte 150 Minuten, davon waren 60 Minuten Anwendungszeit. Damit wurden 48 PUX-Ideen generiert. 3 der Teilnehmenden füllten die UEQ-Skalen aus: $MW_{Attraktivität} = 1,39$ (0,18); $MW_{Durchschaubarkeit} = 0,75$ (0,19), $MW_{Effizienz} = 2,17$ (0,08), $MW_{Steuerbarkeit} = 0,97$ (0,50), $MW_{Stimulation} = 2,5$ (0,25), $MW_{Originalität} = 1,22$ (1,15).

Die Anwendung der Inspirationsmatrix für eine zweite Anzeigetechnologie mit $N = 6$ Teilnehmenden ergab 38 PUX-Ideen. Die Antworten von 4 Teilnehmenden auf den UEQ-Skalen: $MW_{Attraktivität} = 1,58$ (0,47); $MW_{Durchschaubarkeit} = 0,69$ (1,31), $MW_{Effizienz} = 0,25$ (1,29), $MW_{Steuerbarkeit} = 0,38$ (1,02), $MW_{Stimulation} = 1,19$ (0,14), $MW_{Originalität} = 1,56$ (0,06). Abbildung 3 zeigt die Anforderungserfüllung auf den Zustimmungsskalen.

6 Diskussion

In jeder Anwendung der „Inspirationsmatrix“ konnten mindestens 15 PUX-Ideen entwickelt werden, so dass wir die Forschungsfrage 1 positiv beantworten können. Im Vergleich mit der etablierten Kreativitätsmethode 635 (42 PUX-Ideen) konnten die Teilnehmenden mit der Inspirationsmatrix nur 24 Ideen entwickeln. Möglicherweise wurde dieses Ergebnis durch eine Teilnehmerin verzerrt, die der Methode ohne Begründung sehr ablehnend entgegenstand und auch die Evaluation nicht ausfüllen wollte. Die Forschungsfrage 2 muss somit in erster Instanz negativ beantwortet werden. Zur Forschungsfrage 3 evaluierten wir die Anwendungs-UX der Teilnehmenden anhand subjektiver Auskünfte im standardisierten UEQ-Fragebogen. Die Anwender*innen bewerten die Inspirationsmatrix hierbei im Durchschnitt insgesamt sehr positiv für die Dimensionen Stimulation, Attraktivität und Originalität und positiv für Effizienz und Durchschaubarkeit. Die Steuerbarkeit bewerten die Anwender*innen als neutral mit Tendenz zum positiven Bereich. Auffällig ist bei der Anwendungs-UX die sehr positive Bewertung durch Anwender*innen mit eher hoher Expertise im Bereich UX-Methoden (WUD 2022). Gegebenenfalls sollten wir bei zukünftigen Anwendungen der Methode eine Mischung aus reinen UX-Expert*innen und naiven Proband*innen verwenden. Auffällig ist auch die sehr mittelmäßige Bewertung der Inspirationsmatrix durch Teilnehmende am UX-Event des Fahrzeugherstellers. Hierbei könnte der hohe Zeitdruck eine Rolle gespielt haben, die erwähnte negativ eingestellte Teilnehmende oder die Tatsache, dass diese Teilnehmenden nur einen Teil der Inspirationsmatrix bearbeiten konnten.

Bezüglich der Zustimmungsskalen zur Anforderungserfüllung stimmen die Anwender*innen der Erfüllung der Anforderungen im Schnitt eher bis vollständig zu. Beim UX-Event wurde die Inspirationsmatrix auf den Zustimmungsskalen (Anforderungserfüllung) tendenziell wieder schlechter bewertet, vor allem für die Anforderungen Systematik 2, Nachvollziehbarkeit & Transparenz 2 und Praxistauglichkeit 1. Die Zustimmung für die Anforderung Systematik 2 ist dabei im neutralen bis eher ablehnenden Bereich, alle anderen im neutralen bis eher positiven. Somit können die Anforderungen aus subjektiver Sicht der Anwender*innen als erfüllt angesehen werden. Die Anforderung der Nutzerzentriertheit ist insofern erfüllt, als die PUX-Ideen in Zusammenarbeit mit Nutzer*innen generiert werden können und somit die Einschätzung des PUX-Potenzials in partizipativer Zusammenarbeit von Entwickler*innen und Nutzer*innen erfolgen kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag stellen wir die Methode „*Inspirationsmatrix*“ vor. Ziel der Inspirationsmatrix ist es, mit einem Fokus auf positive Nutzungserlebnisse für eine Technologie passende Anwendungsfälle zu identifizieren. Die Inspirationsmatrix nutzt dafür eine angepasste Problem-Lösungs-Matrix, um systematisch Kombinationen von Nutzeraktivitäten und abstrahierten Technologiefunktionen anhand einer Leitfrage auf ihr Potenzial für positive Nutzungserlebnisse zu analysieren. Der Fokus liegt darauf, die Potenziale einer Technologie für positive Nutzungserlebnisse in Form erster PUX-Ideen (=Idee für konkrete Anwendung einer Technologiefunktion bei bestimmter Nutzeraktivität) einzuschätzen.

Die Inspirationsmatrix wurde bisher 6 Mal in der ersten und 4 Mal in der zweiten Iteration angewandt und anhand der Anforderungen Systematik, Nachvollziehbarkeit und Transparenz, Erweiterbarkeit, Praxistauglichkeit, Anwendungs-User Experience, Nutzerzentriertheit und Inspirationsfähigkeit der Methode evaluiert. Dabei zeigte sich, dass die Methode die an sie gestellten Anforderungen erfüllen kann. Stärken der Inspirationsmatrix aus Sicht ihrer Anwender*innen sind ihre Gestaltung, Übersichtlichkeit, strukturiertes Vorgehen nach Anwendungsbereichen → Ideenflow/Kreativitätsförderung, sichtbarer Fortschritt, Anwendbarkeit im Team oder allein, gemeinsame Ideenfindung/Inspiration, regt zu ungewöhnlichen Ideen an, dynamische Diskussion, Fokus auf PUX/Übersicht, schnell erste Ergebnisse, jede*r im Team kann beitragen und sehr organisierte Methode. Optimierungspotenziale zeigen sich bei teils zu kleinen Gruppen, mehr Bearbeitungszeit, um detaillierte Ideen zu entwickeln und zu diskutieren, unterschiedlichem Motivationsgrad der Teilnehmenden und teils zu langes Aufhalten bei Kombinationen ohne PUX-Potenzial. Ändern sollten wir aus Sicht der Teilnehmenden folgendes: Zusatzspalte für Ideen, keine Aufteilung Technologiefunktionen, Timer auf Board, Moderation und anderes Whiteboard. Die nächste Iteration der Inspirationsmatrix soll die Stärken beibehalten und Optimierungspotenziale heben. Zukünftig sollte die „*Inspirationsmatrix*“ auch bei anderen Fahrzeugherstellern durchgeführt werden, um repräsentativere Evaluationen zu gewährleisten.

In Zukunft sollten weitere, objektivere Evaluationskriterien definiert werden, wie z.B. die Qualität der Ideen (gemessen durch Expertenbewertungen oder spätere Umsetzungserfolge). Zudem können Indikatoren für die Zusammenarbeit, (z.B. Anzahl Interaktionen zwischen Teilnehmenden und Zufriedenheit mit dem partizipativen Prozess), gemessen werden. Auch die Expertise der Teilnehmenden könnte genauer untersucht werden, da Anwender*innen mit hoher UX-Expertise die Inspirationsmatrix tendenziell positiver bewerteten als weniger erfahrene Teilnehmende.

Danksagung

Wir danken unseren Führungskräften Michael Herter (Audi AG) und Harald Widlroither (Fraunhofer IAO) für die Chance, diese Methode zu veröffentlichen. Herzlichen Dank allen Anwender*innen für ihre Teilnahme und wertvolle Rückmeldung. Außerdem möchten wir uns bei den beiden Reviewern für die konstruktive Kritik bedanken.

Literatur

- Ardilio 2013
ARDILIO, Antonino: *Eine Vorgehensweise zur strategischen Technologieentwicklungsplanung für Forschungseinrichtungen*. Dissertation, 2013. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, (Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement 6), 2013.
- Augstein und Neumayr 2019
AUGSTEIN, Mirjam; NEUMAYR, Thomas: *A Human-Centered Taxonomy of Interaction Modalities and Devices*. In: *Interacting with Computers* 31 (2019), Nr. 1, S. 27–58.
- Becerril et al. 2019
BECERRIL, Lucia; GUERTLER, Matthias; LONGA, Emmanuel: *Developing Design Methods - a Conceptual Requirement Framework*, Bd. 1. In: *DS 94: Proceedings of the Design Society: 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19): Responsible Design for Our Future*: Cambridge University Press, 2019 (1), S. 1463–1472.
- Bopp-Bertenbreiter et al. 2022
BOPP-BERTENBREITER, Valeria; ENGELHARDT, Doreen; RITTGER, Lena; POTTIN, Denise: *Tech4UX - An Approach to Systematically Assess the Potential of a Technology for Positive User Experience*. [Konferenzposter]. 13th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2022) and the Affiliated Conferences. New York, USA, 24.-28.07.2022.
- Desmet und Fokkinga 2020
DESMET, Pieter; FOKKINGA, Steven: *Beyond Maslow's Pyramid: Introducing a Typology of Thirteen Fundamental Needs for Human-Centered Design*. In: *Multimodal Technologies and Interaction* 4 (2020), Nr. 3, S. 38.
- Diefenbach und Hassenzahl 2017
DIEFENBACH, Sarah (Hrsg.); HASSENZAHL, Marc (Hrsg.): *Psychologie in der nutzerzentrierten Produktgestaltung: Mensch-Technik-Interaktion-Erlebnis*. Berlin: Springer, 2017 (Die Wirtschaftspsychologie).
- Dungs et al. 2016
DUNGS, Jennifer; DUWE, Daniel; HERMANN, Florian; SCHMIDT, Alexander; STEGMÜLLER, Sebastian; GAYDOUL, Ralf; PETERS, Peter Lukas; SOHL, Mark: *The Value of Time: Potential for user-centered services offered by autonomous driving*. Stuttgart, 2016.
- Frison und Riemer 2021
FRISON, Anna-Katharina; RIENER, Andreas: *The "DAUX Framework": A Need-Centered Development Approach to Promote Positive User Experience in the Development of Driving Automation*, Bd. 980. In: RIENER, Andreas; MYOUNGHOON, J.; ALVAREZ, Ignacio (Hrsg.): *User Experience Design in the Era of Automated Driving*. 1. Aufl.: Springer International Publishing, 2021 (Studies in Computational Intelligence, 980), S. 237–271.
- Gilovich und Gallo 2020
GILOVICH, Thomas; GALLO, Iñigo: *Consumers' pursuit of material and experiential purchases: A review*. In: *Consumer Psychology Review* 3 (2020), Nr. 1, S. 20–33.
- Haspel et al. 2020
HASPEL, Christina; STOCKINGER, Christopher; LAIB, Magdalena; BURMESTER, Michael: *Positive Erlebnisse bei der Interaktion mit Assistenzsystemen gestalten – Die Erlebnispotentialanalyse*. In: HANSEN, Christian; NÜRNBERGER, Andreas; PREIM, Bernhard (Hrsg.): *Mensch und Computer 2020 - Workshopband*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., 2020.
- Hofmann et al. 2020
HOFMANN, Peter; JÖHNK, Jan; PROTSCHKY, Dominik; URBACH, Nils: *Developing Purposeful AI Use Cases – A Structured Method and Its Application in Project Management*. In: GRONAU, Norbert; HEINE, Moreen; KRASNOVA, Hanna;

- POUSTTCHI, Key (Hrsg.): *Proceedings der 15. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik 2020*. [Berlin]: [GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation], 2020 (Band 1), S. 33–49.
- Klein et al. 2018 KLEIN, Sandra; PRINZ, Wolfgang; GRÄTHER, Wolfgang: A Use Case Identification Framework and Use Case Canvas for identifying and exploring relevant Blockchain opportunities. In: PRINZ, Wolfgang; HOSCHKA, P. (Hrsg.): *Proceedings of 1st ERCIM Blockchain Workshop 2018: Reports of the European Society for Socially Embedded Technologies (EUSSET)*, 2018.
- Krüger et al. 2020 KRÜGER, Anne Elisabeth; POLLMANN, Kathrin; FRONEMANN, Nora; FOUCAULT, Beatrice: Guided User Research Methods for Experience Design—A New Approach to Focus Groups and Cultural Probes. In: BURMESTER, Michael (Hrsg.): *Frameworks and Methods to Design for Positive User Experience and Wellbeing 4 (2020)*, S. 1–22.
- Laugwitz et al. 2008 LAUGWITZ, Bettina; HELD, Theo; SCHREPP, Martin: Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire, Bd. 5298. In: HOLZINGER, Andreas (Hrsg.): *HCI and usability for education and work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society; Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 (Lecture Notes in Computer Science, 5298), S. 63–76.
- Lee et al. 2022 LEE, Seul Chan; NADRI, Chihab; SANGHAVI, Harsh; JEON, Myoungsoon: *Eliciting User Needs and Design Requirements for User Experience in Fully Automated Vehicles*. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 38 (2022), Nr. 3, S. 227–239.
- Pokorni et al. 2021 POKORNI, Bastian; BRAUN, Martin; KNECHT, Christian: *Menschzentrierte KI-Anwendungen in der Produktion: Praxiserfahrungen und Leitfaden zu betrieblichen Einführungsstrategien*. Stuttgart, 2021.
- Reichelt et al. 2022 REICHELT, F.; BLANK, D.; HOLDER, D.; MAIER, T.: *New Holistic Approach Towards a Technology-Driven Development-Model in Automotive*. In: *Proceedings of the Design Society 2 (2022)*, S. 241–252.
- Riddoch 2021 RIDDOCH, Angus: *Nutzerzentrierte Konzeptentwicklung [Vortrag]*. Hochschultag, 23.03.2021.
- Rittger und Schrader 2021 RITTGER, Lena; SCHRADER, Thorsten: Novel experiences and human centered development in the vehicle. In: RIENER, Andreas; MYOUNGHOON, J.; ALVAREZ, Ignacio (Hrsg.): *User Experience Design in the Era of Automated Driving*. 1. Aufl.: Springer International Publishing, 2021 (Studies in Computational Intelligence, 980).
- SAE International J3016 APR2021 SAE International J3016 APR2021. April 2021. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.
- Schawel 2014 SCHAWEL, Christian: *Top 100 Management Tools: Das wichtigste Buch eines Managers Von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung*. 5. Aufl., 2014. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2014.
- Schimpf und Lang-Koetz 2010 SCHIMPF, Sven; LANG-KOETZ, Claus: *Technologiemonitoring: Technologien identifizieren, beobachten und bewerten*. Stuttgart, 2010.
- Richtlinie VDI 2803 Blatt 1 VDI Richtlinie VDI 2803 Blatt 1. Januar 2019. Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode.

Proaktive Sprachassistentenz in automatisierten Fahrzeugen: Wann sollten Nutzende angesprochen werden

Proactive voice assistance in automated vehicles: Understanding when to engage the user

Lesley-Ann Mathis¹, Kathrin Werner^{2,3}, Gerald J. Schmidt³

¹Fraunhofer IAO, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart
lesley-ann.mathis@iao.fraunhofer.de

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT, Stuttgart
kathrinwerner@mail.de

³Hochschule Furtwangen, Fakultät Industrial Technologies, Tuttlingen
gerald.schmidt@hs-furtwangen.de

Abstract (deutsch): Proaktives Verhalten von Sprachassistenten im Fahrzeug wird als Schlüssel für die Entwicklung zunehmend intelligenter und interaktiver Systeme gesehen. Eine der wichtigsten Fragen für proaktive Sprachassistenten ist, wann der richtige Zeitpunkt für die Ansprache des Nutzers ist. Wir präsentieren eine Fahrsimulatorstudie (N = 32), die verschiedene Situationen proaktiver Interaktion während einer automatisierten Fahrt untersucht. Basierend auf Erkenntnissen zu geeigneten Ansprachezeitpunkten während des manuellen Fahrens liegt der Fokus auf Ansprachen in bestimmten Fahrsituationen und beim Ausführen einer fahrfremden Tätigkeit (FFT). Die quantitativen und qualitativen Ergebnisse zeigen, dass die meisten Situationen keinen signifikant negativen Einfluss auf die Bewertung des Zeitpunkts für eine proaktive Interaktion während einer automatisierten Fahrt haben. Eine extreme Verkehrssituationen mit einem herannahenden Einsatzfahrzeug wird jedoch als ungünstiger Zeitpunkt angesehen. Die Fahrtzeit und der aktuelle Zustand des Nutzers sollten zudem für die Wahl eines geeigneten Zeitpunkts berücksichtigt werden. Eine Validierung der Ergebnisse der Studie in einer Realfahrtstudie ist geplant.

Keywords (deutsch):

Sprachassistent, Proaktivität, automatisiertes Fahren, intelligente Benutzerschnittstellen

Abstract (english): Proactive behaviour of in-vehicle voice assistants is seen as key to develop increasingly intelligent and interactive systems. One of the main questions for proactive voice assistants is when opportune moments for engaging the user are. We present a driving simulator study (N = 32) investigating different situations of proactive interaction during an automated ride. Based on previous findings for opportune moments of interaction during manual driving, the study's focus is on evaluating the influence of driving situations and the performance of a non-driving related activity (NDRA) on the opportuneness of a proactive interaction. The quantitative and qualitative findings show that most situations do not impact the opportuneness of a proactive interaction during an automated ride. However, an extreme traffic situation with an approaching emergency vehicle is considered as inopportune. Travel time and the current state of the user should also be considered for the selection of an opportune moment. A validation of the results in a real road driving study is planned.

Keywords (english):

Voice assistant, proactivity, automated driving, intelligent user interfaces

1 Motivation and state-of-the-art

Voice assistants offer an intuitive and natural way for humans to interact with technology and have become an established interaction modality when using smartphones, smart home devices as well as car functions (Bendel 2022). They can be used to search for information, check appointments in the calendar or to receive navigation directions (McTear 2016, p.11).

Various vehicle manufacturers have already presented visions of a voice-based, digital companion for the future vehicle: For example, Toyota presented the virtual assistant "Yui" for its automated concept vehicle "Concept-i", which supports the user in his or her tasks and makes context-adaptive offers that improve the driving experience in the vehicle (Lugano 2017). In contrast to "Yui," currently available voice assistants adapt only slightly to the user and the situation and respond exclusively to the user's prompt (Cha et al. 2020). Studies show that most users imagine the perfect dialog with a voice assistant to be interactive (Völkel et al. 2021) and expect future in-vehicle voice assistants to have features such as personalization, situational adaptivity and, above all, proactivity (Schmidt and Braunger 2018).

Proactive behaviour for voice assistants is defined as a system that acts change-oriented, predictive and on its own behalf (Nothdurft et al. 2015). The interest in proactivity for Artificial Intelligence (AI) based systems interacting with humans is increasing, as it is seen as a distinctive trait for systems to be preferred and accepted by humans (Grosinger 2022). The development of increasingly intelligent systems in the vehicle using AI is currently being researched (Diederichs et al. 2022). One of the key questions for proactive systems is when to interact with the user (Nothdurft et al. 2015). This was already researched in previous studies regarding manual driving.

1.1 Opportune and inopportune moments for proactive interaction

Previous research on manual driving has shown that certain driving situations, such as driving straight ahead, maintaining a constant speed as well as during standstill, are appropriate times for addressing users by a voice assistant during manual driving (Semmens et al. 2019; Koch et al. 2021). On the other side, drivers do not want to be addressed at intersections or while performing driving manoeuvres including lane changes or acceleration (Semmens et al. 2019). Environmental factors such as heavy traffic, police presence and interruptions during situations where drivers want to concentrate on a secondary activity also lead to rejection (Kim et al. 2018; Koch et al. 2021; Semmens et al. 2019). Acceptance of proactive interventions is also closely related to trip characteristics such as the length and purpose of the trip, traffic flow, and the presence of passengers.

Studies investigating proactive smart speakers outside the vehicle show that the mental state, activity, schedule, mood, and cognitive workload also have a major influence on determining if a moment is opportune for proactive interaction (Cha et al. 2020). When other people are present, privacy concerns and interruptions of ongoing conversations also play a role in determining acceptance of proactive interaction.

1.2 Research gap and objective

The current state of research on opportune moments for addressing the user in the context of automated driving, particularly at SAE levels 3-5 (SAE 2021), is insufficient. To support the development of increasingly intelligent systems, studies are needed that investigate actual future use cases of proactive interaction during automated driving. Previous research on manual driving has shown that the driving situation is a major impact factor for the acceptance of a proactive interaction. This study, conducted in a driving simulator, aims to address the research question: "When are opportune and non-opportune moments for being addressed by a proactive voice assistant during automated driving?" Our focus is on evaluating the influence of the driving situation

including the current user activity on proactive voice interaction during automated driving. In addition, we also aim to investigate why users find moments of interaction opportune or inopportune after experiencing this new behaviour by a voice assistant. Based on previous research, we explore the following hypotheses with our study:

H1: Proactive voice interactions in automated driving are rated more opportune during constant driving conditions as compared to the other tested driving situations.

H2: Proactive voice interactions in automated driving are rated less opportune while the user is engaged in a non-driving related activity (NDRA).

2 Method

2.1 Study setup and procedure

The results presented in this work were obtained as part of a larger study. In total, the study lasted around 90 minutes. Participation was voluntary and required participants' prior informed consent. An ethical self-assessment was conducted beforehand to ensure the study's compliance with ethical, legal and social concerns.

2.1.1 Driving simulator and situations for proactive interaction

The user study took place in a high-fidelity static driving simulator, equipped with the simulation software SILAB (version 7), as shown Figure 1. Each participant took a short introductory ride before starting with the main study to familiarize them with the driving simulator and the study setup. This ride included one proactive voice interaction.

The driving route in the main part of the study started with a manual drive of around 1 km (approx. 3 min), until automated driving was announced to the participants by the voice assistant. During automated driving, the car took over the lateral and longitudinal driving task (SAE level 4). Participants were not obliged to monitor the automation or to take over the driving task. The ride duration was approx. 40 minutes and included 11 situations in which a proactive interaction by the voice assistant took place. These driving situations were derived from the manual driving literature cited above and were aimed to include the assumed opportune and inopportune times for being addressed by a voice assistant. Figure 2 gives an overview of the route and the situations of proactive interaction.

The two *Standstill* situations are oddballs in the course, because the vehicle is not moving. Hence, it does neither fit to manual nor automated driving. The first *Standstill* was at the beginning of the ride, the second time in a traffic jam on the highway. In the condition *Constant*, included three times, the



Figure 1: High-fidelity driving simulator used for the study

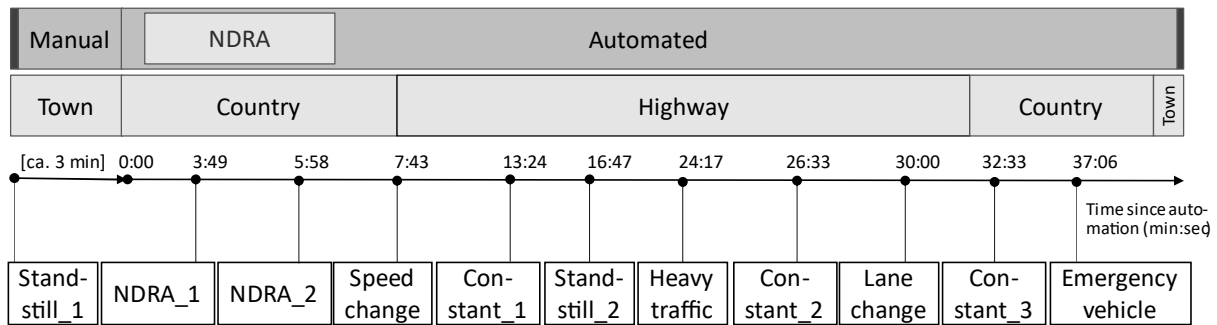


Figure 2: Route in driving simulator for each participant with situations of proactive interaction

current driving speed was kept constant while driving straight ahead while no other traffic was present. In the manoeuvre *Speed change*, the car accelerated from 80km/h to 100km/h when driving upon the highway. For *Heavy traffic*, the route included a lot of traffic on the highway with a vehicle overtaking the ego-vehicle in the moment of interaction. In the situation *Lane change*, the ego-vehicle performed a lane change from the right to the left lane, due to an upcoming slow vehicle on the right lane. The situation *Emergency vehicle* included a vehicle with siren switched on, overtaking the ego vehicle in the moment of interaction. Shortly after the last interaction, the trip destination was reached, and the vehicle slowed down until standing still without a take-over request. In all the above-mentioned situations, the users did not have a task to perform.

During the situations *NDRA_1* and *NDRA_2* the user performed an instructed NDRA. For this, a tablet was mounted in the centre console of the car which displayed a reading task, as shown in Figure 3. The reading task consisted of texts with typing errors (double consonants) which participants had to count and then tick after each text if the total number of errors was below or above 5. All texts were German reports and were adapted to be between 50-70 (medium to medium difficult) on the Flesch-Reading-Ease reading index (Flesch 1949). While in situation *NDRA_1*, the country road was relatively straight. The route changed towards a curvy mountain road after situation *NDRA_2*. Upon completion of *NDRA_2*, the reading task on the tablet was terminated, regardless of completion.



Figure 3: Study setup with tablet for NDRA and prompt evaluation

2.1.2 Voice assistant and prompts

The voice assistant was implemented in a Wizard-of-Oz setup, using pre-recorded prompts with a commercial text-to-speech engine with a female voice. We decided to include realistic use cases for a voice assistant in an automated car to give participants a more immersive experience. That means, the assistant made concrete proactive offers and suggestions during the ride. An initial set of use cases was derived in an expert workshop ($N = 5$), resulting in a total of 27 use cases clustered in the categories working, health, entertainment, personalization, and knowledge. These use cases were then evaluated by $N = 80$ users in an online survey regarding their usefulness, usage, excitement, safety, comfort, innovation and efficiency, derived from items used in Schmidt et al. (2019). Based

on the collective ranking of all use cases, the top ten use cases were selected for the study plus one additional use case for the introductory round.

One speech prompt was formulated for each use case, based on the linguistic recommendations derived in Meck and Precht (2022) for the speech output by voice assistants. Each prompt consisted of a short introductory sentence and a yes-no question, as shown for exemplary use cases in Table 1. Prompts were pseudo-randomized across different situations, except for the situation *Standstill_1* which entailed an additional navigation command to start the route, and *NDRA_2* which entailed the motion sickness warning given the surroundings in the driving situation. Prompts were played approx. every 2-6 minutes during the ride (see Figure 2).

Even when the participant agreed to the offer or suggestion, the corresponding activity (e.g., adjusting the ambient light, performing a short physical activity) was not performed due to time reasons. Therefore, participants were instructed to respond naturally to the suggestion by the speech assistant but should then proceed to the rating of the prompt.

Table 1: Exemplary use cases with corresponding prompts used in the study
(translated from the German original)

Use case	Prompt uttered by voice assistant
To-do-list	"The automated ride will still take some time. Do you want to work on items on your to-do list?"
Movement exercise	"Sitting for long periods can lead to physical discomfort. Would you like to perform a guided movement exercise to prevent tension?"
Motion sickness prevention	"The upcoming route section causes increased motion sickness. Would you like to interrupt your activity for 5 minutes?"
Playlist	"Music can have a positive effect on the well-being. Would you like to listen to your favorite playlist?"
Ambient lighting	"It seems that you are relaxing. Would you like to adjust the interior lighting to enhance your relaxation?"

2.2 Measurements

After each proactive prompt, participants rated the proactive interaction on two questions. The respective items translated from German were „This function is useful.“ to rate the prompt’s usefulness as well as „The moment of address was opportune.“ to rate its timing. The ratings were given on a 7-point Likert scale ranging from 1 (fully disagree) to 7 (fully agree). A video-supported Retrospective Think-Aloud (RTA) (Elbabour et al. 2017) was conducted after the ride, using a video of the driven route and the respective situations. With the help of the recorded situation, participants were asked to reflect on their thoughts regarding the timing of the prompt and why the situation was either opportune or non-opportune for the proactive interaction. The RTA was audio-recorded for later analysis.

2.3 Participants

In total, $N = 32$ participants took part in the study (15 female, 17 male). The mean age of participants was 35.5 years ($SD = 12.6$). The majority of participants were employed or working (56.25%), followed by students (37.5%). Participation was voluntary and rewarded with 50 euros. 75% of participants reported to use voice assistants on their smartphones at least infrequently. Fewer participants stated to use voice assistants on smart speakers (59%) or in vehicles (53%). Technology affinity was measured using the ATI-S (Wessel et al. 2019) and is $M = 4.48$ ($SD = 0.77$).

3 Results

In the following, the quantitative and qualitative data will be presented. While the quantitative data entails results from all 32 participants, the qualitative data includes 31 participants for the RTA ($N = 1$ excluded due to technical difficulties with the recording). During pre-processing of the data, it was noticed that some participants misunderstood certain prompts, which might have influenced their ratings. We therefore excluded the data for these prompts from the dataset. Due to the repeated measures design of the study, a mean substitution for the data was applied for the missing data points using the overall mean of the variables timing and content.

3.1 Quantitative data

The situation *Standstill* is shown and analysed separately as all other situations took place while driving. Figure 4 shows the mean values for the evaluation of the prompt's timing and content for each situation. The situation *Standstill* receives the overall highest value for an opportune timing ($M = 6.48$, $SEM = 0.17$). The focus of analysis will be on the timing assessment. The analysis of the variable usefulness showed no significant differences between the situations (all $ps > 0.05$). This had been aimed for by applying the pseudorandomization of the prompts. The situations *Constant* and *Standstill* were measured multiple times. The ratings showed no significant differences between measurements and are hence displayed as averages.

We analysed the differences for the subjective rating of the timing for all situations using a non-parametric Friedman test, revealing a significant difference, $\chi^2(7) = 82.40$, $p < .001$. Post-hoc analysis with Dunn-Bonferroni corrections applied show that the situation *Constant* is rated as a significant better situation for proactive interaction compared to *Emergency vehicle* ($Z = -2.38$, $p = .003$). In addition, *NDRA_2* is rated significantly better as compared to *Constant* ($Z = 1.97$, $p = .037$). The comparison of *Constant* to any of the other situations did not yield a significant difference in the subjective ratings of the perceived timing, all $ps > .05$.

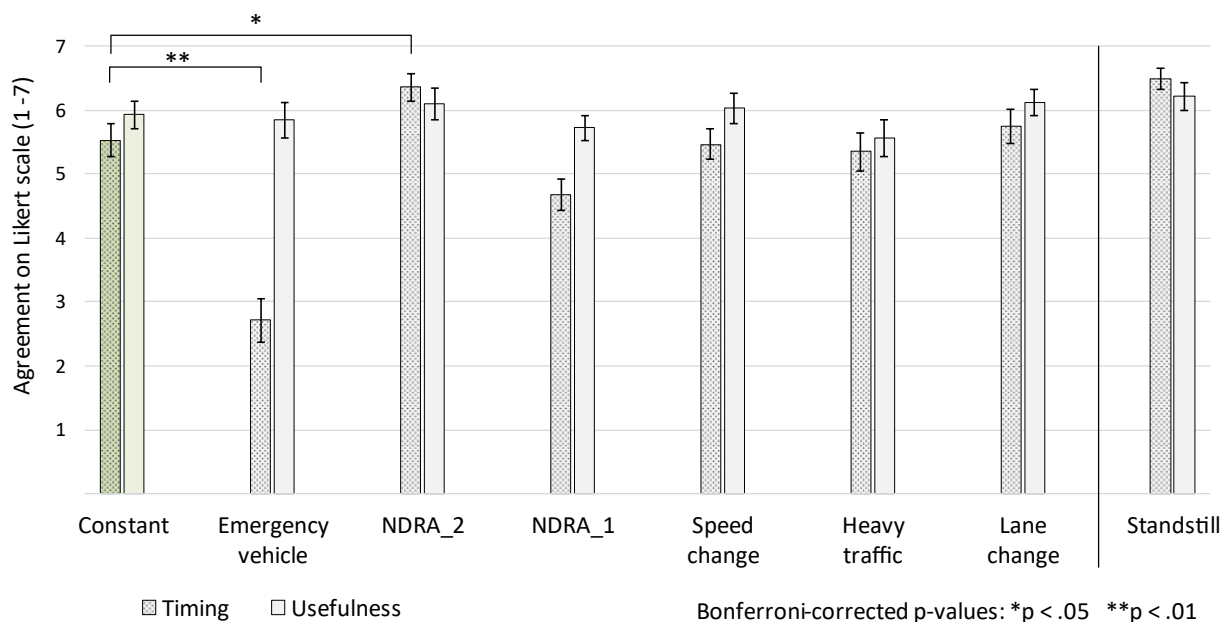


Figure 4: Mean values and standard error (SEM) for the evaluation of timing and usefulness of prompts in each situation on a Likert scale from 1 (strongly disagree) to 7 (strongly agree)

3.2 Qualitative data

Interview data from the RTA followed a qualitative content analysis according to Mayring and Fenzl (2019). Two raters performed an inductive category formation on the transcriptions of the audio-recordings and discussed ambiguous ratings, leading to a final category system. The results of the category formation in Table 2 can be divided into categories why moments were opportune and inopportune – For both, the top-level factors „ride time“, „traffic situation“ and „user state“ were inferred from the inductive category formation. The table shows the derived categories with corresponding relative and absolute frequencies as well as the absolute frequency broken down per situation. If users could not provide further reasons for their decision, we did not include these statements in the analysis.

The largest category of comments is about the traffic situation (39%). This data includes 20 comments (7%) in the *Emergency vehicle* situation alone, which was described “distracting” for a voice interaction: “That was kind of completely wrong. I didn't even get the question right. I only partially understood it because I was so distracted. So the timing was a catastrophe [...]” (P04). In addition, some comments (8%) also mentioned the situations speed change and lane change as distracting driving manoeuvres, as explained by one participant: “[...] it just started an overtaking manoeuvre, so I was a bit distracted. You automatically look in the rear-view mirror, your pulse increases, engine noises go up. [...]” (P21). In contrast, many comments (22%) point out that moments were opportune as neither surroundings nor driving manoeuvre were distracting. This is in particular the case for *Constant* (17%) as “[...] there was nothing going on” (P28) and for *Standstill*, as described by a participant: “[...] it's always pretty boring in a traffic jam anyway and I think it doesn't get so bumpy [...] Happens not much going on around you” (P15).

About a third of the comments (34%) refers to the ride time, where the voice interaction is either opportune (14%) or too late given the remaining time (20%). “[...] Timing is also good, because you've been sitting there for a while [...]” says one participant (P23) referring to the prompt offering a physical exercise. However, another participant (P07) suggests for this prompt in the same situation that the timing is too late: “[...] in terms of timing it was very, very bad, because I think it was 5 minutes before the end. [...] That could have been much earlier.”

In total, 25% of the comments belong to the category user state. Most often mentioned with 29 comments (10%) was that voice interaction was opportune because it suited the current user state. This was predominantly mentioned for the situations *Standstill* and *Constant*: “Timing was okay because I was relaxed, and we were driving straight ahead” (P14). However, 15 comments (5%) also highlight that interactions were inopportune given the user's current emotional state, such as for the situation *Speed change*: “[...] that the voice assistant intervenes at that moment, I found it inappropriate because you have an uncomfortable feeling when the car is accelerating so strongly” (P07).

Though representing only a small proportion, 8 comments (3%) point out that the proactive interaction stood in conflict with their current activity. This was exclusively mentioned for the situation *NDRA_1*: “The traffic situation is calm, but I was just working on the task and that's why it rather disturbed me” (P18). In contrast, other users did not feel disturbed by the interaction when performing an activity: “[...] I could be interrupted, because that was nothing where [sic] would have completely thrown me off my game” (P19).

Table 2: Results from qualitative content analysis depicting the categories why users judged situations as opportune and inopportune: The percentage gives the relative frequency of the category based on the total number of comments, absolute frequencies are depicted in total and per situation.

	Factor	Category	Percentage of comments	Number of comments	Per Situation	Constant (3x)	Emergency veh.	NDRA (2x)	Speed change	Lane change	Heavy traffic	Standstill (2x)
Opportune	Ride time	suitable	14%	41	→	19	0	5	0	3	5	9
	Traffic situation	surroundings non-distracting	13%	37	→	17	0	0	7	1	6	6
		manoeuvre non-distracting	9%	25	→	9	0	0	3	0	1	12
	User state	feeling the need for it	2%	5	→	1	0	0	1	1	1	1
		suitable to own habit	2%	6	→	0	0	0	0	0	0	6
		suitable to user mood/state	10%	29	→	14	0	1	0	1	3	10
Inopportune	Ride time	too late (based on use case)	20%	56	→	21	7	8	4	7	2	7
		too early (based on use case)	2%	6	→	1	0	2	1	0	1	1
	Traffic situation	surroundings distracting	9%	27	→	2	20	0	3	1	0	1
		driving manoeuvre distracting	8%	22	→	0	4	0	8	9	0	1
	User state	conflict with current activity	3%	8	→	0	0	8	0	0	0	0
		conflict with user mood/state	5%	15	→	2	2	1	4	2	2	2
conflict with previous use case		3%	8	→	3	2	0	0	1	2	0	
Total			100%	285	→	89	35	25	31	26	23	56

4 Discussion

When should voice assistants engage the driver/user proactively during a SAE Level 4 (SAE 2021) automated ride? The current study demonstrates that by changing the role from driver to passenger, many more driving situations are opportune for being addressed in the vehicle.

4.1 H1: The role of traffic situation and driving manoeuvres for proactive interaction

Previous research for manual driving suggests that constant driving and standstill are regarded as opportune, but active manoeuvres and most traffic situations are regarded as inopportune situations for proactive interaction. This study in a simulated automated vehicle shows that the timing of proactive interactions during constant driving conditions is not rated significantly better compared to the majority of the tested driving situations, thus *H1* is not supported completely. The one exception to this is a rare and rather attention-grabbing traffic situation involving an emergency vehicle. Here the participants judge a proactive interaction as inopportune.

The qualitative data however suggests that users' evaluations differ for some situations, since at least a proportion of participants judged situations like speed change and lane change as less opportune due to the distracting driving manoeuvre. Comments revealed that these users mostly felt the need to supervise the automation's actions checking if the manoeuvre is performed correctly. While not investigated in further detail in this study, trust in automation might be one factor impacting users' judgements. A study by Manchon et al. (2022) supports that users with a lower trust in automated driving spent more time monitoring surroundings as compared to users with high trust. Overall, automated driving seems to reduce complexity for the right timing regarding the traffic situation. Yet, specific traffic situations should still be considered when modelling the right timing for proactive voice assistants, to avoid engaging with the user in emergency situations.

4.2 H2: Interrupting users while performing a NDRA for proactive interaction

The study has shown that the timing for a proactive voice interaction is not rated significantly worse while the user is engaged in a reading task. Thus, the results do not generally support *H2*. Still, some users feel disturbed, which is line with several previous studies for manual driving or outside the automotive context (Cha et al. 2020; Semmens et al. 2019). The diverging results in the current study could be due to the fact that the instructed reading task led to different levels of cognitive workload among the participants, which is according to previous work by Bailey and Iqbal (2008) a major factor for task interruptibility. Some participants explicitly mention that the task was not that demanding, so that the proactive interaction was acceptable.

In contrast, the quantitative results even show a significant better rating for the situation when performing the NDRA (*NDRA_2*) compared to constant driving conditions. *NDRA_2* contained a non-randomized prompt about user's motion sickness prevention, whereas *Constant* contained pseudorandomized prompts. We argue that this difference goes back to the close interdependence of timing and perceived usefulness of each prompt, since the urgency of a proactive information is an important factor for the acceptance of an interaction (Nothdurft et al. 2015). Users might have considered the context-sensitive motion sickness prompt as particularly opportune, as the voice assistant suggested the interruption of the NDRA to prevent severe symptoms and the prompt was issued just before the relevant section of the route. This shows that an opportune timing of an interaction during the automated ride has to take the content of the prompt as well as its urgency into consideration.

4.3 Future research directions to investigate opportune moments of interaction

The qualitative data from users suggests that impact factors for proactive interaction researched outside the car context are relevant for the right timing, such as user state and remaining time before leaving/arriving (Cha et al. 2020). As shown by contrasting user feedback for the same prompt in the same situation, individual user preferences should be considered, for instance based on a user profile including general interests and preferences. Apart from that, the qualitative results also underline the necessity for monitoring the user's state. As explicitly stated by users, the opportuneness of an interaction depends for example on the current activity, current mood or even on established habits. These impact factors for opportune moments thus mirror general aspects

relevant for the development of intelligent and adaptive interaction concepts in the car, as discussed in Rittger et al. (2020). For the development of corresponding algorithms for proactive behaviour in AI-based voice assistants, the relevant impact factors must be taken into account and prioritized accordingly for the right decision when to engage the user. Hence, further research is necessary for the user-centred design of proactive behaviour before intelligent virtual assistants as presented for concept cars become reality in series vehicles.

4.4 Limitations of the study

As the study results have shown, users often did not clearly separate timing and content of the proactive interactions. Thus, a study without application-oriented prompts as for example used in Semmens et al. (2019) could mitigate this influence, however offering a less immersive experience to users. For prompt design we relied on available research from Meck and Precht (2021). A pre-validation of the prompts themselves would have been required to rule out any ambiguous wording. In the current study, we mitigated this by excluding the misunderstood prompts from the analysis. In addition, the static driving simulator has some inherent drawbacks as vehicle dynamics with longitudinal and lateral acceleration cannot be simulated as in a real car. Especially with regard to the results for driving situations such as lane change, acceleration and heavy traffic, further studies in real traffic are necessary to draw conclusions if the driving situation is not of major importance in automated driving. Apart from that, we also had a rather young sample of study participants so that age influences on the perception of the proactive interactions cannot be eliminated completely.

5 Conclusion and outlook

Proactive interaction of voice assistants is an upcoming in-vehicle feature. The performed driving simulator study shows that proactive interactions were judged as opportune in most of the investigated situations during automated driving. We conclude that driving manoeuvres and environmental factors are less important for the timing of a proactive interaction in automated compared to manual driving. An exception is the extreme situation with an emergency vehicle. Users additionally take into account ride time and user state when judging opportune moments. As suggested by user feedback, the design of in-vehicle voice assistant should also consider individual user preferences for the right timing based on a user profile. The results provide a starting point for further investigations of proactive interactions during automated driving. More in-depth studies with a Wizard-of-Oz vehicle (Diederichs et al. 2020) are planned to validate these findings in real traffic.

Acknowledgements

This study was conducted within the project KARLI („Artificial Intelligence for an adaptive, responsive and level conform interaction with future vehicles“), receiving funding from the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action.

References

- Bailey and Iqbal 2008 BAILEY, Brian P.; IQBAL, Shamsi T.: *Understanding changes in mental workload during execution of goal-directed tasks and its application for interruption management*. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 14 (2008), Nr. 4, S. 1–28.
- Bendel 2022 BENDEL, Oliver: *Sprachassistent: Definition: Was ist "Sprachassistent"?* URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/sprachassistent-123447/version-385447>

- Cha et al. 2020
CHA, Narae; KIM, Auk; PARK, Cheul Young; KANG, Soowon; PARK, Mingyu; LEE, Jae-Gil; LEE, Sangsu; LEE, Uichin: *Hello There! Is Now a Good Time to Talk?* In: *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* 4 (2020), Nr. 3, S. 1–28.
- Diederichs et al. 2022
DIEDERICHS, Frederik; WANNEMACHER, Christoph; FALLER, Fabian; MIKOLAJEWSKI, Martin; MARTIN, Manuel; VOIT, Michael; WIDLROITHER, Harald; [...]: *Artificial Intelligence for Adaptive, Responsive, and Level-Compliant Interaction in the Vehicle of the Future* (KARLI), Bd. 1583. In: STEPHANIDIS, Constantine; ANTONA, Margherita; NTOA, Stavroula (Hrsg.): *HCI International 2022 Posters*. Cham: Springer International Publishing, 2022 (Communications in Computer and Information Science, 1583), S. 164–171.
- Diederichs et al. 2020
DIEDERICHS, Frederik; MATHIS, Lesley-Ann; BOPP-BERTENBREITER, Valeria; BEDNORZ, Benjamin; WIDLROITHER, Harald; FLEMISCH, Frank: *A Wizard-of-Oz vehicle to investigate human interaction with AI-driven automated cars*. *Driving Simulation Conference Europe VR (DSC) (2021)*. <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-413310>.
- Elbabour et al. 2017
ELBABOUR, Fatma; ALHADRETI, Obead; MAYHEW, Pam: *Eye Tracking in Retrospective Think-Aloud Usability Testing: Is There Added Value?* In: *Journal of Usability Studies* Vol. 12 (2017), Nr. 3, S. 95–110.
- Flesch 1949
FLESCH, Rudolf: *The Art Of Readable Writing*. New York: Harper, 1949.
- Grosinger 2022
GROSINGER, Jasmin: *On Proactive Human–AI Systems*. In: *8th International Workshop on Artificial Intelligence and Cognition (2022)*.
- Kim et al. 2018
KIM, Auk; CHOI, Woohyeok; PARK, Jungmi; KIM, Kyeyoon; LEE, Uichin: *Interrupting Drivers for Interactions*. In: *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* 2 (2018), Nr. 4, S. 1–28.
- Koch et al. 2021
KOCH, Kevin; MISHRA, Varun; LIU, Shu; BERGER, Thomas; FLEISCH, Elgar; KOTZ, David; WORTMANN, Felix: *When Do Drivers Interact with In-Vehicle Well-being Interventions? An Exploratory Analysis of a Longitudinal Study on Public Roads*. In: *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies* 5 (2021), Nr. 1, S. 1–30.
- Lugano 2017
LUGANO, Giuseppe: *Virtual assistants and self-driving cars*. In: RAK, Jacek; BERBINEAU, Marion; MARAIS, Juliette; VINEL, Alexey; TELECOMMUNICATIONS, International Conference on ITS (Hrsg.): *Proceedings of 2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST): May 29-31, 2017, Warsaw, Poland*. [Piscataway, NJ]: IEEE, 2017, S. 1–5.
- Manchon et al. 2022
MANCHON, J.-B. ; BUENO, Mercedes ; NAVARRO, Jordan: *How the initial level of trust in automated driving impacts drivers' behaviour and early trust construction*. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 86 (2022), S. 281–295.
- Mayring and Fenzl 2019
MAYRING, Philipp; FENZL, Thomas: *Qualitative Inhaltsanalyse*. In: BAUR, Nina; BLASIUS, Jörg (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 633–648.
- McTear 2016
MCTEAR, Michael; CALLEJAS, Zoraida; GRIOL, David: *The Conversational Interface : Talking to Smart Devices*. 1st ed. 2016. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer, 2016.
- Meck and Precht 2021
MECK, Anna-Maria; PRECHT, Lisa: *How to Design the Perfect Prompt: A Linguistic Approach to Prompt Design in Automotive Voice Assistants – An Exploratory Study*. In: *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York, NY, USA: ACM, 2021, S. 237–246.

- Nothdurft et al. 2015 NOTHDURFT, Florian; ULTES, Stefan; MINKER, Wolfgang: Finding Appropriate Interaction Strategies for Proactive Dialogue Systems—An Open Quest. In: K. Jokinen; M. Vels (Hrsg.): *Proceedings of The 2nd European and the 5th Nordic Symposium on Multimodal Communication, August 6-8, 2014, Tartu, Estonia*. Linköping University Electronic Press, 2015. S. 73-80.
- Rittger et al. 2020 RITTGER, Lena; ENGELHARDT, Doreen; STAUCH, Oliver; MUTH, Ivo: *Adaptive User Experience und empathische HMI-Konzepte*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 122 (2020), Nr. 11, S. 16–21. URL: <https://doi.org/10.1007/s35148-020-0332-4>
- SAE 2021 SAE INTERNATIONAL: *J3016 Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. In: *SAE International - Recommended Practice* (2021). URL: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/
- Schmidt and Braunger 2018 SCHMIDT, Maria; BRAUNGER, Patricia: A Survey on Different Means of Personalized Dialog Output for an Adaptive Personal Assistant. In: MITROVIC, Tanja; ZHANG, Jie; CHEN, Li; CHIN, David (Hrsg.): *Adjunct Publication of the 26th Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*. New York, NY, USA: ACM, 2018, S. 75–81.
- Schmidt et al. 2019 SCHMIDT, M., STIER, D., WERNER, S., & MINKER, W: *Exploration and assessment of proactive use cases for an in-car voice assistant*. In: *Studientexte zur Sprachkommunikation: Elektronische Sprachsignalverarbeitung 2019*, 148-155.
- Semmens et al. 2019 SEMMENS, Rob; MARTELARO, Nikolas; KAVETI, Pushyami; STENT, Simon; JU, Wendy: Is Now A Good Time? An Empirical Study of Vehicle-Driver Communication Timing In: BREWSTER, Stephen; FITZPATRICK, Geraldine; COX, Anna; KOSTAKOS, Vassilis (Hrsg.): *CHI 2019: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, May 4-9, 2019, Glasgow, Scotland UK*. New York, NY: ACM, 2019, S. 1–12.
- Völkel et al. 2021 VÖLKEL, Sarah Theres; BUSCHEK, Daniel; EIBAND, Malin; COWAN, Benjamin R.; HUSSMANN, Heinrich: Eliciting and Analysing Users' Envisioned Dialogues with Perfect Voice Assistants. In: KITAMURA, Yoshifumi (Hrsg.): *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2021 (ACM Digital Library), S. 1–15.
- Wessel et al. 2019 WESSEL, Daniel; ATTIG, Christiane; FRANKE, Thomas: ATI-S - An Ultra-Short Scale for Assessing Affinity for Technology Interaction in User Studies. In: ALT, Florian; BULLING, Andreas; DÖRING, Tanja (Hrsg.): *Mensch und Computer 2019 - Tagungsband*. New York: The Association for Computing Machinery, Inc, 2019, S. 147–154.

Positionierung und Karosserieintegration von Sensoren in autonomen Shuttle-Fahrzeugen

Positioning and body integration of sensors in autonomous shuttle vehicles

Philipp Hafemann¹, Aleix Lazo Prat², Markus Lienkamp¹

¹Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, München
philipp.hafemann@tum.de

²Polytechnic University of Catalonia, Department of Fluid Mechanics EEBE, Barcelona
aleix.lazaro.i@upc.edu

Abstract (deutsch): Autonome Shuttle-Fahrzeuge sind ein vielversprechender Weg, um vollständig autonome Fahrzeuge auf die Straße zu bringen und in den realen Verkehr zu integrieren. Da traditionelle Fahrzeughersteller diese Fahrzeugkonzepte bisher kaum anbieten, wird der Markt von vielen neuen Firmen mit eigens entwickelten Fahrzeugkonzepten geprägt. Für die Darstellung des vollautonomen Betriebs besitzen diese Fahrzeuge zahlreiche Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung. Ziel dieses Beitrags ist es, autonome Shuttles auf ihr Sensorset hin zu untersuchen. Der Fokus liegt dabei speziell auf der Positionierung der Sensoren und der Karosserieintegration. Es wird aufgezeigt, dass die Fahrzeuge sich trotz gleichen Anwendungsfalls in der Positionierung von Sensoren unterscheiden und darüber hinaus unterschiedliche Strategien zur Integration von Sensoren verwenden. Weiterführend werden die Integrationsstrategien geclustert und in ihren Auswirkungen auf das Fahrzeugdesign analysiert. Darauf aufbauend werden Anforderungen an die Sensorpositionierung und Integration in der Konzeptphase abgeleitet.

Keywords (deutsch):

Autonomes Fahren, Sensorintegration, Sensorpositionierung

Abstract (english): Autonomous shuttle vehicles offer a promising avenue for deploying fully autonomous vehicles on the road and integrating them into real-world traffic. Since traditional vehicle manufacturers have hardly offered this vehicle concept to date, the market is being shaped by many new companies with specially developed vehicle concepts. These vehicles have numerous sensors to perceive the environment for a fully autonomous operation. This paper aims to investigate autonomous shuttles with respect to their sensor set. The focus is specifically on sensor positioning and body integration. It is shown that despite having the same use case, the vehicles differ in sensor positioning and use different sensor integration strategies. Further, the integration strategies are clustered and analyzed in their impact on the vehicle design. Based on this, sensor positioning and integration requirements in the concept phase are derived.

Keywords (english):

Autonomous Driving, Sensor Integration, Sensor Positioning

1 Introduction and Motivation

Autonomous driving is one of the significant trends in the automotive industry, driven by advancements in sensor technology and software capabilities, among others. Increasingly, self-driving features are added to vehicles. It is supposed to make transportation more efficient, clean, and safe (Watzenig and Horn 2017). Autonomous driving will change how vehicles are used and create new opportunities for business models. Collective public transport (CPT) is one of these new business models seen as most promising (Mira-Bonnardel and Attias 2018). It benefits cities and can extend or enhance public transport by offering shared last-mile transport for multiple people. Many companies are working on deploying vehicles for CPT with full automation capabilities, i.e., autonomy Level 4 as defined by SAE J3016. Among these are traditional manufacturers and numerous companies with no history in conventional car manufacturing.

In the development process of these vehicles, sensor technology and computing units play a decisive role. The number, types, and placement of sensors are fundamental to the autonomous driving function as they are responsible for perceiving the environment. However, their selection and positioning also affect other areas of the vehicle concept, e.g., the mass, energy consumption, and package. If not integrated appropriately, the aerodynamics are affected. This trade-off between technical and aesthetical aspects is known as the design-technology-convergence (DTC). Given the novelty of the technology and vehicle types, a state-of-the-art for sensor setup and vehicle design is yet to be established. Our contribution investigates and classifies different solutions companies take in solving the DTC of sensor setup and exterior design and aims at highlighting the importance of DTC in this new context. The structure of the paper is as follows: After presenting the theoretical background, we first describe the research and selection process of companies with vehicles for CPT. Second, the positions of sensors are analyzed, and sensor clusters are derived. Third, integration strategies are presented, followed by an integration requirements analysis. The paper concludes with a discussion and summary.

2 Sensor Integration in the Design Process

Autonomous vehicles are equipped with sensor technologies like lidar, camera, radar, and ultrasonic sensors to perceive the environment. The resulting functional performance can be expressed by the field-of-view (FoV) the sensor setup covers. For high coverage placing the sensors protruding the vehicle body is beneficial because it minimizes the occlusion through the vehicle body. However, the placement outside the body significantly impacts the design. This trade-off must be considered early in development, and suitable integration strategies must be defined. Several researchers have conducted experiments on the optimal placement of sensors using technical performance indicators. They optimize the position using metrics from information theory evaluating the information uniformity and density acquired by sensors (Roos et al. 2021), the performance of object detection and tracking metrics (Hartstern et al. 2020), or maximization of coverage in regions of interest (Liu et al. 2019; Barthelmes et al. 2022). Another relevant influence on the sensor function described by Baumgart et al. (2021) is the contamination through spray, dirt, or snow. Positions that quickly become covered by dust, rain, or ice are not well suited for the placement of sensors.

However, besides the technical functionality of the sensor setup, the aspects of sensor integration need to be considered. The integration of sensors influences the exterior design, the aerodynamics, and, partly, vehicle mass and package. The design process described by Wolff et al. (2021) includes defining a rough vehicle concept, then iterating over different design sketches or 3D models. This phase ends with the design freeze. After that, the various technical domains begin with the detailed design in their respective area. In this phase, target conflicts appear due to the different requirements of the domains.

The technical fields work from the inside to outside, while designers work from outside to inside (Löwer and Wieck 2018). On the technical side, the whole vehicle concept is derived by defining and

sizing the subcomponents and locating them in the vehicle package. For designers, the appearance of a vehicle is the starting point. They work from outside to inside. Thereby, compromises must be found between design requirements and technological constraints. Since vehicle appearance is a major part of the brand identity, the design and technical domain must work together at eye level to find suitable solutions for the design-technology-convergence. Good examples of a combination of design and technology are the front bumper, the lights, and the radiator grill (Kraus 2007). These components determine the “face” and have become part of a manufacturer’s design language, while their necessity is based on a required technical function. The same principles must apply to the sensor domain. Therefore, finding new solutions for placing and integrating sensors in the vehicle body is necessary. The sensors interact with the vehicle shape and appropriate integration strategies into the vehicle body depending on the position still have to be defined.

Previous works in this field by Fischer et al. (2021) analyzed sensor positions and integration strategies for passenger cars or non-purpose design vehicles. They distinguish between an additive and integrative integration strategy for sensors. These two strategies are also visible in Figure 1. Non-purpose design test vehicles using add-on parts make use of the additive strategy. The shuttle-design vehicles use an integrative strategy by incorporating sensors directly in the vehicle concept phase. As Fischer et al. (2021) mentioned, the integrative design strategy is more complex because early knowledge about sensor positions and function is needed, and the interactions increase. Based on their analysis, this publication further analyzes the integrative strategy of purpose-design shuttle vehicles and gives an overview of existing vehicles and their sensor positions. Consequently, requirements for integrating sensors are derived.

3 Vehicle Concepts for CPT

At first, we conduct explorative research on vehicle concepts used for autonomous driving in general. The vehicles used for autonomous driving can be clustered into five groups (Figure 1), depending on their degree of change in the exterior car. The primary differentiation is between standard vehicle concepts adapted to autonomous driving and new, purpose-designed vehicle concepts. Non-purpose design vehicles use passenger cars, add-on sensors, and computing hardware. Adapting regular cars to drive autonomously requires adding multiple data-collection components in the bodywork. These significantly impact the vehicle at all levels (electrical requirements, packaging, aerodynamics, costs, and others), inevitably leading to compromises in some areas, such as design. However, this approach allows for the quick deployment of autonomous driving software without developing a new vehicle. Software-focused companies like Waymo and Uber follow this approach. On the other hand, purpose-designed vehicles are disruptive in their design, following no design heritage of previous models. These vehicles are conceptualized from the beginning for CPT and therefore have a completely new vehicle layout. Depending on their degree of change in the interior, purpose-designed vehicles are divided into subgroups, which either tend toward cars with all seats facing forward, are of shuttle-like design with new interior freedoms like vis-à-vis seating layout, or lean more towards buses and trains.

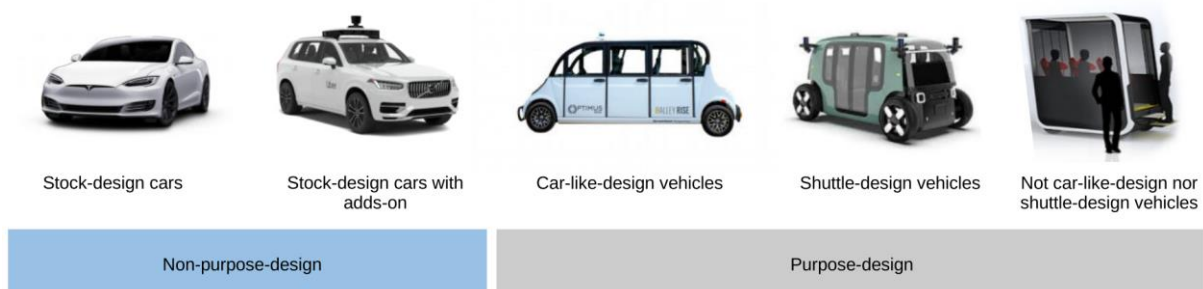


Figure 1: Overview of different vehicle concepts for autonomous driving, own representation

Of these three, the autonomous shuttle (AS) is the concept chosen by many companies for an autonomous CPT application. AS are vehicles with a similar footprint to ordinary passenger cars but are taller to maximize cabin volume and interior space, allowing easy boarding and accommodating standing passengers. They represent fully AS of L4 or L5. Therefore, no steering wheel and no driver are present. Autonomous shuttles drive electrically, are automated and extensively networked, and therefore ideally suited for shared mobility. The main field of application is the transportation of groups of people, but it is also possible to use them to transport goods.

To gain a first overview of relevant AS, several reports are used as initial sources (Antoniali 2019; Francis 2020; VDV 2022; Zinckernagel et al. 2018). The reports contain information about specific models and their deployments. Based on these reports, a definition is derived. This paper considers autonomous shuttles as vehicles that meet the following criteria:

1. Road vehicles with purpose-design
2. Autonomous driving level 4 or 5, according to SAE J3016
3. Possibility to easily access all sitting/standing positions once inside the vehicle, i.e., no seat row layout with all seats facing exclusively one direction
4. Recognizable length of the car in terms of dimensions (significantly greater than the width).
5. Side-mounted door/s to access the cabin
6. The drivetrain is fully electric

We identified 21 shuttles for further analysis based on these criteria, depicted in Figure 2. Three of these shuttles are designed for the transportation of goods.



Figure 2: Overview of selected shuttles for the analysis. Last column: shuttles for goods transportation

Some of the found vehicles are still in the concept stage, whereas others are already deployed in real-world scenarios. Due to this, information about vehicle specifications is often hard to obtain.

Table 1 summarizes the obtained information about the vehicle base dimensions, maximum speed, and capacity. There is a clear separation between passenger shuttles and object-transportation shuttles in size. Nuro R2 and Neolix for transporting goods are noticeably smaller than the passenger shuttles, whereas Udelv is longer than most shuttles for people. For transporting passengers, the shuttles' lengths range from 3.7 to 5.5 m, their width from 1.6 to 2.4 m, and their height from 1.8 to 2.8 m. The height difference is dependent on the seating concept. Six shuttles that only carry sitting passengers have an average height of 2.12 m. The other twelve shuttles for transporting sitting and standing passengers have an average height of 2.67 m, allowing a fast and comfortable boarding procedure.

Maximum velocities confirm the urban character of this vehicle concept. Only Zoox and Udelv are clearly highway capable. Even though many shuttles are designed for city speeds up to 40 km/h or above, they are not exceeding a speed of 25 km/h in current deployments. Due to the low operating speeds, aerodynamics plays a subordinate role since its share of the total driving resistance is smaller

Table 1: Vehicle parameters of the selected shuttle vehicles. Information in bold is visually derived.

Name (Manufacturer)	Source	Length / mm	Width / mm	Height / mm	Max. Speed / km/h	Capacity sitting, standing
Apolong (Baidu)	(Apollo 2022)	4330	2150	2715	40	8, 6
Autonom Shuttle Evo (Navya)	(Navya 2022)	4780	2100	2670	25	11, 4
autoTAXI (Unicaragil)	(Eckstein 2020)	4428	2096	1957	72	4, -
Coast P-1 Shuttle (Coast Autonomous)	(Matousek 2018)	3962	1828	2438	40	12, 6
e-Palette (Toyota)	(Toyota Motor Corporation 2019)	5255	2065	2760	19	8, 12
EZ10 (Easymile)	(easymile 2019)	4050	1892	2871	40	6, 6
Gacha (MUJI, Sensible4)	(Sensible 4 2019)	4500	2400	2800	40	10, 6
GRT Vehicle (2getthere, ZF)	(2getthere 2022)	6044	2104	2784	40	8, 14
Heat (IAV)	(Hamburger Hochbahn AG et al. 2019)	5100	2050	2710	40	10, 6
i-Cristal (Lohr)	(Lohr Group 2018)	4050	1892	2871	40	5, 16
Milla Pod (Milla Group)	(LeddarTech Inc. 2020)	4140	1640	2210	30	6, -
Nami (Kamaz)	(Rostec 2016)	4600	2000	2390	25	6, 6
Ohmio Lift (Ohmio)	(Roy 2021)	4700	2150	2710	25	6, 20
Olli (Local Motors)	(Local Motors 2019)	3920	2041	2637	40	N/A, 12
Sango (NEVS)	(Hampel 2020)	4270	2020	1970	50	6, -
Westfield Pod (Westfield Technology Group)	(Westfield Technology Group 2022)	3700	1650	2115	40	4, -
Xiaoyu 2.0 (Yutong)	(Sustainable Bus 2021)	5500	2050	2650	40	10, -
Zoox (Zoox)	(Zoox 2022)	3630	1936	1936	120	4, -
Neolix-Shuttle (Neolix)	(Wong 2020)	3000	1000	1800	50	-
Nuro R2 (Nuro)	(nuro 2021)	2740	1100	1860	40	-
Udelv (Udelv)	(Hawkins 2021)	5639	2012	2505	104	-

than the rolling resistance. Therefore, the effect of sensor add-on geometries on aerodynamics is currently neglectable. If the operation transitions towards inter-urban scenarios, the role of aerodynamics must be considered. Many shuttles are designed symmetrical and advertise that they can drive bidirectionally. However, our research could not verify this since images or videos from the specific operating conditions are sparse.

4 Analysis of Sensor Positions

After the research and selection of shuttles, we analyzed the sensor positions. Many manufacturers are not providing detailed information about the sensor set. Often, only the total number of camera, radar, and lidar sensors are given without explicitly disclosing the positioning on the vehicles. Consequently, we analyzed the sensors visible from images where the information was unavailable from a specification. With this technique, especially sensors protruding the geometry are found. Lidar sensors are the easiest to spot because they are bigger than cameras or radar and are often placed outside the body to enlarge the field of view. Radar sensors are smaller than lidars but big enough to be spotted on images unless they are well hidden behind cover parts. Camera and ultrasonic sensors are difficult to detect in this type of analysis because of their size and inconspicuous integrability in the vehicle body. Therefore, our research on the sensor positions focuses on lidar and radar sensors.

In the first step, we divide the vehicle body of a generic autonomous shuttle into twelve different positions assigned with a letter *a-l* (Figure 3 right). For simplification, the clusters are laid out on a quarter vehicle since the arrangement of sensors is always symmetric on the left and right sides of the vehicle. In the analysis, we assign each identified sensor a label based on its position on the vehicle, see Table 2. Analysis of the individual shuttles shows that positioning at the top edge of the windshield (position *c*) is the most frequently used position, with 18 sensors found or, respectively, ten shuttles using this position. Geometrically close and with the second highest usage is position *b*,

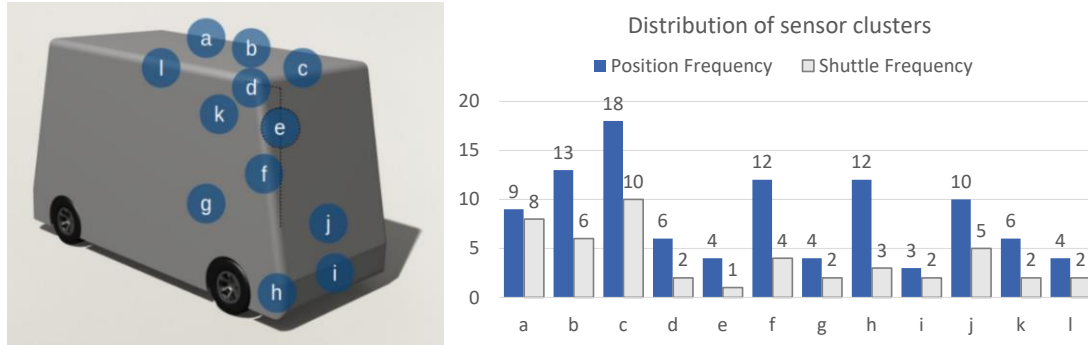


Figure 3: Identified sensor clusters (left) and their frequency distribution (right)

which differs from *c* by placing sensors on the roof, close to the front edge, instead of directly on the rising edge of the front. Position *b* is used 13 times from 6 shuttles. Summing up numbers *b* and *c* shows that shuttle manufacturers prefer to position sensors in the front-top area in the vehicle's centerline, especially lidar sensors.

Positions *i* and *j* are hard to distinguish from images. The difference is in the mounting height of the sensor components, either close to the vehicle ground in the bumper (position *i*) or higher up on the transition towards the front window (position *j*). If they are combined, position *i+j* is the second most used after the front-top-cluster (*c* and *b*). Therefore, it is highly relevant to the design process. The positions *d*, *f*, and *h* are in the corner or front-to-side transition. They are beneficial for 360° sensors like rotating lidar because their FoV covers two sides of the vehicle. The positions have a high sensor occurrence, but not many shuttle manufacturers use this position. The most prominent example that uses position *d* for its sensors is ZOOX using only four sensor locations, one in each corner at position *d*.

Position *e* is only used by the autoTAXI. No other vehicle uses a protruding sensor carrier to position the sensors as far outside the body as the autoTAXI. The same applies to position *l*, which is used only by the HEAT to monitor the area around the vehicle doors with a lidar sensor.

Table 2: Number of sensors in sensor clusters of autonomous shuttles. An asymmetric distribution between the front and rear of the vehicle is denoted by an asterisk.

Name	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	total
Apolong		2	2	2*				2*					8
Autonom Shuttle Evo	1		2				2*		2				7
autoTAXI					4								4
Coast P-1 Shuttle			2										2
e-Palette	1						2*			2			5
EZ10	1							4		2	4		11
Gacha			2							2			4
GRT Vehicle													0
Heat		4	2									2	8
i-Cristal			1*										1
Milla Pod	1								1*				2
Nami													0
Ohmio Lift		2											2
Olli	1		2					6*		2			11
Sango		1*				6*				2			9
Westfield Pod	1	2									2*		5
Xiaoyu 2.0			1*			2*							3
Zoox		2		4									6
Neolix-Shuttle	2		2			2*							6
Nuro R2	1					2*						2	5
Udelv			2										2
	9	13	18	6	4	12	4	12	3	10	6	4	

Positions g and k are used by two shuttles and often show an asymmetric behavior, i.e., sensors are present on the left and right side of the vehicle, but, e.g., in position g on one side, the mounting is in front and on the other in the rear. The Autonom Shuttle Evo is an example of this behavior.

Two vehicles, Nami and GRT Vehicle, do not contain sensors protruding from the vehicle body.

The analysis shows that there are different approaches for autonomous shuttle sensor setups, i.e., the number, type, and positions of sensors vary, despite having similar vehicle base properties and similar application purposes. Some shuttles rely solely on lidar and camera sensors and do not use radar, e.g., the EZ10 and the Autonom Shuttle Evo, two of the most commonly used shuttles.

Another important aspect is the high variance of the positioning of lidar sensors compared to radar sensors (Figure 4). If present, radar sensors are mounted in the lower part of the body, positions f , h , i , j . In these positions, the radar sensor has been used for many years in different driver assistance applications, like adaptive cruise control (ACC). The low mounting position is also advantageous due to the small vertical FoV.

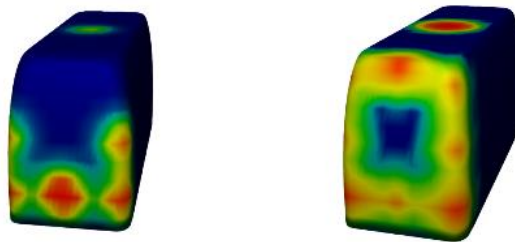


Figure 4: Qualitative heatmap representation of sensor clusters for radar sensors (left) and lidar sensors (right)

In contrast to radar, the lidar sensor is a new technology that has seen rising interest in recent years. Combining a new sensor type with a new vehicle concept shows the many different approaches for positioning. On the one hand, we observe a favor for high positions either centrally on the roof or close to the front window. On the other hand, low mounting also occurs frequently at the corners of the shuttles. Further investigations on the optimal positioning must be carried out for the lidar technology.

5 Sensor Integration

This part of the analysis aims to evaluate the different integration strategies of sensors to the vehicle. We propose to distinguish between two levels of integration: the macroscopic level and the microscopic level.

The macroscopic level describes how much the exterior design of the body is affected by the sensors. It is evaluated how much the outer contour is modified to accommodate the sensor compared to a streamlined and smooth “base” contour. Three levels are identified, denoted by the indices 1, 2, and 3, ranging from a significant change to a minor change in the body, see Figure 5.

For example, ZOOX and autoTAXI represent level 1, showing a considerable change in the base body because dedicated and conspicuous sensor carriers are added to the body on a macroscopic level.



Figure 5: Integration of sensors at the macro level; 1) significant change to the body, own sensor carrier 2) moderate change, additional body element 3) no change to the outer contour

For level 2, the difference in the contour is moderate, e.g., smaller additional body parts are present. Harmonious design is considered, using curvy shapes to blend the protruding component with the original vehicle contour. Level 3 stands for no change to the outer contour. The sensor is mounted inside the vehicle's original outer contour, e.g., by retracting them like the LiDAR sensors of HEAT in position k . Overall, the macroscopic level represents the amount of volumetric change compared to the base vehicle contour without sensors.

In contrast, the microscopic level describes a sensor's local degree of integration into the surrounding component. Here, a distinction between no integration, partial sinking, complete sinking, and hidden integration can be made, denoted with indices $a-d$, see Figure 6.

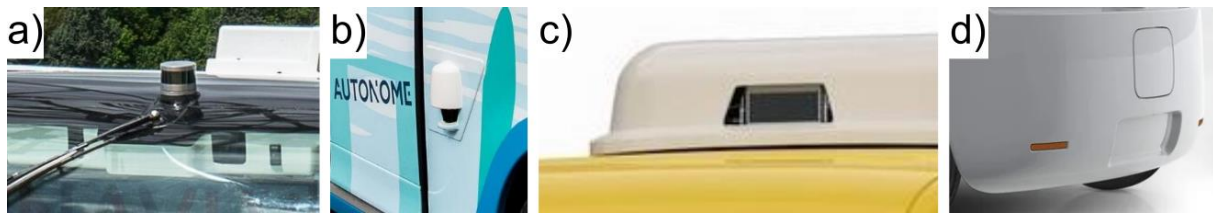


Figure 6: Integration of sensor at micro-level; a) no integration, b) partly sunk, c) completely sunk, d) invisible

No integration means the sensor is placed directly onto its surrounding component, which can be a sensor carrier or the vehicle body itself. Partly sunk stands for an integration, where at least a part of the sensor is covered or recessed into its surrounding component. Completely sunk sensors are recessed in their surrounding component but are still visible. In the highest micro-integration level, the sensor is completely recessed and covered by a body element.

The macroscopic integration mainly depends on the position of sensors, whereas the specific sensor type somewhat impacts the microscopic level. In position a on the center roof or the corner positions d, f , dedicated roof structures or sensor carriers are found for numerous shuttles. We observe fewer contour-changing macroscopic integrations for the position in the lower corner (h) or lower front center (i). One potential reason is that at lower heights, pedestrian safety of add-on components becomes a factor to be considered. Moreover, a macroscopic integration level with significant body change usually places the sensor far away from the vehicle body, increasing its FoV and limiting occlusions with the body.

For the microscopic integration, the sensor type has a significant impact. Especially lidar sensors are the most challenging to integrate due to their large puck-like dimensions, on the one hand, and their light-based working principle, on the other hand. Non-rotating models typically can be integrated relatively unobtrusive, similar to camera sensors. However, rotating sensors are mounted outside the car body to utilize the 360° horizontal field of view as much as possible. Their measurement principle makes it difficult to completely recess them in their surrounding component because the material must be optically transparent for the light pulses to pass through. Otherwise, the range and accuracy of the lidar sensor are impaired. Therefore, the microscopic level of lidar sensor integration is primarily a or b for rotating. For non-rotating lidar, also integration c is possible.

Radar sensors can be installed openly or invisibly as long as the cover material and the paint finish do not impair the electromagnetic waves. Plastics are particularly suitable as covers, as they attenuate the beams insignificantly. The material thickness of the cover must also be taken into account. Since radar sensors are typically rectangular and have a low depth compared to lidar, their design impact is less significant.

Camera sensors pose a minor integration problem. Due to the small dimensions, they can well be integrated visually and physically into the body. If they are placed on dark surfaces or behind glass, they are hardly visible. Installation in the vehicle can be open or behind an optically transparent cover that must protect the camera from dirt.

Sensor integration plays a central role in the exterior design of the vehicle. Since the base shape of all AS is a one-box shape, every protruding component is directly visible. The position on the vehicle's centerline above the windshield (positions b, c) is highly influential for the exterior design because it

is well visible and at a height where the body contour is transitioning from front to the roof. To allow the sensor a large field of view, a sunk or covered integration is difficult. We expect this position to become a part of the design, where the sensors are prominently placed and highlighted.

The same applies to mounting positions at the medium to high corner positions *d* and *f*. The use of dedicated sensor carriers accommodating several sensors is an intelligent solution for both design and function. Sensor carriers are large volumes added to the body in the corners. As mentioned, the corner position is beneficial for the perception task because the field of view of this sensor can cover two sides of the vehicle. At the same time, the large volume can be modified in its form and color, deliberately setting an eye-catcher for the exterior design. ZOOX is an excellent example of this integration strategy. In the lower parts of the body, the design is influenced by components, such as lights or bumper. Adding highlighted sensors to this area makes creating a harmonic “face” more complex. However, technical components, like the radiator grill, have become part of the design language, and the same is expected for the sensors.

Consequently, the authors suggest that the automation domain must become part of the design process of an autonomous vehicle. Similarly to other disciplines, like aerodynamics, the interactions with the exterior design are manifold and must be analyzed early in development.

6 Requirements for Sensor Positioning and Integration

Following the positioning and integration analysis, requirements are derived for selecting positions and integration concepts (Table 3). The requirements relate to functionality, modularity, safety, package requirements, and design aspects. The collection does not claim to be complete but intends to demonstrate the numerous considerations necessary for the design of AS and its sensor system. We distinguish between obligatory requirements (*R*) and optional wishes (*W*) according to the methodology by Göhlich and Fay (2021). Wishes are divided by priority into *W1*, *W2*, and *W3*, with *W1* being highly desirable and *W3* being less important.

Table 3: List of requirements for sensor integration

No	Requirement	Priority
1	Accommodation of the required sensors	R
2	Suitability for different models of the same sensor type	R
3	No restriction on the sensor's function and field of view	R
4	Upgradeability: sensor replacement is possible at any time	R
5	Robustness: weather-resistant, temperature-resistant, vibration resistant	R
6	Pedestrian protection	R
7	Attractive design	W1
8	Protection of sensor functionality: cooling, heating, cleaning	W1
9	Low space requirement inside the car body	W1
10	Low space requirement outside the car body	W2
11	Suitability for different sensor types	W2
12	Protection of sensors (crash, theft, vandalism)	W2
13	Possibility to integrate other systems, e.g., light, signaling system	W3
14	Lowest possible degradation of efficiency: weight, aerodynamic drag	W3

It must be easy for autonomous shuttles operators to upgrade their sensor hardware without much effort. The obligatory requirements concern the functionality of the sensor, the integration concept, and law requirements (1, 3, 5, 6). Moreover, a concept that allows exchanging or upgrading the sensor in the future must be implemented (2, 4) because sensor technology is advancing rapidly. In terms of modularity, an integration concept that can accommodate different sensor types is desirable (11). As mentioned earlier, the exterior design should become an integral part of sensor setup and integration design (7), at least as a high priority wish *W1*. Requirements 9, 10, and 14

relate to the aspects of the whole vehicle, especially the package, and efficiency. The sensors should be as small and light as possible, not negatively impacting the vehicle's mass and package. However, the computing units contribute the most mass to the sensor setup, not the sensor itself.

7 Summary and Implications

The analysis reveals significant differences in the sensor set of autonomous shuttles. While their use case is similar, the number, types, and positions of sensors vary. All shuttles use lidar and camera sensors. In some cases, the radar sensor is omitted. Especially the positions of lidar sensors differ significantly. Since it is the most recent sensor technology and has yet to be widely used, a large degree of freedom for lidar placement is observed. For the future, we expect that companies favor a high mounting position of two central lidars, one in the front and one in the back, or four lidars, one in each corner. Additional lidar sensors might be used to further enhance the field of view.

In contrast to the variance of lidar, radar sensors are all mounted low on the front or front-to-side edges of the vehicle. They show no substantial variation because radar sensors are used in numerous driver's assistance functions, and there is good knowledge of locations where it works well. We also observed that some companies are not using radar in their shuttles. The advantages of radar sensors being robust at night and harsh weather conditions come at the cost of low resolution compared to lidar. Further advancements in radar technology could make them more attractive again.

In our integration analysis, we identified different strategies that are applied to the sensors. We suggested a framework that distinguishes between the macroscopic change of the exterior due to the sensor and the microscopic integration solution. For the exterior design, the macroscopic level plays an important role. The change to the body on a macroscopic level, e.g., through a sensor carrier, directly affects the design. Our research findings emphasize the necessity to incorporate the sensor setup definition into an early stage of the development process. Especially for the lidar sensor technology being considerably bigger and harder to integrate behind a covering material than radar. Future works could improve the database by including all vehicles' sensors, not only the ones visible from visual inspection. Furthermore, the influence of sensors on other design domains, e.g., aerodynamics, mass, or package, should be investigated. We also suggest studying the optimal position of sensors given a specific vehicle body and the use case of the vehicle.

Acknowledgment

This research is accomplished within the project "UNICARagil" (FKZ EM2ADIS002). We acknowledge the financial support for the project from the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF).

Literature

- | | |
|------------------------|---|
| 2getthere 2022 | 2GETTHERE: <i>GRT Vehicle</i> [viewed 30.12.2022]. Available from: https://www.2getthere.eu/technology/vehicle-types/grt-vehicle-automated-minibus/ |
| Antoniali 2019 | ANTONIALI, Fabio: International benchmark on experimentations with Autonomous Shuttles for Collective Transport. In: <i>27th International Colloquium of Gerpisa</i> , 2019 |
| Apollo 2022 | APOLLO: <i>Apollo Minibus: L4 autonomous driving mini-bus</i> [viewed 30.12.2022]. Available from: https://developer.apollo.auto/minibus/index.html |
| Barthelmes et al. 2022 | BARTHELMES, Nicola; SICKLINGER, Stefan; ZIMMERMANN, Markus: The impact of the camera setup on the visibility rate of traffic lights. In: IEEE (Hrsg.): <i>IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration (MFI 2022)</i> . Cranfield, UK, 2022, pp. 1–6 |

- Baumgart et al. 2021 BAUMGART, Rico; FRANZKE, Christopher; PETTKE, Oliver; PETZOLD, Andi: *Weg mit dem Dreck*. In: *IAV-Kundenmagazin automotion* (2021), No. 03, pp. 50–51
- easymile 2019 EASYMILE: *Shared Electric Driverless Shuttle - Vehicle Brochure Gen 3 light*. 2019. Available from: <https://transportation.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/12/New-Brochure-Gen-3-light.pdf> [viewed 30.12.2022]
- Eckstein 2020 ECKSTEIN, Lutz: *UNICARagil news - Juli 2020: Disruptive modulare Architektur für agile automatisierte Fahrzeugkonzepte*. 2020
- Fischer et al. 2021 FISCHER, Lutz; KROGMANN, Stephan; HOLDER, Daniel: Integration von Sensoren in das Exterieur-Design automatisierter_autonomer Fahrzeuge. In: BINZ, Hansgeorg; BERTSCHE, Bernd; SPATH, Dieter; ROTH, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2021
- Francis 2020 FRANCIS, Sam: *Top 25 autonomous shuttle manufacturers*. 03.11.2020 [viewed 14.11.2022]. Available from: <https://roboticsandautomationnews.com/2020/10/15/top-25-autonomous-shuttle-manufacturers/37291/>
- Göhlich and Fay 2021 GÖHLICH, Dietmar; FAY, Tu-Anh: Arbeiten mit Anforderungen: Requirements Management. In: BENDER, Beate; GERICKE, Kilian (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, pp. 211–229
- Hamburger Hochbahn AG et al. 2019 HAMBURGER HOCHBAHN AG; IAV; SIEMENS MOBILITY GMBH; IKEM; DLR; BEHÖRDE FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR UND INNOVATION: *HEAT - Hamburg Electric Autonomous Transportation: Presse-Information - Ergänzung*. 31.07.2019
- Hampel 2020 HAMPSEL, Carrie: *NEVS presents electric robotaxi for sharing services - electrive.com*. 02.07.2020 [viewed 24.05.2022]. Available from: <https://www.electrive.com/2020/07/01/nevs-presents-electric-robotaxi-for-sharing-services/>
- Hartstern et al. 2020 HARTSTERN, Maïke; RACK, Viktor; KABOLI, Mohsen; STORK, Wilhelm: Simulation-based Evaluation of Automotive Sensor Setups for Environmental Perception in Early Development Stages. In: *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*: IEEE, 2020
- Hawkins 2021 HAWKINS, Andrew J.: *Intel's Mobileye will launch a fully driverless delivery service in 2023*. 12.04.2021 [viewed 30.12.2022]. Available from: <https://www.theverge.com/2021/4/12/22375759/intel-mobileye-udelv-autonomous-vehicle-delivery-2023>
- Kraus 2007 KRAUS, Wolfgang: Grundsätzliche Aspekte des Automobildesign. In: BRAESS, Hans-Hermann; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Automobildesign und Technik*. Wiesbaden: Vieweg, 2007, pp. 30–65
- LeddarTech Inc. 2020 LEDDARTECH INC.: *The MILLA Group Selects the Leddar Pixell From LeddarTech for the MILLA POD Autonomous Shuttle*. Available from: <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/11/25/2133309/0/en/The-MILLA-Group-Selects-the-Leddar-Pixell-FromL-eddarTech-for-the-MILLA-POD-Autonomous-Shuttle.html>
- Liu et al. 2019 LIU, Zuxin; ARIEF, Mansur; ZHAO, Ding: Where Should We Place LiDARs on the Autonomous Vehicle? - An Optimal Design Approach. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*: IEEE, 2019, pp. 2793–2799
- Local Motors 2019 LOCAL MOTORS: *Olli Safety Report*. 2019
- Lohr Group 2018 LOHR GROUP: *i-Cristal: The new autonomous, electric and accessible shuttle*. 2018
- Löwer and Wieck 2018 LÖWER, Manuel; WIECK, Franz: MBSE-Partialmodell zur Unterstuetzung des Design Technik Konvergenzprozesses. In: *16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*, 2018
- Matousek 2018 MATOUSEK, Mark: *What It's Like to Ride in a Self-Driving Shuttle*. 29.07.2018 [viewed 30.12.2022]. Available from: <https://www.businessinsider.com/what-its-like-to-ride-in-a-self-driving-shuttle-2018-7>

- Mira-Bonnardel and Attias 2018 MIRA-BONNARDEL, Sylvie; ATTIAS, Danielle: The autonomous vehicle for urban collective transport: Disrupting business models embedded in the smart city revolution. In: Gerpisa (Hrsg.): *26th Gerpisa International Colloquium: New and Traditional Players in the Global Automotive Sector*: Gerpisa, 2018
- Navya 2022 NAVYA: *Autonom Shuttle Evo: Vehicle Brochure*. 2022
- nuro 2021 NURO: *Delivering Safety*. 2021
- Roos et al. 2021 ROOS, Stefan; VOLKEL, Tobias; SCHMIDT, Julian; EWECKER, Lukas; STORK, Wilhelm: A Framework for Simulative Evaluation and Optimization of Point Cloud-Based Automotive Sensor Sets. In: *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*: IEEE, 2021, pp. 3231–3237
- Rostec 2016 ROSTEC: *KAMAZ Demonstrates "Shuttle" Unmanned Minibuses* [viewed 30.12.2022]. Available from: <https://rostec.ru/en/news/4518846/>
- Roy 2021 ROY, Rahul Dutta: *Helping Create an Entire Autonomous Vehicles Eco-System - New Zealand's Ohmio Automotion _ Auto Futures*. 16.03.2021 [viewed 30.12.2022]. Available from: <https://www.autofutures.tv/2021/03/16/helping-create-an-entire-autonomous-vehicles-eco-system-new-zealands-ohmio-automotion/>
- Sensible 4 2019 SENSIBLE 4: *GACHA The World's First Autonomous Shuttle Bus for All Weather Conditions, Launched in March 2019 - Sensible 4*. Available from: <https://sensible4.fi/gacha/>
- Sustainable Bus 2021 SUSTAINABLE BUS: *Yutong Xiaoyu 2.0 autonomous bus wins the 2021 Red Dot Award*. Available from: <https://www.sustainable-bus.com/its/yutong-xiaoyu-2-0-autonomous-bus/>
- Toyota Motor Corporation 2019 TOYOTA MOTOR CORPORATION: *Specially-Designed Toyota "Tokyo 2020 Version" e-Palette to Provide Automated Mobility to Athletes*. 2019. Available from: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/29933371.html> [viewed 30.12.2022]
- VDV 2022 VDV: *Autonome Busse in Deutschland: Liste & Details der Projekte | VDV - Die Verkehrsunternehmen*. 22.12.2022 [viewed 22.12.2022]. Available from: https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value_of_time.pdf
- Watzenig and Horn 2017 WATZENIG, Daniel; HORN, Martin: Introduction to Automated Driving. In: WATZENIG, Daniel; HORN, Martin (Hrsg.): *Automated Driving*. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 3–16
- Westfield Technology Group 2022 WESTFIELD TECHNOLOGY GROUP: *Our Products - The POD - Vehicle Features* [viewed 25.05.2022]. Available from: <https://westfieldavs.com/westfield-pod/>
- Wolff et al. 2021 WOLFF, Klaus; FUTSCHIK, Hans Dieter; ACHLEITNER, August; BURGERS, Christiaan; DÖLLNER, Gernot: *Gesamtfahrzeug*. In: PISCHINGER, Stefan; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, pp. 125–167
- Zinckernagel et al. 2018 ZINCKERNAGEL, Christian; GULDMANN, Stine; LYTZEN, Pernille: *Autonomous Vehicles to Evolve to a New Urban Experience: D2.1 First Gap analysis and recommendations on autonomous vehicles for public service*. 2018
- Zoox 2022 ZOOX: *Vehicle Brochure: Introducing ZOOX*. Built for riders, not drivers. 2022. – Built for riders, not drivers

Die ganzheitliche Beschreibung der Darstellungsgüte als effizientes Werkzeug im Entwicklungsprozess

The holistic description of the visualisation quality as an efficient tool in the development process

Lars Gadermann¹, Daniel Holder¹, Franziska Kern¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
Lars.gadermann@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Im Designprozess sowie während der gesamten Produktentwicklung wird das zu entwickelnde Produkt mehrfach auf verschiedene Weisen visualisiert, bevor das reale Endprodukt zur Verfügung steht. Der Produktvisualisierung fällt im Entwicklungsprozess eine entscheidende Rolle zu, da diese mit erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden ist. Bei der Visualisierung ist ein möglichst hoher Grad an Darstellungsgüte von Vorteil. Zeitgleich soll der Ressourceneinsatz möglichst gering gehalten werden. In bisherigen Beschreibungen von Darstellungsgüte oder analogen Begrifflichkeiten fehlt eine ganzheitliche, systematische Betrachtung, welche nicht nur die visualisierungsseitigen Attribute, wie z. B. Auflösung mit einbezieht, sondern auch die Verbindung zur Produktgestalt herstellt. Um eine Abschätzung der nötigen Darstellungsgüte zu ermöglichen, wird diese über einen Zusammenhang aus Visualisierungsqualität und Produktgestalt beschrieben. Mittels einer Online-Studie mit Conjoint-Analyse wurden relative Wichtigkeiten von Einzelfaktoren untersucht, um deren Einfluss auf die Darstellungsgüte auszumachen.

Keywords (deutsch):

Darstellungsgüte, Visualisierungsqualität, Designreifegrad, Teilgestalten, Produktgestalt

Abstract (english): During the design process and the entire product development, the product to be developed is visualised several times in different ways before the final product is available. Product visualisation plays a decisive role in the development process, as it is associated with considerable time and financial expenditure. A high degree of visualisation quality is advantageous for the visualisation. At the same time, the use of resources should be kept as low as possible. In previous descriptions of visualisation quality or similar terms, a holistic, systematic approach is missing, which not only includes the visualisation-side attributes, such as resolution, but also establishes the connection to the product design. In order to enable an estimation of the necessary display quality, this is described via a connection between visualisation quality and product design. By means of an online study with conjoint analysis, the relative importance of individual factors was investigated in order to identify their influence on the quality of presentation.

Keywords (english):

Product design, visualisation quality, quality of presentation

1 Motivation und Ausgangssituation

Der Produktvisualisierung fällt im gesamten Produktentwicklungsprozess und besonders im Designprozess eine entscheidende Rolle zu. Anhand verschiedenster Darstellungen des zu entwickelnden Produkts werden oftmals weitreichende Strategieentscheidungen getroffen, lange bevor das reale Endprodukt zur Verfügung steht. Um diese Entscheidungen zufriedenstellend treffen zu können, ist eine effiziente Produktvisualisierung nötig, die alle Qualitätsanforderungen erfüllt.

Gerade in der Anfangsphase des Produktentwicklungsprozesses und besonders im Design besteht die Schwierigkeit, aussagekräftige Entscheidungen zu treffen (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017, S. 617 ff.). Der Formfindungsprozess des Produkts ist noch nicht abgeschlossen, Details sind oft noch nicht festgelegt oder ausgearbeitet. Auf Basis dieser Entwicklungsstände müssen jedoch Entscheidungen getroffen werden, ob sich das Produkt in die gewünschte Richtung entwickelt oder welche Maßnahmen ggf. als nächstes getroffen werden müssen, um eventuelle Abweichungen abzufangen (Straub und Riedel 2006, S. 191). Um nicht nur über abstrakt wirkende Daten zu diskutieren, werden Visualisierungen als Kommunikationsmittel zwischen den Designern oder Entwicklern herangezogen (Straub und Riedel 2006, S. 196). Diese Visualisierungen sind meist mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden und binden so eine Menge an Ressourcen (Straub und Riedel 2006, S. 190; Müller et al. 2005, S. 17). Das Fehlerpotential ist hoch und Fehlentscheidungen können weitreichende Folgen haben. Die Fehlertoleranz ist im Hinblick auf eine wirtschaftliche Entwicklung niedrig (Reinhart 1996, S. 71 ff.). Ein Verzicht auf Detaillierung der Darstellungen wäre eine naheliegende Lösungsoption, jedoch ist die Qualität der Visualisierung, zusammen mit dem Reifegrad des Designs ausschlaggebend für die weitere Entwicklung (Reid et al. 2013). Es sind Möglichkeiten gefragt, die eine aussagekräftige, belastbare Visualisierung des Produkts bieten. Zeitgleich soll der Ressourceneinsatz möglichst gering und effizient gehalten werden.

2 Theoretische Grundlagen

Zunächst sollen einige theoretische Grundlagen dargelegt werden. Diese beinhalten relevante Begriffsdefinitionen sowie eine Recherche zum Stand der Technik und Forschung hinsichtlich der behandelten Themen.

2.1 Absicherung in der frühen Phase der Produktentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie

Nach Schömann (2011, S. 84–89) unterteilt sich die Produktentwicklung in mehrere Phasen. Dem eigentlichen Fahrzeugprojekt sind die Vorentwicklung und die Produktplanung vorangestellt. Die Entwicklung des Fahrzeugs beginnt mit der Definitionsphase, in der Ziel und Konzept des Projekts definiert werden. Anschließend beginnt die Produktentwicklungsphase, welche dann in die Vorserie und die Serie übergeht. Da für diesen Beitrag die Produktentwicklungsphase relevant ist, wird diese genauer betrachtet. Laut Schömann (2011, S. 86) beginnt die Produktentwicklungsphase mit der Konzeptentwicklung, welche zunächst das Design und den Entwurf des Fahrzeugs beinhaltet. Im zweiten Teil der Konzeptentwicklung werden die einzelnen Fahrzeugkomponenten entwickelt und konstruiert. Die Konzeptentwicklung endet mit dem Design-Freeze und geht in die Serienentwicklung über.

Bereits während der Konzeptentwicklung, genauer ab dem Designprozess, startet das Prototyping (Schömann 2011, S. 86), also die Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes. Die Darstellungen dienen zum Überprüfen des Entwicklungsfortschritts, zum Abgleich mit der Produktstrategie und als Grundlage für weitere, teilweise weitreichende Entscheidungen (Müller et al. 2005, S. 18). Aus diesen Gründen wird der Prototypingvorgang auch als Absicherung des Produktentwicklungsprozesses bezeichnet (Straub und Riedel 2006, S. 190). Man unterscheidet beispielsweise zwischen Hardwareabsicherung, also der Absicherung durch Realmodelle und digitaler Absicherung, durch virtuelle bzw. digitale Modelle (Müller et al. 2005, S. 19). Bei der Hardwareabsicherung werden klassisch Realmodelle

beispielsweise als Teilaufbauten, Sitzkisten oder vollständige Prototypen bis hin zu Null-Serien hergestellt. Dies ist mit viel Aufwand und Ressourceneinsatz verbunden (Straub und Riedel 2006, S. 190; Müller et al. 2005, S. 17). Weniger aufwändig und daher von steigender Bedeutung, ist die digitale Absicherung, welche CAX-Modelle, FEM-Simulationen, VR- und AR-Darstellungen und weitere virtuelle Modelle umfasst (Müller et al. 2005, S. 19).

Bei der Absicherung im Produktentwicklungsprozess ist der sogenannte Reifegrad eine wichtige Kenngröße. Der Reifegrad bezeichnet Momentaufnahmen, welche eine Aussage zum aktuellen Entwicklungsstand zulassen. Die Absicherung bezeichnet den Vergleich zwischen den zeitdiskreten Soll-Reifegraden, sogenannten Quality Gates, und den realen Ist-Reifegraden. Über den Reifegrad lässt sich somit eine erste Aussage zur Güte des zu entwickelnden Produktes tätigen. (Müller et al. 2005, S. 17 f.)

2.2 Gestalt und Teilgestalten

Um den Designfortschritt des Produkts zu untergliedern, wird im vorliegenden Beitrag die Beschreibung der Produktgestalt nach Seeger (2005, S. 47) verwendet. Darin wird eine (Produkt-) Gestalt als „Ganzheit oder Vereinigung der Teilgestalten Grafik, Farbe, Form und Aufbau“ (Seeger 2005, S. 47) definiert. Basierend auf Holder (2016, S. 7) wird die Teilgestalt Farbe um den Aspekt der Oberfläche ergänzt, um die Struktur bzw. Textur der Produktoberfläche zu beschreiben. Diese ist nicht durch Form oder Grafik abgedeckt, da es sich lediglich um die Oberfläche der Gestalt handelt.

Laut Seeger (2005, S. 49) sind die Teilgestalten aufeinander aufbauend definiert, der Aufbau ist dabei in allen Teilgestalten vertreten und bildet somit die Basis der Produktgestalt. Durch die Formgestalt wird der Aufbau weiter verfeinert. Die Formgestalt repräsentiert die Gesamtheit aller unfarbigen und unbeschrifteten Elemente der Gestalt. Eine Form kann mit Farbe und Oberflächenstruktur belegt werden. Abschließend bezeichnet die Grafik alle grafischen Zeichen auf der Produktgestalt.

Die Auswirkungen der unterschiedlich hohen Ausprägung der Teilgestalten, können mittels der vektorierten Gestaltdefinition verdeutlicht werden (Seeger 2005, S. 51). Über die Beschreibung der Gestaltdefinition über Vektoren stellt Seeger (2005) einen ersten, direkten Zusammenhang zwischen den Teilgestalten und den unterschiedlichen Produktvisualisierungen bzw. Darstellungen her (Seeger 2005, S. 52).

2.3 Darstellungsgüte

Eine ähnliche Beschreibung wie die des Reifegrades zum aktuellen Produktentwicklungsstand, kann auch für die Produktvisualisierung abgeleitet werden. In der Literatur finden sich diverse Beschreibungen im Zusammenhang mit der Qualität von Visualisierungen (Schöner 2014; Zöller 2015; Schauppenlehner et al. 2019; Ziefle 1998). Neben analogen Begriffen, wie z. B. Visualisierungsqualität, findet häufig der Begriff der Darstellungsgüte Anwendung. Jedoch fällt auf, dass hierbei vorzugsweise die Güte der Visualisierung beschrieben wird. Die Visualisierung bezeichnet in jenen Fällen meist nur die optische Darstellung beispielsweise digitaler Modelle.

Im erweiterten Sinne wird von der Darstellung gesprochen, beispielsweise im Zusammenhang mit Fahrsimulatoren. Darstellung beschreibt in diesem Fall die optische Visualisierung ergänzt um Faktoren, die weitere Sinneseindrücke ansprechen; beispielsweise wird bei Fahrsimulationen die Immersion oder die Realisierung von Fahreigenschaften im Zuge der Darstellung genannt. (Zöller 2015, S. 15 ff.; Schöner 2014)

Insgesamt zeigt sich, dass die Darstellungsgüte in der Literatur bisher eher einseitig betrachtet wird. Es werden visualisierungsseitige Attribute einbezogen und beschrieben, wie gut gewisse Eigenschaften die Realität widerspiegeln. Bisher ist allerdings kein Bezug auf die Gestalt des Produktes festzustellen. Im Folgenden soll eine Verbindung zwischen der Darstellungsgüte und dem Reifegrad hergestellt werden, um eine ganzheitliche Beschreibung der Darstellungsgüte zu ermöglichen.

3 Methode

Wie aus der Literatur hervorgeht, wird die Darstellungsgüte bisher nur aus einzelnen Blickwinkeln beschrieben. In bisherigen Beschreibungen zur Darstellungsgüte oder analogen Begrifflichkeiten fehlt eine ganzheitliche, systematische Betrachtung, welche nicht nur die visualisierungsseitigen Attribute, wie z. B. die Auflösung oder den Immersionsgrad einer erlebbaren Darstellung (z. B. Fahrsimulator, VR, u. a.) betrachtet. Vielmehr muss auch eine Verbindung zur Produktgestalt hergestellt werden. Die Korrelation und die gegenseitig bedingenden Interdependenzen zwischen der Gestalt des Produktes und seiner visuellen Darstellung müssen hierbei beachtet werden. Die in diesem Beitrag gezeigte Methode betrachtet die Darstellungsgüte ganzheitlich, als Produkt aus dem Zusammenspiel zwischen Visualisierungsqualität und Designreifegrad. Die Herausforderung ergibt sich hierbei aus den unterschiedlichen, sich stark bedingenden Einflussfaktoren. So ist die Darstellungsgüte bei einem realen Modell nicht einfach mit der Sorgfalt und der Kompetenz der Modelleure gleichzusetzen. Ebenso ist die Darstellungsgüte bei einem virtuellen Modell nicht nur die Auflösung der Grafik oder des Renderings. In der Darstellungsgüte müssen unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden, die es zu kennen und zu beherrschen gilt, um eine entscheidungsunterstützende Visualisierung effizient zu erschaffen. Wenn ein grundlegender Faktor nicht optimal beachtet wird, hilft es auch nicht, nachgelagerte Faktoren zu optimieren. Dies kann anschaulich mit der Erstellung eines Fotos verglichen werden. Wenn das Motiv nicht gut ist, hilft es auch wenig, wenn das Foto technische korrekt belichtet oder noch ein Filter über das Bild gelegt wurde. Denn diese Aspekte alleine machen noch kein schönes Foto aus. In Analogie dazu hilft es bei einer schlechten Darstellung der Formgebung nicht, diese Formen einfach mit Farbe zu belegen.

Die vorgeschlagene Methode zielt darauf ab, die nötige Darstellungsgüte durch Variation der Einflussfaktoren, aus denen sich Visualisierungsqualität und Designreifegrad zusammensetzen, effizient zu erreichen. Es entsteht somit die Möglichkeit einer Abschätzung der nötigen Änderungen, um die gewünschten Effekte bei der gesamtheitlichen Darstellung zu erreichen.

Um den in *Abschnitt 1* genannten Problemen entgegenzuwirken, liefert dieser Beitrag einen ganzheitlichen Ansatz, welcher die Attribute der Produktvisualisierung erstmalig mit der Produktgestalt in Zusammenhang stellt. Um die Produktgestalt zu beschreiben, werden im Weiteren die Teilgestalten nach Seeger (2005) verwendet. Darin wird die Produktgestalt in die aufeinander aufbauenden Teilgestalten „Aufbau, Form, Farbe und Grafik“ aufgeteilt (Seeger 2005, S. 47), siehe auch *Abschnitt 2.2*. Da die Generierung der Produktgestalt und die Darstellung schwer voneinander zu trennen sind, ist es sinnvoll Interdependenzen der Teilgestalten zu den Visualisierungsattributen zu suchen. So kann eine anspruchsgerechte Darstellungsgüte im Voraus gewählt, mit den Möglichkeiten der vorhandenen Technologien abgeglichen und eine effiziente Produktdarstellung gewährleistet werden.

Wie aus *Abschnitt 2.1* hervorgeht, beschreibt der Begriff des Reifegrades eine Aussage über die Güte des aktuellen Entwicklungsstandes (Müller et al. 2005, S. 17 f.). Bezogen auf das Produktdesign kann die Güte des Entwicklungsstandes ebenfalls über die Teilgestalten und die Produktgestalt beschrieben werden.

Somit kann die Ausprägung der einzelnen Teilgestalten als Designreifegrad bezeichnet werden. Seeger definiert die Teilgestalten Farbe, Form und Aufbau als erste, zweite und dritte Abstraktion (Seeger 2005, S. 49). In dieser Abfolge nimmt die Detaillierung mit jeder Teilgestalten ab, während der Abstraktionsgrad zunimmt. Bezogen auf den Designreifegrad bedeutet das, dass dieser niedrig ist, wenn im Modell nur wenige Teilgestalten vorhanden sind oder diese nur gering ausgeprägt sind. Der Designreifegrad ist hoch, wenn mehrere oder stark ausgeprägte Teilgestalten im Modell zu sehen sind, der Abstraktionsgrad also gering ist. Dabei ist der Designreifegrad unabhängig vom Technikreifegrad, welcher den aktuellen Entwicklungsstand der technischen Funktionen im Modell beschreibt (Straub 2015).

Der methodische Ansatz stellt die Abhängigkeit der Darstellungsgüte von den Teilgestalten dar (siehe Schemadarstellung in *Bild 1*) und ergänzt diese um visualisierungsseitige Attribute wie Auflösung und Umgebung. Das Schema zeigt dabei die Zusammenhänge von Designreifegrad und Visualisierungsqualität. Die Qualität der Visualisierung wird durch die Visualisierungsattribute Auflösung und Umgebung

(Licht, Schatten, Raum, Hintergrund, u. a.) beschrieben. Während die Teilgestalten aufeinander aufbauen und damit der Designreifeegrad in gewisser Form von sich selbst abhängig ist, hat die Qualität der Visualisierung einen übergeordneten Einfluss auf die Darstellungsgüte. Beispielsweise hat eine geringe und somit schlechte Auflösung Einfluss auf die Teilgestalten, unabhängig vom Abstraktionsgrad bzw. vom Designreifeegrad. Sowohl die Auflösung des Aufbaus, als auch die Auflösung der anderen Teilgestalten, bis hin zur Grafik, kann gering sein und somit negative Auswirkungen auf die Darstellungsgüte aufweisen, auch wenn die Teilgestalten hoch ausgeprägt sind.

Im linken Teil von *Bild 1* sind die aufeinander aufbauenden Teilgestalten Aufbau, Form, Farbe und Grafik dargestellt. Ihre Ausprägung ist der Designreifeegrad. Die Qualität der Visualisierung, bestehend aus der Umgebung und der Auflösung, ist übergreifend über den Designreifeegrad dargestellt. Mit steigendem Designreifeegrad und besserer Qualität der Visualisierung des Modells, nimmt auch die resultierende Darstellungsgüte zu. Dabei ist davon auszugehen, dass das reale Endprodukt eine Darstellungsgüte von 100 % besitzt, also eine vollständige Ausprägung von Designreifeegrad und Visualisierungsqualität. Die Beschreibung der Darstellungsgüte soll dabei helfen, eine qualitative Abschätzung des erforderlichen Modells zu ermöglichen. Damit kann der Zielkonflikt zwischen einer möglichst hohen Darstellungsgüte bei zeitgleich möglichst geringem Ressourceneinsatz angegangen werden.

Im rechten Teil von *Bild 1* sind verschiedene Ausprägungen von Designreifeegrad und Visualisierungsqualität anhand des Beispiels einer VR-Brille dargestellt. Die verschiedenen Ausprägungen der Teilgestalten bzw. der Visualisierungsaspekte führen voraussichtlich zu unterschiedlichen, wahrgenommenen Darstellungsgüten.



Bild 1: Schema zur Darstellungsgüte mit Einfluss der Teilgestalten

Die resultierende Darstellungsgüte setzt sich somit aus verschiedenen Teilaspekten zusammen. Bei einem fertigen, realen Produkt sind alle Teilaspekte voll ausgeprägt und die Darstellungsgüte liegt bei 100 %. Um Aussagen hinsichtlich der Darstellungsgüte von Visualisierungen mit unvollständig ausgeprägten Teilaspekten treffen zu können, muss bekannt sein, welchen Einfluss die Einzelfaktoren auf die Darstellungsgüte haben. Daraus lässt sich ableiten, was getan werden muss, um bei einer Produktvisualisierung eine hohe Darstellungsgüte zu erreichen, ohne vermeidbare Ressourcen einzusetzen. Eine generell niedrige Darstellungsgüte ist zeitgleich ressourcensparend. Ein wenig detailliertes Modell benötigt beispielsweise weniger Zeit und Aufwand bei der Erstellung als ein hochdetailliertes Modell. Dies gilt dabei unabhängig vom Fortschritt im Entwicklungsprozess, bzw. davon, wie ausgereift das Design ist, also wie nahe sich der Entwicklungsprozess dem Meilenstein des Design-Freeze genähert hat. Für die Abschätzung des Ressourceneinsatzes spielt die Betrachtung der in *Bild 1* gezeigten Teilaspekte und deren Ausprägung eine entscheidende Rolle. Mit Kenntnis der Wichtigkeit, können die Einzelfaktoren gezielt variiert werden, um die Darstellungsgüte ohne vermeidbare Zusatzressourcen auf ein gewünschtes Niveau zu heben. Im Folgenden wird daher eine Probandenstudie mit anschließender Conjoint-Analyse beschrieben, welche zum Ziel hat, die Teilnutzenwerte und die durchschnittliche Wichtigkeit der Einzelfaktoren zu ermitteln.

4 Studie

Um herauszufinden, welchen Einfluss bzw. welche Wichtigkeit die Einzelfaktoren für die Darstellungsgüte haben, wurde eine Conjoint-Studie durchgeführt, welche im Weiteren beschrieben wird. Anschließend werden die Reizmuster und das Studiendesign beschrieben.

4.1 Conjoint-Analyse

Die Conjoint-Analyse ist eine statistische Analysemethode, welche in der Marktforschung und anderen Bereichen etabliert ist (Müller-Hagedorn et al. 1993). Sie wird verwendet um Präferenzen von Personen gegenüber Produkten, auf Teilnutzenwerte der einzelnen Produkteigenschaften zurückzuführen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich der Gesamtnutzen eines Produktes aus der Summe der Teilnutzenwerte seiner Eigenschaften summieren lässt. Für die Analyse werden relevante Merkmale des Produkts definiert, welche sich wiederum in eine Anzahl möglicher Ausprägungen untergliedern. Aus den Ausprägungen und Merkmalen werden durch Kombination die Reizmuster erstellt. Dabei muss jede Ausprägung mehrfach in der gesamten Betrachtung vertreten sein und die Eigenschaften müssen voneinander unabhängig, relevant für die Produktgestaltung und realisierbar sein (Baltes-Götz 2006). Im hier vorliegenden Fall wurden für die Teilgestalten die Merkmale Form, Farbe (mit Farbton, Glanz und Oberfläche) und Grafik gewählt. Die Aufbaugestalt wurde für die Untersuchung als gegeben angenommen, da sie als grundlegende Basis in allen Teilgestalten auftritt (Seeger 2005, S. 49). Für die Qualität der Visualisierung wurden die Auflösung und die Umgebungseinflüsse (bestehend aus Räumlichkeit und Licht) als Merkmale gewählt. Die Merkmale als übergeordnete Einflussfaktoren wurden aufgrund ihrer vermuteten Relevanz für die Darstellungsgüte anhand der in *Abschnitt 3* beschriebenen Methode ausgewählt. Die Merkmale Farbton, Glanz und Oberfläche können der Teilgestalt Farbe mit Oberfläche zugeordnet werden. Das Visualisierungsattribut Umgebung unterteilt sich in die Merkmale Raum und Licht. Für die Form gab es vier Ausprägungen, um eine Varianz in die Reizmuster einzubringen. Für alle anderen Merkmale gab es jeweils zwei Ausprägungen. Die Merkmale und Ausprägungen der Reizmuster sind *Tabelle 1* zu entnehmen.

Tabelle 1: Merkmale und Ausprägungen der Conjoint-Analyse

Merkmal	Ausprägungen																	
	kantig	smooth	detailliert	konvex/konkav	bunt	unbunt	matt	glänzend	keine Struktur	Struktur	keine Grafik	Grafik	niedrig	hoch	kein Raum	Raum	ideales Licht	reales Licht
	Form				Farbton		Glanz		Oberfläche		Grafik		Auflösung		Raum		Licht	
					Farbe								Umgebung					

Für die Studie müssen die einzelnen Ausprägungen wie oben genannt zu Reizmustern kombiniert werden. Eine vollständige Kombination aller Ausprägungen würde $(4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2) = 512$ Reizmuster ergeben, was für eine Studie trivialerweise eine zu hohe Belastung der Probanden bedeuten würde. Durch die Unabhängigkeit der einzelnen Ausprägungen ist es jedoch ausreichend, ein reduziertes, orthogonales Design nach dem sogenannten Orthoplan zu verwenden. Darin wird jede Ausprägung mit anderen Ausprägungen „mit identischen oder proportionalen Häufigkeiten kombiniert“ (Baltes-Götz 2006, S. 6). Der Orthoplan kann mittels Statistiksoftware SPSS erstellt werden. Im vorliegenden Fall

ergaben sich 16 Reizmuster. Die entstandenen 16 Kombinationen wurden visualisiert und mittels Online-Fragebogen einem Probandenkollektiv zur Bewertung vorgelegt. Im folgenden Abschnitt werden die Reizmuster und das Studiendesign genauer beschrieben.

4.2 Reizmuster

Als Gegenstand der Visualisierung wurde eine Virtual Reality Brille (kurz: VR-Brille) gewählt. Anhand dieses vereinfachten Produkts konnten die verschiedenen Merkmale und Ausprägungen stellvertretend für eine Produktentwicklung ausreichend gut umgesetzt werden. Dabei wurden die Teilgestalten Aufbau, Form und Grafik mittels CAD (Catia V5) in einem 3D-CAD Modell konstruiert. Für jede Ausprägung der Formgestalt wurde ein Modell exportiert, jeweils mit und ohne Grafik. In einer Grafiksoftware (Blender) wurden die Modelle importiert und mit den weiteren Ausprägungen Farbton, Oberfläche und Glanz belegt. Für das Rendering wurde ein Raum erstellt, in der die Modelle platziert werden konnten. Für den Fall, dass im Reizmuster kein Raum vorhanden sein sollte, blieb der Hintergrund weiß. Über die Rendereinstellungen wurden Licht und Auflösung je nach Ausprägung eingestellt. Beim Licht wurde zwischen idealem Licht, also einer gleichmäßigen Beleuchtung von allen Seiten, und einem realen Licht, also einer einseitigen Tageslichtquelle mit Schattenwurf, unterschieden. Die 16 Reizmusterkombinationen wurden gemäß ihrer angegebenen Ausprägungen fotorealistisch gerendert und in den Fragebogen eingepflegt. *Bild 2* zeigt eine Übersicht über die 16 Reizmuster.

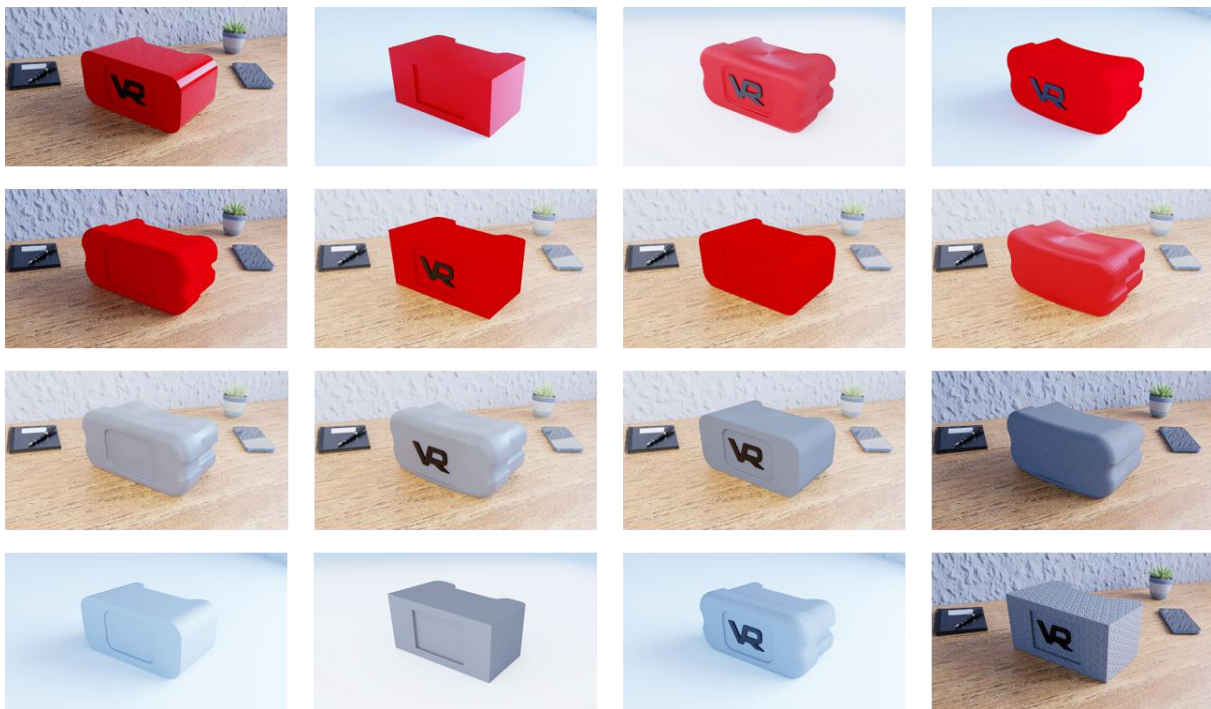


Bild 2: Übersicht über die Reizmuster

4.3 Studiendesign

Die anschließende Befragung wurde mittels Online-Fragebogen durchgeführt. Jeder Proband bekam in randomisierter Reihenfolge nacheinander alle Reizmuster gezeigt. Zu jedem Reizmuster wurden zwei Fragen gestellt. Über das erste Item („Wie realistisch wirkt dieses Produkt auf Sie?“) wurde die Realitätswirkung der VR-Brille abgefragt. Die Beantwortung erfolgte über eine 6-Punkt-Likert-Skala mit den Extremwerten 1 (= „Überhaupt nicht realistisch“) bis 6 (= „Sehr realistisch“). Das zweite Item („Fühlen Sie sich in der Lage, anhand dieser Visualisierung eine Kaufentscheidung zu treffen?“) zielte

darauf ab, eine Unterstützung der Kaufentscheidung zu untersuchen und somit eine Aussage aus Kundensicht zu erhalten. Die Beantwortung erfolgte ebenfalls über eine 6-Punkt-Likert-Skala mit den Extremwerten 1 (= „Nein, ich kann mich nicht entscheiden“) und 6 (= „Ja, ich kann mich entscheiden“). Der Fragebogen wurde von den Probanden selbstständig online am Computer-Bildschirm oder am Smartphone beantwortet. Die Befragung dauerte etwa fünf bis zehn Minuten. Dabei wurde den Probanden jeweils ein Reizmuster als Renderbild gezeigt und die zwei Fragen dazu mit der jeweiligen Likert-Skala eingeblendet. Ein Zurückspringen zu vorherigen Reizmustern war nicht möglich.

5 Ergebnisanalyse und Diskussion

5.1 Probandenkollektiv

An der Studie haben im Zeitraum von drei Wochen 109 Personen teilgenommen, von denen 74 die Befragung abgeschlossen und somit verwertbare Ergebnisse produziert haben. Von den 74 Teilnehmern mit verwertbaren Daten waren 56 männlich (75,7 %), 16 weiblich (21,6 %). Zwei Personen haben keine Angaben zum Geschlecht getätigt. Die meisten Teilnehmer (N=52) waren zwischen 25 und 35 Jahren alt. Ein Großteil der Probanden (N=56) hat einen Fach-/Hochschulabschluss als höchsten Bildungsabschluss angegeben. Von den 74 Probanden haben 28 die Fragen am Computer beantwortet und 46 per Smartphone teilgenommen.

5.2 Ergebnisse der Conjoint-Analyse

Das Ziel der Conjoint-Analyse war die Ermittlung der Teilnutzenwerte und der relativen Wichtigkeiten der einzelnen Merkmale für die Darstellungsgüte. Hierbei muss beachtet werden, dass die Auswertung für jede der beiden gestellten Fragen separat vorzunehmen ist. Über die Frage nach der Realitätswirkung können Schlüsse auf die Darstellungsgüte gezogen werden. Die Frage zur Kaufentscheidung ermöglicht begründete Annahmen über die Wirkung der Darstellungsgüte auf die Kundensicht. Die Auswertung wurde nach dem Nutzenbeitragsmodell mit diskreten Faktoren durchgeführt (Baier und Bruschi 2021, S. 82 f.). Hierfür wurde im Conjoint-Kommando das Datenformat „SCORE“ verwendet. So ergibt sich als Ergebnis der Conjoint-Untersuchung für jede Ausprägung ein Wert (score), der sogenannte Teilnutzenwert. Die individuellen Teilnutzenwerte aller Probanden wurden mit SPSS ausgerechnet und stellen die Bedeutung der Ausprägungen für die Darstellungsgüte dar. Die aggregierten Ergebnisse sind in *Bild 3* zu sehen.

Im Rahmen der Conjoint-Analyse bewerten die Probanden verschiedene Reizmuster, die aus Kombinationen von Merkmalausprägungen erstellt werden. Daraus wird die Bedeutung der einzelnen Merkmale berechnet. Die Merkmalvarianten verändern die Sicht der Probanden auf ein Produkt, bzw. die Wirkung des Produktes auf die Probanden. Als Basiswert wird hierbei die Grundeinstellung der Probanden verwendet. Diese wird durch eine Konstante beschrieben, welche ebenfalls aus den Ergebnissen der Analyse rückwirkend berechnet wird. Die Konstante beschreibt die Voreinstellung der Probanden bei der Befragung, indem von den errechneten Gesamtnutzen die Teilnutzen, also die Einflüsse der Merkmalausprägungen, abgezogen werden. Der Wert der Konstante liegt auf der Bewertungsskala zwischen den Extrema 1 und 6. Für die Realitätswirkung beträgt die ermittelte Konstante 2,849, für die Kaufentscheidung 2,833. Die errechneten Teilnutzenwerte der Ausprägungen ergänzen die Konstante zum Gesamtnutzen. Dabei gibt die Spannweite der Teilnutzenwerte, also die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Teilnutzenwert eines Merkmals, die Größe des Einflusses auf den Gesamtnutzen an. Aus der Spannweite der Teilnutzenwerte kann die relative Wichtigkeit der jeweiligen Merkmale berechnet werden. Hierbei ist zu beachten, dass durch die zwei Fragen (Realitätswirkung und Unterstützung bei Kaufentscheidung) zwei Ergebniskollektive entstanden sind.

Die Wichtigkeiten sind relativ, das bedeutet alle acht Merkmalwichtigkeiten addiert ergeben 100%. Eine Gleichverteilung der Wichtigkeiten, wenn also jedes Merkmal die Wichtigkeit 12,5 % besäße, würde bedeuten, dass alle Merkmale gleich wichtig für die Darstellungsgüte sind. Durch die Conjoint-

Analyse werden die Wichtigkeiten der Merkmale, ausgehend vom Basiswert der 12,5%, umverteilt. Hat ein Merkmal einen geringeren Prozentwert, so ist die relative Wichtigkeit des Merkmals, bezogen auf die Darstellungsgüte geringer. Eine Veränderung des Merkmals hätte also weniger Auswirkung auf die Darstellungsgüte als die Veränderung von Merkmalen mit höheren Wichtigkeiten. Ein höherer Prozentwert attestiert dem Merkmal eine höhere relative Wichtigkeit und somit einen größeren Einfluss auf die Darstellungsgüte bei Variation des Merkmals. Die relativen Wichtigkeiten der Merkmale sowie deren Veränderung im Vergleich zum Ausgangswert von 12,5 % sind in *Bild 4* dargestellt.

Für beide Untersuchungen stellt sich heraus, dass das Merkmal Form mit der Ausprägung „detailliert“ den höchsten Teilnutzenwert (0,516 für Realität bzw. 0,311 für Kaufentscheidung) besitzt. Aus der Spannweite des Merkmals Form ergibt sich somit die relative Wichtigkeit von etwa 34 % bzw. etwa 30,5 %. Den zweithöchsten Teilnutzenwert hat das Vorhandensein einer Grafik (0,373 bzw. 0,286) woraus sich für das Merkmal Grafik eine relative Wichtigkeit von jeweils etwa 15 % ergibt.

Bei der Frage nach der Realitätswirkung haben alle weiteren Merkmale eine ähnliche, relative Wichtigkeit zwischen 6,5 % und 10 %. Bezogen auf die Frage nach der Unterstützung beim Treffen einer Kaufentscheidung fällt auf, dass die Räumlichkeit eine höhere relative Wichtigkeit (rund 12,3 %) einnimmt, als bei der Realitätswirkung. Alle weiteren Merkmale liegen auch hier zwischen rund 8 % und rund 9,5 %.

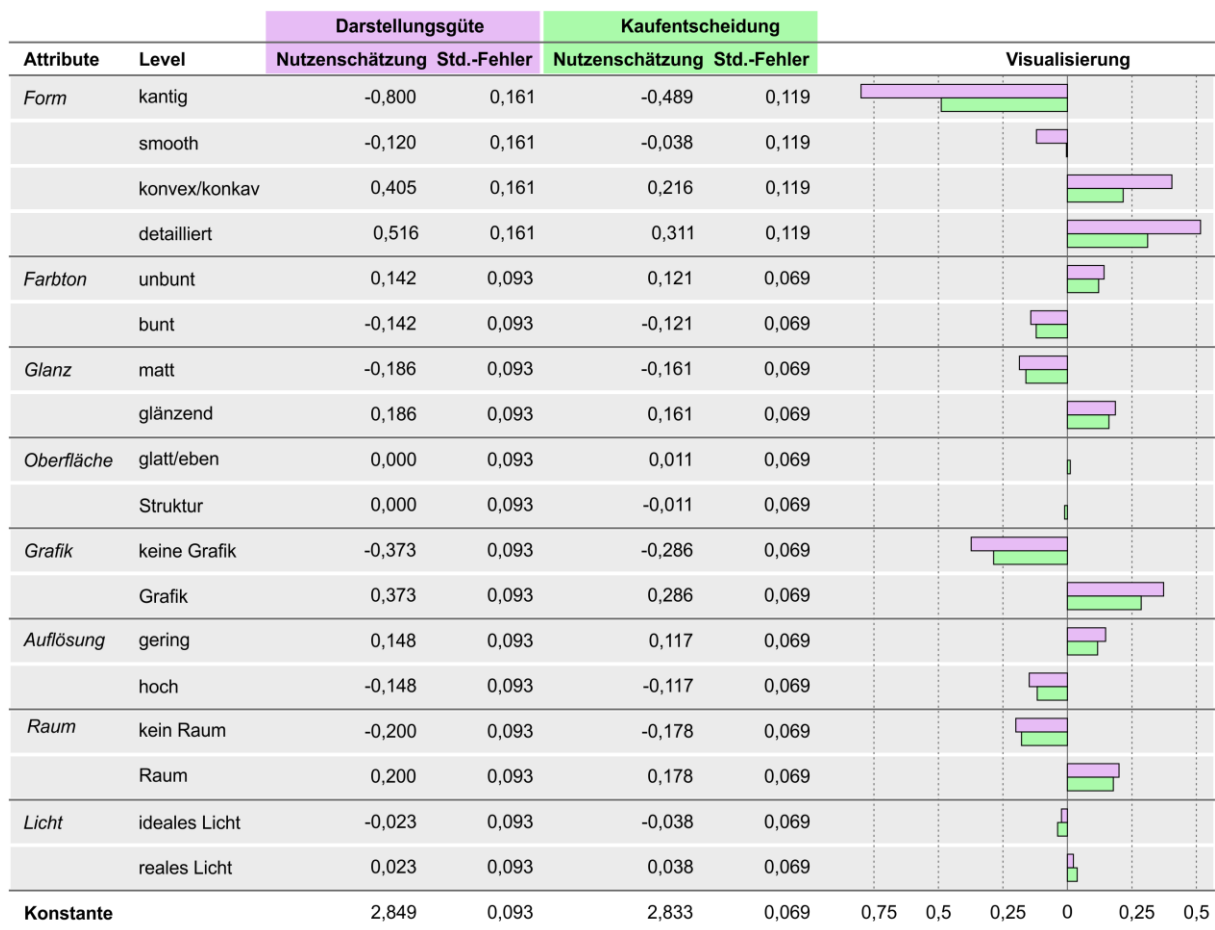


Bild 3: Ergebnisse der Conjoint-Analyse

Attribute	Darstellungsgüte			Kaufentscheidung		
	Wichtigkeit	Delta zu Durchschnitt		Wichtigkeit	Delta zu Durchschnitt	
Form	34,025	21,525		30,461	17,961	
Farbton	8,286	-4,214		7,960	-4,54	
Glanz	9,528	-2,972		9,471	-3,029	
Oberfläche	7,356	-5,144		8,395	-4,105	
Grafik	15,154	2,654		14,929	2,429	
Auflösung	9,229	-3,271		8,372	-4,128	
Raum	9,889	-2,611		12,330	-0,17	
Licht	6,534	-5,966		8,083	-4,417	
			12,5 %			12,5 %

Bild 4: Wichtigkeiten der Merkmale

5.3 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass es durchaus Unterschiede hinsichtlich des Einflusses verschiedener Merkmale auf die Darstellungsgüte gibt. Anhand der Ergebnisse kann abgeleitet werden, welche Merkmale relevant für eine Variation sein können, um die Darstellungsgüte auf die nötigen Level anzupassen. Da hierdurch der Ressourceneinsatz gesteuert werden kann, wird eine Effizienzsteigerung der Produktvisualisierung unterstützt.

Die Ausgangswerte der Konstante, welche nahe 2,8 liegen, diagnostizieren eine grundsätzlich etwas negativere Voreinstellung der Probanden, verglichen mit der benannten Skala von 1 („stimme nicht zu“/„nein“) bis 6 („stimme zu“/„ja“). Die Konstante wird durch die Merkmale unterschiedlich stark ergänzt. Dabei gilt, je höher die Spannweite zwischen den Teilnutzwerten der Ausprägungen, desto größer der Einfluss des Merkmals auf den Gesamtnutzen. Je größer der Einfluss des Merkmals, also je höher die relative Wichtigkeit, desto mehr Veränderung tritt im Hinblick auf die Darstellungsgüte auf, wenn das Merkmal variiert wird. Vor allem die Teilgestalten Form und Grafik weisen somit einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Darstellungsgüte auf. Als Grund hierfür kann in Betracht gezogen werden, dass diese beiden Merkmale in den Reizmusterdarstellungen visuell gut erkennbare Unterschiede zeigten. Jedoch ist dem zu entgegensetzen, dass beispielsweise auch die Ausprägungen des Farbtons, der Oberflächenstruktur oder die Präsenz der räumlichen Umgebung deutlich zu unterscheiden waren. Die Ausprägungen der Form repräsentieren zeitgleich auch den Detaillierungsgrad des Produktmodells. Eine ausgeprägtere Form ist somit etwa gleichbedeutend mit einer höheren Detaillierung der Produktdarstellung. In diesem Fall war eine große Relevanz der Formgestalt bereits im Voraus zu erwarten. Bei Oberfläche und Licht haben die Teilnutzenwerte aller Ausprägungen einen Wert nahe Null. Es ist davon auszugehen, dass Variationen dieser Merkmale keinen relevanten Einfluss auf die Darstellungsgüte aufweisen. Ein vermutlich zu erwartender, großer Einfluss der Farbe, kann anhand der Ergebnisse nicht gezeigt werden. Das könnte an der Aufspaltung der Teilgestalt Farbe zu den Merkmalen Farbton, Glanz und Oberfläche liegen. Die Summe der Einzelmerkmale, die die Teilgestalt Farbe abbilden, hätte ggf. einen anderen Einfluss. Jedoch ist diese Aufspaltung nötig, da eine Variation der Farbe durch verschiedene Variationen, der differenzierten Merkmale bedingt ist.

Die Studienergebnisse zeigen außerdem, dass der ganzheitliche Ansatz aus der Kombination von Teilgestalten und Visualisierungsaspekte für die resultierende Darstellungsgüte sinnvoll gewählt ist. Angesichts der Bedeutung der Teilgestalt Form wird deutlich, dass Visualisierungsaspekte alleine von den Studienteilnehmern nicht als wichtigste Faktoren der Darstellungsgüte aber auch der Kaufentscheidung dienen.

Im Hinblick auf die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist anzumerken, dass die Reizmusterdarstellungen in der Befragung nur in eingeschränkter Bildgröße zu sehen waren. Vor dem Hintergrund des großen

Anteils an Studienteilnahmen via Smartphone (ca. 62 %), kann ein Detailverlust in den Darstellungen nicht ausgeschlossen werden.

Zudem besteht die Möglichkeit, dass durch die Auswahl von den genannten Merkmalen und dadurch die Beschränkung der Befragung auf diese Auswahl, mögliche andere einflussrelevante Merkmale nicht betrachtet wurden. Es ist zu untersuchen, ob die getroffene Auswahl an Merkmalen einen Anspruch auf Vollständigkeit an einflussrelevanten Faktoren erheben darf oder ob weitere Merkmale einen sichtbaren Einfluss auf die Darstellungsgüte aufweisen.

Das Probandenkollektiv liefert in der angegebenen Zusammensetzung bereits erste brauchbare Tendenzen für den Einfluss der gewählten Merkmale auf die Darstellungsgüte. Um die Aussagekraft der Ergebnisse für die Produktentwicklung weiter zu erhöhen, wäre eine erneute Befragung in anderer Umgebung hilfreich. Eine gezielte Befragung von Designern und Produktentwicklern, z. B. in der Automobilproduktion, würde die Belastbarkeit der Ergebnisse weiter stärken. Zudem ist die Übertragbarkeit auf ein Produkt im Außenbereich, bspw. ein Fahrzeug im Freien, zu überprüfen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Methode ist es, eine verlässliche Aussage über die notwendige Darstellungsgüte von Produktvisualisierungen treffen zu können. Der methodische Ansatz und die Studienergebnisse zeigen eindrücklich, dass die relative Wichtigkeit einzelner Merkmale im Hinblick auf die resultierende Darstellungsgüte beschreibbar ist. Somit ist es grundsätzlich möglich, eine hohe Darstellungsgüte über die gezielte Ausprägung der Teilgestalten und die Festlegung von Visualisierungseigenschaften effizient zu erreichen.

Wird die Darstellungsgüte im Kontext des Fortschritts der Designentwicklung ermittelt, kann abgeschätzt werden, welche Darstellungsgüte wann notwendig und zielführend ist. Dabei können im Weiteren vermeidbare Ressourcen eingespart werden. Denn wenn die nötige Darstellungsgüte bekannt ist, kann entschieden werden, welche im Unternehmen vorhandene Technologie sich am besten für die jeweilige Visualisierung eignet. Somit kann abgeschätzt werden, welcher Aufwand und welche finanziellen Mittel nötig sind. Dies kann beispielsweise beim Einsatz virtueller Visualisierungsmethoden wie AR und VR helfen, die am besten geeignete Technologie sowie die nötigen Parameter wählen zu können, um dadurch fundierte Entscheidungen treffen zu können.

Die Umsetzbarkeit der benötigten Darstellungsgüte mit verschiedenen Visualisierungstechnologien ist im Weiteren zu untersuchen. Erkenntnisse daraus sind mit den Möglichkeiten der Entwicklung abzugleichen. Zudem sollte betrachtet werden, ob sich weitere Merkmale für die Beschreibung der Darstellungsgüte qualifizieren. In diesem Fall sind die Teilnutzenwerte und die damit verbundenen Einflüsse der Merkmale zu verfeinern. Interessant wäre hierbei, ob sich die Bedeutung von Form und Grafik gegenüber weiteren Merkmalen auf dem hohen Niveau halten kann, oder ob die relative Wichtigkeit abnimmt. Bei einer erneuten Betrachtung könnte zudem die Frage nach der Kaufentscheidung, aufgrund der Vielfalt der Einflussfaktoren auf selbige, durch ein Gefallensurteil, bspw. nach Holder (2016) ersetzt werden.

Literatur

Baier und Bruschi 2021

BAIER, Daniel; BRUSCHI, Michael: Konstruktion von Erhebungsdesigns bei der Conjointanalyse. In: Conjointanalyse : Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2021, S. 95–116

Baltes-Götz 2006

BALTES-GÖTZ, Bernhard: Conjoint-Analyse mit SPSS. URL: <https://www.uni-trier.de/fileadmin/urt/doku/conjoint/conjoint.pdf> – Überprüfungsdatum 18.01.2023

- Ehrlenspiel und Meerkamm 2017
 EHRENSPIEL, Klaus; MEERKAMM, Harald: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Wien: Hanser, 2017
- Holder 2016
 HOLDER, Daniel: Gefallensurteil und Blickanalyse zum Fahrzeugdesign zukünftiger Aufbaugestalten anhand einer technischen Prognose. Stuttgart, Universität Stuttgart. Dissertation. 2016. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-ds-90623>
- Müller et al. 2005
 MÜLLER, Marco; BÄR, Thomas; WEBER, Christian: Was ist Reifegrad? In: MEERKAMM, Harald (Hrsg.): 16. SYMPOSIUM „DESIGN FOR X“, 2005
- Müller-Hagedorn et al. 1993
 MÜLLER-HAGEDORN, Lothar; SEWING, Eva; TOPOROWSKI, Waldemar: Zur Validität von Conjoint-Analysen. In: Operations research proceedings. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1993 (Papers of the annual meeting of DGOR in cooperation with NSOR, 21), S. 210
- Reid et al. 2013
 REID, Tahira N.; MACDONALD, Erin F.; DU, Ping: Impact of Product Design Representation on Customer Judgment. In: Journal of Mechanical Design 135 (2013), Nr. 9
- Reinhardt 1996
 REINHART, Gunther; LINDEMANN, Udo (Mitarb.); HEINZL, Joachim (Mitarb.): Qualitätsmanagement: Ein Kurs Für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin / Heidelberg, 1996
- Schauppenlehner et al. 2019
 SCHAUPPENLEHNER, Thomas; LUX, Konstantin; GRAF, Christoph: The spatial view: AGIT: Journal für Angewandte Geoinformatik: 5-2019. Berlin : Wichmann, 2019 (Journal für angewandte Geoinformatik 5 (2019))
- Schömann 2011
 SCHÖMANN, Sebastian O.: Produktentwicklung in der Automobilindustrie. Dordrecht: Springer, 2011 (Schriften zur Unternehmensentwicklung)
- Schöner 2014
 SCHÖNER, Hans-Peter: Erprobung und Absicherung im dynamischen Fahrsimulator. In: 17. Kongress SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2014: Berechnung, Prüfstands- und Straßenversuch; Baden-Baden, 18. und 19. November 2014. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2014 (VDI-Berichte, 2224).
- Seeger 2005
 SEEGER, Hartmut: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme: Industrial Design Engineering. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005 (SpringerLink Bücher)
- Straub 2015
 STRAUB, J.: In search of technology readiness level (TRL) 10. Aerospace Science and Technology, 46, 312–320. (2015).
- Straub und Riedel 2006
 STRAUB, Klaus; RIEDEL, Oliver: Virtuelle Absicherung im Produktprozess eines Premium-Automobilherstellers. In: DIETRICH, Lothar; SCHIRRA, Wolfgang (Hrsg.): Innovationen durch IT: Erfolgsbeispiele aus der Praxis; Produkte - Prozesse - Geschäftsmodelle. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 (Xpert.press), S. 189–205
- Ziefle 1998
 ZIEFLE, M.: Effects of display resolution on visual performance. In: Human factors 40 (1998), Nr. 4, S. 554–568
- Zöllner 2015
 ZÖLLNER, Ilka Maria: Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerhaltensvalidität. Darmstadt, 2015

Anpassbare Mensch-Maschine-Schnittstellen zwischen Adaptivität und Individualisierung

Adaptable human-machine-interfaces between adaptivity and individualization

Marcel Racs¹, Daniel Holder¹, Marco Hutter², Thomas, Maier¹, Bernd Gundelsweiler²

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, 70569 Stuttgart
marcel.racs@iktd.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, 70569 Stuttgart
marco.hutter@ikff.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Moderne Produkte werden zunehmend komplexer. Dies wirkt sich insbesondere auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) aus, welche die Funktionsvielfalt abdecken und zugleich eine optimale Nutzung des Produkts ermöglichen soll. Um diese Problematik zu lösen, rücken anpassbare MMS zunehmend in den Fokus. In diesem Beitrag wird das Thema der veränderlichen MMS thematisiert und auf die Hauptausprägungen Adaptivität und Individualisierung eingegangen. Das Ziel ist die Erarbeitung einer Methode, welche die spezifische Veränderlichkeit in technischen Produkten erfassen kann. Dazu wird basierend auf einer Literaturrecherche eine allgemeingültige Beschreibung der physikalischen Eigenschaften und Ausprägungen veränderlicher, technischer Systeme abgeleitet, kategorisiert und durch Bewertungsbereiche ergänzt. Die Methode wird anschließend auf typische adaptive und individualisierbare Produkte angewandt. Daraus lassen sich charakteristische Eigenschaften der beiden Ausprägungen ableiten und Gemeinsamkeiten bzw. Überschneidungen benennen. Abschließend wird die Brücke zu potenziell geeigneten Technologien für veränderliche Systeme hergestellt und deren Bedeutung für diesen Zweck diskutiert.

Keywords (deutsch):

Adaptivität, Individualisierung, Mensch-Maschine-Schnittstelle

Abstract (english): Modern products become increasingly complex. This has a major impact on the human-machine interface (HMI), which is supposed to cover the variety of functions and enable an optimal use of the product at the same time. To address this issue, the focus is shifting increasingly to adaptable HMIs. This paper focuses on the topic of adaptable HMI and discusses the main characteristics of adaptivity and individualization. The objective of the contribution is the development of a method, which is able to identify the specific adaptability in technical products. Based on a literature research, a general definition of the physical attributes and characteristics of adaptable, technical systems is developed, categorized and extended by evaluation criteria. The method is then applied to typical adaptive and individualizable products. This allows to identify typical attributes of the two forms of adaptability and to identify similarities or overlaps. Concluding, the connection to potentially suitable technologies for these adaptable systems is drawn and their significance for this purpose is discussed.

Keywords (english):

Adaptivity, Individualization, Human Machine Interface

1 Motivation

Moderne Produkte müssen anspruchsvolle Anforderungen im Hinblick auf den Leichtbau und die Einsparung von Ressourcen erfüllen und zugleich steigenden Anforderungen hinsichtlich ihrer Anpassbarkeit an verschiedene Bediensituationen sowie dem Wunsch nach Individualisierung nachkommen [Bein et al. 2008]. Dabei werden die Produkte branchenübergreifend durch eine wachsende Funktionsvielfalt zunehmend komplexer [Schmid und Maier 2017]. Dies wirkt sich insbesondere auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) aus, da diese die Bedienung der Funktionsvielfalt abdecken und gleichzeitig eine hohe Usability und eine intuitive Nutzung des Produkts ermöglichen soll [Kaufmann et al. 2020]. Der Wunsch nach Interfacesystemen, die sich unterschiedlichen und wechselnden Randbedingungen optimal anpassen können, kann durch konventionelle, passive Systeme und mechatronische Systeme nur bedingt erfüllt werden. In anpassbaren und intelligenten Strukturen wird ein hohes Potenzial gesehen, um die steigenden Anforderungen an die MMS zu bewältigen, welche durch neuartige Materialien, moderne Fertigungstechnologien, wie der additiven Fertigung, sowie durch multifunktionale Aktorikelemente erfüllt werden können [Hein 2021], [Bein et al. 2008]. Dadurch entstehen Potenziale, MMS von komplexen Produkten optimal an die unterschiedlichen und teilweise wechselnden Bedienaufgaben und Nutzerbedürfnisse zu adaptieren, sodass letztlich durch diese anpassbaren Bedienelemente eine hohe Usability erzeugt werden kann [Reichelt et al. 2021]. Die Usability oder auch Gebrauchstauglichkeit beschreibt hierbei die Qualität einer MMS, bei der eine effektive, effiziente und zufriedenstellende Bedienung durch einen Nutzer innerhalb eines Bedienszenarios (BSZ) angestrebt wird [DIN EN ISO 9241-11 2017]. Neben einer Verbesserung des Nutzererlebnisses bieten veränderliche Systeme diverse Einsatzzwecke, wie die Möglichkeit, Produktlebenszyklen zu verlängern, größere Nutzergruppen hinzu zu gewinnen oder auf nutzerspezifische Wünsche einzugehen [Oestreich et al. 2023]. Anpassbare Bediensysteme können dabei den kognitiven Re- und Dekodierungsaufwand durch die vom Nutzer visuell und haptisch wahrgenommenen Informationen über den Systemzustand reduzieren und dadurch zu einer schnelleren Erkenntnis der notwendigen Interaktionen mit dem Bediensystem beitragen [Petrov 2012]. Durch die optimierte Anpassung des veränderlichen Bediensystems auf den Bedienkontext sind außerdem kürzere Reaktionszeiten und eine höhere Genauigkeit bzw. eine geringere Fehleranfälligkeit bei der Bedienung zu erwarten [Petrov 2012], [Oestreich et al. 2023].

Es werden im Kontext der MMS sowohl bei der Adaptivität als auch bei der Individualisierung die Nutzeranforderungen hoch priorisiert [Kaufmann et al. 2020]. In Summe steht eine optimierte Anpassung des Bediensystems an die veränderlichen Bedienaufgaben und die individuellen Merkmale und Neigungen der Nutzer im Fokus, welche mittels der Adaptivität und Individualisierung der MMS eine Lösung für die hohe abzubildende Funktionsvielfalt bieten [Kaufmann et al. 2020]. Allerdings fokussieren beide Anpassungsarten durchaus unterschiedliche Aspekte: Die Adaptivität ermöglicht schnelle Anpassungen z. B. an die Aufgabe, die Individualisierung gewährt Anpassungen an unterschiedliche Nutzer, wobei sich beide Anpassungsarten ergonomisch, funktional und technologisch beeinflussen und daher auch in manchen Anwendungen gleichzeitig vorkommen. Jedoch gibt es keine Untersuchung zu den Faktoren der Veränderlichkeit im Hinblick auf einen systematischen Vergleich der adaptiven und individualisierbaren Systeme. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt daher auf einer vergleichenden Betrachtung der beiden Ausprägungen Adaptivität und Individualisierbarkeit, welche für die nutzerzentrierte Auslegung adaptiver und individualisierter MMS elementar ist. Das Ziel ist es, die charakteristischen Faktoren der beiden veränderlichen Systeme herauszuarbeiten und darauf aufbauend Hinweise für zukünftige veränderliche Systeme zu geben. Der Beitrag schließt daher mit einem Abgleich der Analyseergebnisse mit den technologischen Möglichkeiten im Hinblick auf sich verändernde Systeme im Kontext der MMS.

2 Adaptivität und Individualisierung im Kontext der MMS

In diesem Abschnitt wird auf die Veränderlichkeit oder auch Anpassbarkeit von Systemen im Kontext der Mensch-Maschine-Schnittstelle eingegangen und dabei der Schwerpunkt auf deren Hauptausprägungen in Form von Adaptivität und Individualisierung gelegt.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen der Adaptivität [Hein 2021]. Grundsätzlich kann diese als die Fähigkeit eines Systems beschrieben werden, sich selbstständig auf eine Aufgabe sowie den Nutzer einzustellen [Reichelt et al. [2021]. Eingrenzend mit dem gesetzten Schwerpunkt bezüglich der MMS kann die Adaptivität nach Kaufmann et al. [2020] beschrieben werden, als die Fähigkeit der anpassbaren Bedienelemente kontextabhängig vielfältige Funktionen auszuführen sowie die Funktionsvielfalt des Systems optimiert durch die MMS abzubilden. Nach Reichelt et al. [2021] kann die Adaptivität weiterhin in passive, aktive oder smarte Anpassung sowie in die systeminitiierte oder nutzerinitiierte Aktivierung unterschieden werden. Für die Adaptivität gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen mit dem Ziel, eine MMS optimal an (wechselnde) Bedienungsaufgaben anpassen zu können. Dazu zählen u. a. die Stellgrößen Position, Verfügbarkeit, Darstellung, Bedienkräfte, Geometrie, Bedientyp oder Bedientechnologie [Racs et al. 2022], [Hein 2021], [Janny 2018]. Außerdem werden der Einfluss der Bedienungsaufgabe bzw. deren Komplexität, der Nutzereinfluss und insbesondere dessen Alter sowie die Bedienungshäufigkeit in Form des Anteils der Routine- und Nicht-Routineaufgaben als relevante Faktoren bei der Gestaltung adaptiver Schnittstellen genannt [Kobsa et al. 2001], [Lavie und Meyer 2010]. Lavie und Meyer [2010] befassen sich mit den grundlegenden Vorteilen aber auch den Nachteilen von veränderlichen Systemen und weisen darauf hin, dass Adaptivität in komplexen und wechselnden Situationen vorteilhaft sein kann aber nicht per se in jeder Situation zu Vorteilen führt. Es wurde gezeigt, dass die Faktoren Bedienungshäufigkeit, Alter des Nutzers und Schwierigkeitsgrad der Aufgabe großen Einfluss haben und für entsprechende Anwendungen auch reduzierte Adaptivitätsumfänge sinnvoll sein können [Lavie und Meyer 2010]. Kühme [1993] definiert Adaptivität als die Fähigkeit einer MMS sich auf einen individuellen Nutzer einstellen zu können und beschreibt den Grad der Adaptivität anhand des Umgangs des Systems mit Nutzermodellen. Dabei kann die Adaptivität neben dem Nutzermodell, welches die Informationen und den Umgang mit diesen durch das System beschreibt (Nutzerprofil, Nutzereigenschaften und Vorlieben, Nutzerumgebung bis hin zur Nutzerüberwachung) auch über die Art der Initiierung beschrieben werden, also Nutzer-, Systemseitig oder automatisiert [Debevc et al. 1996], [Kühme 1993], [Lacoche et al. 2019], [Brauner et al. 2023].

Auch die Individualisierung, Personalisierung und die Anpassbarkeit an bzw. durch den Nutzer spielen im Kontext der MMS zunehmend eine wichtige Rolle [Reichelt et al. 2021]. Hierbei steht die Anpassbarkeit des Systems auf die individuellen Fähigkeiten und Vorlieben des Nutzers im Vordergrund [DIN EN ISO 9241-129 2011]. Es können Unterscheidungen hinsichtlich der Individualisierung an die Anatomie (anthropomorphe Gestalt), den Bedienkontext oder die Psychografie des Nutzers gemacht werden, welche wiederum hardware- oder softwareseitig realisiert werden können [Reichelt et al. 2021]. Oestreich et al. [2023] setzt für ein individualisierendes System voraus, dass sich dieses an die wechselnden Anforderungen und Fähigkeiten des Nutzers anpasst und dabei gleichzeitig den Bezug zur eigentlichen Bedienungsaufgabe erhält. Der Umfang der Individualisierung kann durch einen Bereich beschrieben werden, der sich von der diskreten bis hin zur parametrischen Auswahl von Gestaltungsmerkmalen aufspannt, die sich wiederum jeweils im Bereich von definierten Alternativen, Wertebereichen, definierten oder allgemeinen Freiräumen bewegen [Baumberger 2007]. Baumberger [2007] nutzt für seine Einordnung der Beschreibung individualisierter Produkte die grundlegende Differenzierung nach gestalterischer Anpassung, struktureller Anpassung und funktionaler Anpassung.

Petrov [2012] beschreibt adaptive Bedienelemente durch ihre Anpassungsfähigkeit in Bezug zu den Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche in Bezug zum veränderlichen Kontext der Bedienung. Für die nachfolgende Methodik wird die erweiterte Definition nach Holder [2016] gewählt, um (Bedien-)Systeme hinsichtlich der Teilgestalten Aufbau, Form, Farbe und Oberfläche sowie Grafik zu unterteilen.

Zusammengefasst zeichnen sich die beiden Ausprägungen Adaptivität und Individualisierung weniger durch eine klare Trennschärfe aus, sondern weisen inhaltlich tendenziell einen fließenden Übergang

auf. Dennoch können klare Schwerpunkte ausgemacht werden, sodass diese wie folgt beschrieben werden können. Die Adaptivität beschreibt vornehmlich die Anpassung an die Aufgabe, wohingegen die Individualisierung die Anpassung an den Nutzer beschreibt. In dieser Arbeit wird in den nachfolgenden Kapiteln eine weitere Präzisierung vorgenommen, indem charakteristische Faktoren, welche die Veränderlichkeit beschreiben, identifiziert und anhand definierter Use Cases mit den beiden Merkmalen abgeglichen werden.

3 Methodischer Ansatz

Im Rahmen dieser Arbeit soll geklärt werden, wie veränderliche Bediensysteme grundsätzlich beschrieben und anschließend anhand der beiden Hauptausprägungen der „Adaptivität“ und der „Individualisierbarkeit“ charakterisiert werden können. In Bild 1 ist beispielhaft das Vorgehen in der nachfolgend beschriebenen Methode zu sehen. Hauptgegenstand der Untersuchung ist die veränderliche MMS technischer Systeme. Es werden allerdings alle relevanten, damit gekoppelten veränderlichen Faktoren innerhalb des Gesamtsystems in die Betrachtung miteinbezogen (Bild 1, mittlerer, bunter Bereich). Die Lösung soll dazu dienen, bestehende Bediensysteme bezüglich ihrer Veränderlichkeit sowie bezüglich ihres Grades der Adaptivität bzw. Individualisierung bewerten zu können (Bild 1, oberer Bereich). Neben einer reinen Bewertung vorhandener Bediensysteme, soll die erarbeitete Methode sowohl bei der Überarbeitung bestehender Lösungen, als auch bei der Gestaltung neuer Bediensysteme herangezogen werden können, um von vornherein alle Potenziale hinsichtlich der Veränderlichkeit und deren spezifischer Stellgrößen für das jeweils betrachtete Produkt aufzudecken. Der Bezug zu der technologischen Umsetzung (Bild 1 unterer Bereich) wird abschließend in Kapitel 5 beschrieben.

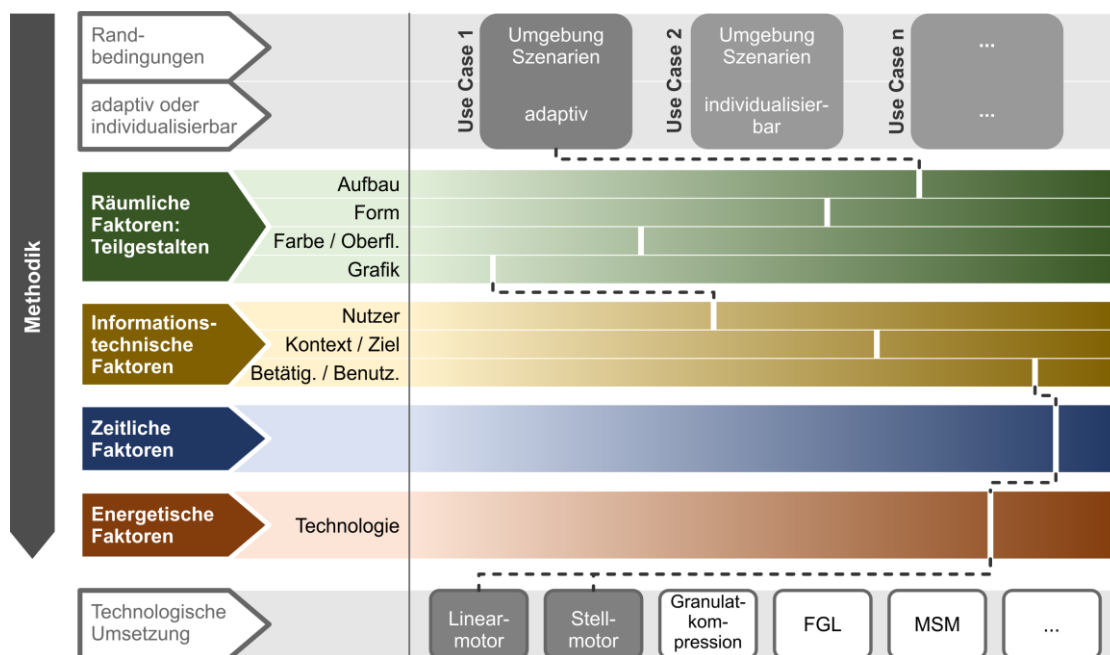


Bild 1: Schematische Darstellung von Adaptivität und Individualisierbarkeit im Kontext der Nutzerschnittstelle

Der erste Schritt besteht darin, zunächst das veränderliche Bediensystem verallgemeinert durch die Ermittlung verschiedener Parameter und Definitionen zu beschreiben. Die Veränderlichkeit muss dabei möglichst ganzheitlich und in all seinen Ausprägungen beschrieben werden, um später möglichst umfassend auf verschiedene MMS angewendet werden zu können. Dazu wurde in der ersten Phase eine Literaturrecherche durchgeführt sowie das Expertenwissen am Institut durch die zahlreichen bearbeiteten Projekte zu adaptiven und individuellen Bediensystemen kondensiert, um dadurch möglichst aussagekräftige, beschreibende Faktoren für veränderliche technische Systeme zu erfassen. Bei

der Datenerfassung bzw. dem Aufstellen der Parameter wurde bewusst keine Unterscheidung zwischen den zuvor beschriebenen Hauptausprägungen (Adaptivität/Individualisierung) gemacht und die erfassten Beschreibungen und Stellgrößen wurden abschließend abstrahiert und teilweise aggregiert. Dadurch wird eine allgemeingültige Beschreibung der physikalischen Eigenschaften und Ausprägungen eines beliebigen veränderlichen technischen Systems möglich. Es wurden insgesamt 35 Parameter bzw. Merkmale identifiziert, welche die unterschiedlichen Anpassungsmöglichkeiten des Systems (wie bspw. die Art der Anpassung oder die Veränderlichkeit bezüglich der Position, Anordnung und Lage) oder verschiedene Charakteristiken eines veränderlichen Systems beschreiben (wie bspw. die Informationsdichte im betrachteten Bediensystem). Die einzelnen identifizierten Parameter wurden jeweils neutral formuliert, sodass individuell für jeden Parameter ein vierstufiger Bewertungsbereich definiert werden konnte. Dieser bildet die verschiedenen Ausprägungen ab, welche ein veränderliches System innerhalb dieses Parameters annehmen kann (siehe Tabelle 1). Im Rahmen dieses Beitrages kann aus Platzgründen nicht jeder individuelle Bewertungsbereich für jeden Parameter beschrieben werden, daher wird dieser nur auszugsweise in Tabelle 1 erklärt. Die gezeigten Parameter beschreiben das entsprechende Merkmal der Veränderlichkeit des Systems und beschreiben durch den vierstufigen Bewertungsbereich die Grenzen, innerhalb dessen sich das entsprechende anpassbare Merkmal in Bezug zur MMS bewegen kann. Am Beispiel des Parameters „Art der Anpassung“ zeigen die vier Stufen: keine Anpassung, passive Struktur („manuelle“ Verstellung ohne Unterstützung bzw. Steuerung durch das System), aktive Struktur (systemunterstützt, bspw. durch hinterlegte Profile) oder smarte Anpassung (automatische bzw. sensorgestützte systemseitige Anpassung). Der Bewertungsbereich wird in Tabelle 2 in den Spalten „Bewertung“ aufgegriffen und die vierstufige Bewertung wird durch die Zahlen 1 bis 4 innerhalb der Bewertung der Use Cases abgebildet.

Tabelle 1: Auszug der Definitionen des vierstufigen Bewertungsbereichs für die Einzelparameter

Parameter	Bewertungsbereich			
	1	2	3	4
Art der Anpassung	keine Anpassung	passive Struktur	aktive Struktur	smarte Anpassung
Freiheitsgrade der Anpassung	(diskrete) Auswahl zwischen verschiedenen Alternativen	parametrische Anpassung innerhalb definierter Wertebereiche	freie bzw. individuelle Anpassung innerhalb definierter Freiräume	freie bzw. individuelle Anpassung innerhalb allg. Freiräume
Veränderlichkeit der Modalität	keine Anpassung	veränderliche Anzeige von (kontextbezogenen) Anweisungen und Inhalten	(veränderliche) Interaktion durch verschiedene Modalitäten	multimodale Bedienung mit diversen Eingabe- bzw. Interaktionsmöglichkeiten

Anschließend wurden die Parameter sortiert und systematisch in verschiedene Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 2). Die Kategorisierung zielt hierbei ebenfalls auf eine möglichst vollständige Beschreibung ab, mit den übergeordneten Größen: räumliche, informationstechnische, zeitliche und energetische Faktoren. Die räumlichen Faktoren werden wie zuvor bereits beschrieben in die Teilgestalten Aufbau, Form, Farbe mit Oberfläche und Grafik unterteilt. Im Zusammenhang der veränderlichen MMS spiegelt der Aufbau hierbei Änderungen wider, welche vornehmlich die Gesamtstruktur betreffen, wohingegen sich die Form vornehmlich auf die Veränderlichkeit einzelner Elemente bezieht. Die Unterteilung in die Teilgestalten bietet später den Vorteil alle Bereiche des jeweils betrachteten Systems einzeln auf die verschiedenen veränderlichen Merkmale hin untersuchen zu können. Da einige Merkmale je Teilgestalt auftreten, tauchen einige Parameter in Tabelle 2 sowohl bei Aufbau, Form als auch bei Farbe und Oberfläche auf, beschreiben aber jeweils unterschiedliche Merkmale innerhalb des veränderlichen Bediensystems. Die einzelnen Parameter und deren Oberkategorien werden aus Platzgründen nicht näher erläutert, erschließen sich aber aus dem Zusammenhang von Tabelle 2 sowie dem beschriebenen Bewertungsbereich aus Tabelle 1.

Im nächsten Schritt wird die erarbeitete Bewertungsmethode nun angewendet, um einige Use Cases bezüglich ihrer Veränderlichkeit zu bewerten. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit hat sich aus Sicht

der Autoren dabei gezeigt, dass wenige auf dem Markt verfügbare MMS technischer Systeme existieren, die nach der getroffenen Definition als hoch individualisierbar und/oder hoch adaptiv charakterisiert werden können, wobei der Begriff „hoch“ adaptiv sich auf eine möglichst vielfältige und tiefgreifende Veränderlichkeit nach Tabelle 2 bezieht. Deshalb wird für die Auswahl der Use Cases teils auf den aktuellen Stand der Forschung zurückgegriffen und aufgrund der tiefen Kenntnisse und der damit einhergehenden besseren Bewertbarkeit die aktuell am Institut laufenden Forschungsprojekte fokussiert. Bei den Use Cases handelt es sich um das abgeschlossene Forschungsprojekt „aISA“ zu einer prototypischen, hoch adaptiven Interfacelösung der Bedienarmlehne von Ackerschleppern [Kaufmann et al. 2020] und das aktuell laufende Forschungsprojekt „aISA 2.0“ [Racs et al. 2022], welches das vorangegangene Projekt aISA weiterentwickelt. Außerdem wird das aktuelle DFG-Projekt „aHa“ (DFG 452009430) betrachtet, welches einen adaptiven Handgriff entwickelt, der sich an Bediensituationen sowie hoch individualisierbar an die Form jeder Hand anpassen kann [Kießling 2022]. Weiterhin wird der individualisierbare Handgriff für Fahrräder des Start-Up-Unternehmens „Personomic“ betrachtet.

Tabelle 2: Parameterdefinition veränderlicher Systeme sowie Bewertung beispielhafter Use Cases

Parameter	Erklärungen	Quellen	Bewertung				
			aSIA 2.0	aSIA	CAS	aHa	Personomic
Räumliche Faktoren: Teilgestalten							
Aufbau			<i>Durchschnittswert:</i>				
			3,2	3	3,2	2	1
Art der Anpassung	mögliche Arten z. B.: passiv, aktiv, smart	[Hein 2021], [Reichelt et al. 2021]	4	4	4	2	1
Grad der Anpassung		[Baumberger 2007]	3	3	4	2	1
Freiheitsgrade der Anpassung			2	1	3	2	1
Geometrische Auswirkung der Veränderung	Gesamtmaße / äußere Maße	[Baumberger 2007], [Hein 2021]	3	3	1	2	1
Veränderlichkeit von Position, Anordnung, Lage	Veränderung der Gesamtstruktur	[Kaufmann et al. 2020], [Baumberger 2007], [Petrov 2012]	4	4	4	2	1
Form			<i>Durchschnittswert:</i>				
			3,2	2,5	1,7	3,3	1,8
Art der Anpassung	mögliche Arten z. B.: passiv, aktiv, smart	[Hein 2021], [Reichelt et al. 2021]	4	4	2	4	2
Grad der Anpassung		[Baumberger 2007]	4	3	2	4	3
Freiheitsgrade der Anpassung			2	1	2	3	1
Geometrische Auswirkung der Veränderung	(einzelne) Elemente	[Janny 2018], [Baumberger 2007], [Petrov 2012]	1	1	1	4	2
Veränderlichkeit der Position, Anordnung und Lage	Veränderung von Elementen	[Kaufmann et al. 2020], [Baumberger 2007], [Petrov 2012]	4	3	1	1	1
Anzahl veränderlicher Elemente			4	3	2	4	2
Farbe und Oberfläche			<i>Durchschnittswert:</i>				
			2,8	2,7	1,8	1,8	2,3
Art der Anpassung	mögliche Arten z. B.: passiv, aktiv, smart	[Hein 2021], [Reichelt et al. 2021]	4	4	2	2	2
Grad der Anpassung		[Baumberger 2007]	4	4	2	1	3
Freiheitsgrade der Anpassung			3	2	2	1	2
Wahrnehmbare Veränderlichkeit des Werkstoffs / Werkstoffeigenschaften	Festigkeit, Reibbeiwert, Leiftähigkeit, elastische Deformation, etc.	[Baumberger 2007], [Hein 2021]	1	1	2	4	2
Veränderlichkeit der Oberfläche & Textur			1	1	2	2	2
Veränderlichkeit der Farbe			4	4	1	1	3
Grafik			<i>Durchschnittswert:</i>				
			4	4	1	1	3
Veränderlichkeit der Grafik / Darstellung		[Kaufmann et al. 2020]	4	4	1	1	3

Parameter	Erklärungen	Quellen	Bewertung				
			aSIA 2.0	aSIA	CAS	aHa	Personomic
Informationstechnische Faktoren							
Nutzerabhängige Faktoren			<i>Durchschnittswert:</i> 3 2,7 2,3 2,7 2,3				
Aufgaben des Nutzers bei der Veränderung		[Reichelt et al. 2021], [Oestrich et al. 2023], [Debevc et al. 1996], [Kühme 1993], [Lacoche et al. 2019]	3	3	4	3	2
Berücksichtigung des Nutzer bei der Anpassung	Anatomie, Psychografie, etc.	[Lavie und Meyer 2010], [Schmid und Maier 2017]	3	2	2	4	4
Veränderlichkeit der Modalität		[Oestrich et al. 2023], [Kaufmann et al. 2020],	3	3	1	1	1
Kontext bzw. Ziel der Anpassung			<i>Durchschnittswert:</i> 3 3 3 3 1				
Anwendungsbezogene Anpassung		[Lavie und Meyer 2010] , [Kühme 1993], [Lacoche et al. 2019], [Debevc et al. 1996]	3	3	3	3	1
Betätigung und Benutzung			<i>Durchschnittswert:</i> 3,7 3 2,3 1,7 1				
Vielfalt der Bedienmodi	vgl. Spreizung bei Komfortmodus	[Kaufmann et al. 2020]	3	3	2	3	1
Bedienkräfte anpassbar	Stufen bzw. Feinheit der Anpassung	[Janny 2018]	4	2	4	1	1
Informationsdichte der veränderlichen Inhalte	Informationsmenge, die durch das veränderliche System vermittelt wird	[Brauner et al. 2023], [Petrov 2012]	4	4	1	1	1
Zeitliche Faktoren							
			<i>Durchschnittswert:</i> 3,5 3,3 4 3,2 2,3				
Häufigkeit der Anpassung	Nutzungshäufigkeit (seltene / häufige Anpassung)	[Kobsa et al. 2001], [Lavie und Meyer 2010]	3	3	4	3	2
Dynamik	dynamische Charakteristik des Systems (von statisch bis dynamisch)	[Oestrich et al. 2023]	2	2	4	2	1
Reaktionszeit	bei (Neu-)Anpassung des Systems	[Hein 2021]	4	4	4	2	1
Zustandsstabilität			4	3	4	4	4
Rückstellbarkeit, Reversibilität			4	4	4	4	2
Genauigkeit	bzgl. der Anpassung auf gewünschtes Ziel, Person, etc.		4	4	4	4	4
Energetische Faktoren							
Technologiebedingte Veränderlichkeit			<i>Durchschnittswert:</i> 2,8 2,3 1,8 1,5 1				
Aktivierungsenergie			3	2	4	2	1
Einsatztemperatur / ertragbare Temperatur		[Hein 2021]	1	1	1	1	1
Veränderlichkeit der Bedientechnologien	z. B. Wechsel von reales auf virtuelles Interface	[Kaufmann et al. 2020], [Brauner et al. 2023]	4	4	1	1	1
Anzahl eingesetzter Technologien	bzgl. der Wirkprinzipien	[Hein 2021]	3	2	1	2	1

Als weiteres Beispiel wird das laufende DFG-Forschungsprojekt zum interaktionsbasierten chirurgischen Armassistenzsystem (CAS) herangezogen (DFG 430136438). Dieses stationäre System hat die Aufgabe, die oberen Extremitäten des Operators während laparoskopischer Eingriffe mechanisch zu unterstützen. Dazu wird der Arm auf anpassbaren Unterarmauflagen entsprechend der vom Nutzer beaufschlagten Kraft unterstützt und folgt den Bewegungen im dreidimensionalen Raum [Langer et al. 2022].

Im letzten Schritt wird die charakteristische Ausprägung der Use Cases in Bezug auf die Adaptivität und Individualisierung festgestellt. Dies wird anhand der Zielsetzung des Bediensystems festgemacht, welche mit der oben getroffenen Grobeinteilung nach der „Anpassung an die Aufgabe“ oder „Anpassung an den Nutzer“ bewertet wird. Konkret bedeutet dies, dass die Veränderlichkeiten von „aISA 2.0“ sowie „aISA“ vordergründig eine starke Anpassung an die Aufgabe beinhalten. Beim „CAS“-Projekt steht die Anpassung an die Aufgabe im Vordergrund, die Komponente der Anpassung an den Nutzer ist jedoch ebenfalls stark ausgeprägt, sodass dieses im mittleren Bereich zwischen den Ausprägungen eingeordnet werden kann. Beim „aHa“-Projekt wird eine Anpassung an verschiedene Anwendungen zwar unterstützt, jedoch vornehmlich als Mittel zum Zweck der optimalen Anpassung an die Nutzer in jeder Situation, sodass hier eine starke Nutzerzentrierung gegeben ist. Der „Personomic“ Fahrradgriff dient abschließend einer reinen Nutzeranpassung ohne Anpassung auf wechselnde Anwendungsfälle. Die genannte Reihenfolge reicht also nach Definition von stark adaptiv über sowohl adaptive als auch individualisierbare Ausprägungen bis hin zu stark individualisierbaren Anwendungen. Diese spiegelt sich von links nach rechts in der Anordnung der Use Cases in Tabelle 2 wieder und dient als Grundlage für den nächsten Schritt.

Im Weiteren werden basierend auf den Use Cases die Zusammenhänge zwischen Adaptivität und Individualisierbarkeit für die jeweiligen Use Cases systematisch und mittels des Expertenwissens des jeweiligen Projektleiters untersucht. Hierbei wird basierend auf den bekannten Use Cases, bei denen herausgearbeitet wurde, ob diese stark adaptiv oder individualisierbar ausgelegt sind, in der Matrix überprüft, wie die Parameter für veränderliche Systeme jeweils zu bewerten sind. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf charakteristische Eigenschaften der beiden Ausprägungen ziehen und Gemeinsamkeiten bzw. Überschneidungen benennen. Bei der Anwendung der Methode muss beachtet werden, dass die Methode bewusst abstrakt gehalten wurde, um auf eine Vielzahl verschiedener MMS angewandt werden zu können. Bei der Anwendung muss daher im ersten Schritt das Produkt zunächst entsprechend der getroffenen Kategorisierung gedanklich in seine Bestandteile und deren Veränderlichkeit unterteilt werden. Nur dadurch können die einzelnen Eigenschaften des Produktes bezüglich ihrer Veränderlichkeit differenziert bewertet werden. Die eigentliche Bewertung der einzelnen Use Cases ist in Tabelle 2 auf der rechten Seite zu sehen und wird in Kapitel 4 diskutiert.

4 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit konnten verschiedene Zielsetzungen erreicht werden. Es wurde eine umfangreiche Erfassung und Kategorisierung von Parametern für eine möglichst vollständige Beschreibung der Veränderlichkeit technischer Systeme durchgeführt. Auf Basis dessen konnte eine Methode zur Bewertung veränderlicher MMS erarbeitet werden. Durch die Anwendung der Bewertungsmethode anhand der Use Cases konnten weiterhin erste Rückschlüsse auf deren Tauglichkeit zur Bewertung realer MMS gezogen werden. Dabei konnte die Methode, die betrachteten Use Cases vollständig abbilden und die wichtigsten Merkmale der Veränderlichkeiten der unterschiedlichen Use Cases treffend beschreiben. Damit wurde für die entwickelte Methode die grundsätzliche Eignung zur Beschreibung hoch adaptiver und hoch individualisierbarer MMS bezüglich deren Veränderlichkeit aufgezeigt. Aufgrund der geringen Anzahl untersuchter MMS sollte dies in weiteren Untersuchungen evaluiert und verfeinert werden. Außerdem muss überprüft werden, wie aussagekräftig die Methode bei MMS mit schwach ausgeprägter Veränderlichkeit ist.

Aus der Analyse in Tabelle 2 kann für die untersuchten Use Cases, basierend auf deren Bewertung und der getroffenen Einordnung hinsichtlich adaptiv oder individualisierbar, ein Trend für die charakteristischen Merkmale adaptiver bzw. individualisierbarer MMS abgeleitet werden. Die angegebenen Durchschnittswerte vermitteln bereits eine gewisse Schwerpunktsetzung unter den Use Cases. So finden sich starke Veränderlichkeiten im Faktor Aufbau vornehmlich in adaptiven Systemen. Dies trifft besonders auf die Merkmale „Art der Anpassung“ und „Veränderlichkeit von Position, Anordnung und Lage“ zu. Bei den räumlichen Faktoren fällt auf, dass Veränderlichkeiten im Aufbau und der Farbe sowie Oberfläche tendenziell adaptiver Natur sind, die Form hingegen stärker den individualisierbaren

Systemen zugeordnet werden kann. Die Grafik ist in beiden Fällen ähnlich veränderlich. Hierbei zeigen einzelne Merkmale ein besonders deutliches Verhalten. Am Beispiel des Faktors Form scheint das Merkmal der „geometrischen Auswirkung der Veränderung“ sehr charakteristisch für individualisierbare Systeme zu stehen. Das Merkmal „Veränderlichkeit von Position, Anordnung und Lage“ steht in der Aufbau- wie Formgestalt eher für adaptive Systeme. Bei den informationstechnischen, zeitlichen und energetischen Faktoren zeigt das stark individualisierte Produkt in fast allen Merkmalen, außer bei der „Berücksichtigung des Nutzers“ und der „Genauigkeit“ eine etwas schwächere Ausprägung. Die adaptiven Produkte zeigen eine starke Ausprägung bei den Merkmalen Informationsdichte, Reaktionszeit und Bedientechnologien. Übergreifend als hoch eingestuft wurde die Rückstellbarkeit bzw. Reversibilität, die Genauigkeit und die Zustandsstabilität. Da die Werte in Summe stark von den Eigenschaften des jeweiligen Anwendungsfalls abhängen, sollten im nächsten Schritt weitere Use Cases betrachtet und mit den gewonnenen Erkenntnissen abgeglichen werden.

Im vorangegangenen Schritt wurde nun aus vorhandenen Bediensystemen mit hochgradiger Veränderlichkeit abgeprüft, wie deren Veränderlichkeit aufgebaut ist und welche Merkmale dafür maßgeblich sind. Im nächsten Schritt kann diese Methode nun auf beliebige technische Systeme angewendet werden, um diese zunächst hinsichtlich ihrer Veränderlichkeit zu analysieren. Danach kann die Analyse mit den bereits untersuchten Schnittstellen abgeglichen werden und je nach gewünschter Zielsetzung für das untersuchte System (stärkere Nutzer- oder stärkere Anwendungsorientierung) abgeleitet werden, welche Merkmale hinsichtlich ihrer Veränderlichkeit bevorzugt auszubauen sind. Dies soll eine zielgerichtete Ideenfindung in den Frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützen. Mit der entwickelten Methode besteht die Möglichkeit veränderliche Systeme von stark adaptiven und individualisierbaren Produkten endlich systematisch zu analysieren und somit eine breite Datenbasis für veränderliche Systeme aufzubauen mit dem Ziel entsprechende Gestaltungsempfehlungen abzuleiten. Dies ist möglich, da die Analyse charakteristische Merkmale anpassbarer Systeme identifiziert und mit charakteristischen Merkmalen anderer Systeme abgleicht, sodass schlussendlich Rückschlüsse für die Neu- oder Weiterentwicklung bestehender Lösungen getroffen werden können. Die Analyse hat außerdem gezeigt, dass der technologische Aspekt als Ideentreiber im Kontext veränderlicher MMS dienen kann. Aus diesem Grund sollten die neuen, technologischen Möglichkeiten möglichst in frühen Phasen bzw. in der Vorentwicklung für veränderliche Bediensysteme betrachtet werden. Gerade neuartige Herstellungsverfahren und smarte Materialien eröffnen ganz neue Freiheitsgrade und vielfältige Möglichkeiten, um die MMS optimal an Nutzer und Aufgabe anzupassen. Daher werden im Folgenden anhand von zwei der untersuchten Use Cases die damit verbundenen Potenziale aufgezeigt. Anschließend wird ein Bezug zu vielversprechenden, technologischen Umsetzungsmöglichkeiten hergestellt und die Eignung von smarten Materialien erläutert und exemplarisch anhand verschiedener formveränderbarer Materialien wie thermisch (FGL) oder magnetisch (MSM) aktivierten Formgedächtnislegierungen diskutiert.

Bei dem Anwendungsbeispiel des Projekts aISA zur adaptiven Gestaltung der Bedienarmlehne in Acker-schleppern [Kaufmann et al. 2020] wurde die vormals größtenteils statische Bedienarmlehne eines Traktors prototypisch hin zu einem hoch adaptiven Bediensystem entwickelt. Hierbei wurden verschiedene Möglichkeiten genutzt, um ein veränderliches System zu erzeugen. Dazu wurden neuartige Bedienelemente entwickelt und teils mit herkömmlichen Technologien kombiniert (bspw. veränderliche Bedienelemente mit Displays, um das Verständnis des Nutzers bezüglich der Veränderlichkeit visuell zu unterstützen). Die veränderlichen Bedienelemente zeichnen sich dadurch aus, dass sie in ihrer Position und Verfügbarkeit veränderlich sind und je nach Bedarf verschiedene Bediencharakteristika an der entsprechenden Stelle auf der Bedienarmlehne verfügbar machen. Die sogenannte adaptive Walzeinheit, eine Aneinanderreihung von rotatorisch beweglichen Bedienelementen sowie der adaptive Joystick, ein Joystick der mit zwei Drehrädern kombiniert wurde und in seiner Position entweder als einzelner Drehsteller, in der Funktion zweier Drehsteller oder auch als Joystick mit zwei Drehstellern fungieren kann, werden dabei durch herkömmliche Stellmotoren betrieben. Zusammengefasst weisen die genannten Bedienelemente diverse Merkmale der Adaptivität auf und ergänzen das bisherige Bediensystem um einige veränderliche Elemente. Die restlichen bzw. die herkömmlichen Bedienele-

mente des Systems wurden in ihrer Anordnung optimiert, weisen ansonsten aber keine Veränderlichkeit auf. Im Zuge des Nachfolgeprojekts aISA 2.0 wird nun auch das Wirkprinzip der „herkömmlichen“ Bedienelemente überarbeitet. An Stelle von typischen Tastern oder Kippschaltern wird basierend auf der neuartigen Technologie von viskositätsveränderlichen Flüssigkeiten die Möglichkeit geschaffen, adaptive Bedienelemente umzusetzen, welche in ihrer Ausprägung (bspw. rastend oder nicht rastend, tastend oder kontinuierlich verstellbar, mit oder ohne Überdruckpunkt, etc.) sowie den Bedienkräften und der Position variabel auf die Bediensituation eingestellt werden können (aktuell prototypischer Stand, siehe [aISA 2.0 2023]). Basierend auf dem neuen Wirkprinzip eröffnen sich neue Möglichkeiten Stellteile umzusetzen, was wiederum neue Anwendungsmöglichkeiten nach sich zieht. Beim Anwendungsbeispiel des adaptiven Handgriffs (siehe [Laßmann et al. 2019] und [Kießling 2022]) wurde im ersten Entwicklungsschritt ein bombierter formvariabler Griff verwendet, welcher es erlaubt, über das Prinzip der Mikromotorik den Durchmesser des gesamten Handgriffs über verstellbare Elemente einer Matrixanordnung auf unterschiedliche Personengrößen anzupassen. Hierbei wird eine Individualisierung auf die jeweilige Hand des Nutzers angestrebt. Diese kann aber nur bedingt erreicht werden, da zwar eine Anpassung auf unterschiedliche Handgrößen aber keine echte Anpassung an die anthropomorphe Form der Hand stattfindet [Laßmann et al. 2019]. In einem nachfolgenden Entwicklungsschritt wurde eine neuartige Technologie eingesetzt, um dieses Problem zu lösen. Der Griff selbst besteht nun aus einem längenverstellbaren Kern, welcher durch eine flexible Hülle umschlossen wird, die mit einem feinen Granulat befüllt ist. Durch die flexible Hülle und die Verschiebung des Granulats beim Umgreifen des Handgriffs passt sich dieser nun exakt der physiologisch bedingten Formgebung der jeweiligen Hand an. Durch Anlegen eines Vakuums verfestigt sich das Granulat und behält diese Form bei. Durch Wegnahme des Vakuums kann der Griff, beispielsweise für unterschiedliche Bedienszenarien wie Drücken, Schieben oder Schwenken wieder verformbar gemacht werden, um nach erneutem Anlegen des Vakuums jeweils die optimale und individuelle Gegenform der Hand für das entsprechende Bedienszenario beim Nutzer zu erzeugen [Kießling et al. 2022]. Hierbei ist durch die Verwendung einer neuartigen Technologie eine weitaus umfassendere Individualisierung gelungen, welche durch ihre Anpassbarkeit an verschiedene Bedienaufgaben eine zusätzliche Adaptivität bietet (siehe dazu den Stand der Forschung von Kießling et al. [2022]).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebenen Auffälligkeiten bezüglich der Möglichkeit zur Weiterentwicklung der adaptiven und individualisierbaren Bediensysteme liegt im Hinblick der genannten Beispiele in den zugrundeliegenden Technologien, welche die Veränderlichkeit erzeugen. Es hat sich gezeigt, dass die im ersten Kapitel genannten Vorteile von veränderlichen Systemen mit aktuellen Technologien erfahrungsgemäß nicht immer bzw. nur bedingt erreichbar sind. Es hat sich auch gezeigt, dass die angestrebten umfänglichen bzw. vielfältigen Veränderlichkeiten von vorhandenen Systemen zumindest teilweise durch neuartige Technologien erreicht werden können. Um bestehende Lösungen zu verbessern aber auch um weitere Anwendungen oder neuartige Lösungen zu finden sollten daher die technologischen Entwicklungs- und Umsetzungsmöglichkeiten in Überlegungen zu adaptiven und individualisierbaren Produkten miteinbezogen werden. Diese Empfehlung ist in Bild 1 im unteren Abschnitt angedeutet und soll verdeutlichen, dass die verschiedenen Möglichkeiten der Veränderlichkeit jeweils mit den verschiedenen zur Verfügung stehenden Technologien abgeglichen werden sollten.

Um eine realistische Einschätzung der bestehenden Potenziale vornehmen zu können ist es notwendig, in einer Folgearbeit die technologischen Potenziale näher zu untersuchen und mit den Anforderungen und den erarbeiteten Eigenschaften der veränderlichen MMS abzugleichen. Dabei könnten verschiedene Potenziale für neue Anwendungen oder bestehender Anwendungen mit Optimierungsbedarf beleuchtet werden oder es könnte auf der Gegenseite ein abstrahierter Eignungsgrad für verschiedene Technologien bezüglich möglicher Anwendungsgebiete entstehen.

In verschiedenen Vorarbeiten, konnten bereits Potenziale durch neuartige Technologien für die MMS aufgezeigt werden [Hein 2021], [Kießling et al. 2022], [Kaufmann et al. 2020]. In diesem Kapitel wurden

bereits die Möglichkeiten angesprochen, welche sich für individualisierbare bzw. anthropomorphe Oberflächen durch die Verwendung von Granulat in Kombination mit flexiblen Oberflächen ergeben. Auch die Vorzüge viskositätsveränderlicher Flüssigkeiten für multifunktionale und in ihren Ausprägungen variablen Bedienelementen wurden diskutiert. Darüber hinaus wurden von Hein [2021] sowie von Hutter und Gundelsweiler [2022] die diversen Vorteile unterschiedlicher formveränderlicher Materialien aufgezeigt. So geschehen am Beispiel der vielversprechenden Technologie der Magnetischen Formgedächtnislegierungen (MSM), welche beispielsweise durch ihre hohe Leistungsdichte, die stufenlose Verstellbarkeit, ihre Zustandsstabilität sowie ihre vergleichsweise hohen Stellwege hohes Potenzial für eine MMS aufweist. Durch die Fähigkeit des MSM gleichzeitig als Aktor und Sensor fungieren zu können [Hutter und Gundelsweiler 2022], kommen vielfältige Anwendungsfälle in Bediensystemen in Frage. Auch die geringe Anzahl an tatsächlich auf dem Markt verfügbaren, hoch adaptiven bzw. individualisierbaren MMS (entsprechend der oben getroffenen Definition) zeigen den klaren Forschungs- und Entwicklungsbedarf, weitere Technologien mit vielversprechenden Anwendungen zu kombinieren. Hier scheint der Bedarf an einem Technologieradar zu bestehen, welches die Potenziale bestehender aber auch, wie im Beispiel des MSM, sehr junger Technologien erfasst und basierend auf der getroffenen Beschreibung der adaptiven und individuellen MMS einen Bezug zu veränderlichen Interfaces herstellt. Hierbei sollte jedoch immer der Anwendungskontext kritisch mitbetrachtet werden, um einen sinnvollen „Grad“ der Adaptivität und Individualisierung für die jeweilige Anwendung zu wählen. Diese sollten nicht aus einem Selbstzweck oder der rein (technologischen) Machbarkeit heraus umgesetzt werden, sondern anwendungsbezogen, im Kontext der Randbedingungen, der Anforderungen an und aus dem System sowie der Merkmale der Nutzergruppe auf den vorhandenen Bedarf abgestimmt werden.

Literatur

- aISA 2.0 2023 INTERNETQUELLE: Projekthomepage – aISA 2.0 – adaptive Interfacesysteme in Acker-schleppern 2.0. Zuletzt abgerufen: 25.01.2023. URL: <https://aisa-project.de/>
- Baumberger 2007 BAUMBERGER, Georg Christoph: *Methoden zur kundenspezifischen Produkt-defini-tion bei individualisierten Produkten*, München, Techn. Univ., Diss., 2007.
- Bein et al. 2008 BEIN, Thilo; BÖS, Joachim; HEROLD, Sven; MAYER, Dirk; MELZ, Tobias; THOMAIER, Mar-tin: *Smart interfaces and semiactive vibration absorber for noise reduction in vehi-cle structures*. In: *Aerospace Science and Technology* 12 (2008), Nr. 1, S. 62-73.
- Brauner et al. 2023 BRAUNER, Philipp; SCHAAR, Anne Kathrin; ZIEFLE, Martina: *Interfaces, Interactions, and Industry 4.0: A Framework for the User-Centered Design of Industrial User Inter-faces in the Internet of Production*. In: Röcker, C.; Büttner, S. (Hrsg.): *Human-Tech-nology Interaction*. Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 361–388.
- Debevc et al. 1996 DEBEVC, Matjaz; MEYER, Beth; DONLAGIC, Dali; SVECKO, Rajko: *Design and evaluation of an adaptive icon toolbar*. In: *User Modeling and User-Adapted Interaction* 6 (1996), Nr. 1, S. 1–21.
- DIN EN ISO 9241-11 2017 Norm DIN EN ISO 9241-11: 2017. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*. Deutsches Institut für Normung.
- DIN EN ISO 9241-129 2011 Norm DIN EN ISO 9241-129: 2011. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Leitlinien für die Individualisierung von Software*. Deutsches Institut für Normung.
- Hein 2021 HEIN, Andrea: *Auslegung und Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme mit Form-gedächtnislegierungen*, IKTD, Universität Stuttgart: Dissertation, 2021.
- Holder 2016 HOLDER, Daniel: *Gefallensurteil und Blickanalyse zum Fahrzeugdesign zukünftiger Aufbaugestalten anhand einer technischen Prognose*. IKTD, Universität Stuttgart: Dissertation, 2016.

- Hutter und Gundelsweiler 2022 HUTTER, Marco, GUNDELSWEILER, Bernd: *Analysis of design parameters' influence on the behavior of MSM-controlled PM-based reluctance actuators*, IKMT 2022; 13. GMM/ETG-Symposium, Linz, Austria, 2022, pp. 1-6.
- Janny 2018 JANNY, Benedikt: *Entwicklung von gestaltvariablen Bedienelementen zur Überwindung von Nutzungsbarrieren am Beispiel alternsgerechter Drehstellteile*. IKTD, Universität Stuttgart: Dissertation, 2018.
- Kaufmann et al. 2020 KAUFMANN, Andreas; SCHEMPP, Timo; STÖHR, Ingmar; SCHMID, Markus; MAIER, Thomas: *Komplexität managen - Adaptive Bedienarmlehne*. In: ATZ heavyduty, 13. Jahrgang, Springer-Vieweg, 2020, S. 22-28.
- Kießling et al. 2022 KIEßLING, Jonathan; HILBIG, Karl; SCHMID, Markus; MAIER, Thomas; VIETOR, Thomas: *Exploratory Analysis of Adaptively Morphing Handle Forms for Load Transfer Use Cases*. In: Proceedings of the Design Society 2 (2022), S. 2117–2126.
- Kobsa et al. 2021 KOBSA, Alfred; KOENEMANN, Jürgen; POHL, Wolfgang: *Personalised hypermedia presentation techniques for improving online customer relationships*. In: The Knowledge Engineering Review 16 (2001), Nr. 2, S. 111–155.
- Kühme 1993 KÜHME, Thomas: *A user-centered approach to adaptive interfaces*. Proceedings of the 1st international conference on Intelligent user interfaces (1993), S. 243–245.
- Langer et al. 2022 LANGER, F., CAY, E., & MAIER, T.: *Experimentelle Untersuchung der Form einer Unterarmauflage eines interaktionsbasierten Armassistenzsystems in der laparoskopischen Chirurgie*. 68. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Magdeburg, Germany, B.9.4, 2022.
- Lacocche et al. 2019 LACOCHE, Jérémy; DUVAL, Thierry; ARNALDI, Bruno; MAISEL, Eric; ROYAN, Jérôme: *Machine Learning Based Interaction Technique Selection for 3D User Interfaces*, Bd. 11883. In: Bourdot, Patrick; Interrante, Victoria; Nedel, Luciana; Magnenat-Thalman, Nadia; Zachmann, Gabriel (Hrsg.): *Virtual Reality and Augmented Reality*. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 33–51.
- Laßmann et al. 2019 LABMANN, Paula; KIEßLING, Jonathan; MAYER, Stephan; JANNY, Benedikt; MAIER, Thomas: *aHa - Der adaptive Handgriff der Zukunft*. In: Thelem Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH & Co. KG; Technische Universität Dresden (2019)
- Lavie und Meyer 2010 LAVIE, Talia; MEYER, Joachim: *Benefits and costs of adaptive user interfaces*. In: International Journal of Human-Computer Studies 68 (2010), Nr. 8, S. 508–524.
- Oestreich et al. 2023 OESTREICH, Hendrik; HEINZ-JAKOBS, Mario; SEHR, Philip; WREDE, Sebastian: *Human-Centered Adaptive Assistance Systems for the Shop Floor*. In: Röcker, Carsten; Büttner, Sebastian (Hrsg.): *Human-Technology Interaction*. Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 83–125.
- Petrov 2012 PETROV, Aleko: *Usability-Optimierung durch adaptive Bediensysteme*. IKTD, Universität Stuttgart: Dissertation, 2012.
- Racs et al. 2022 RACS, Marcel; KAUFMANN, Andreas; HÜLLE, Björn; MAIER, Thomas: *Design Recommendations for an Adaptive Control System in Agricultural Tractors Based on Expert Knowledge*. In: Ahram, Falcão (Hrsg.): *AHFE, Usability and User Experience*, 2022, S. 272–279.
- Reichelt et al. 2021 REICHELT, Florian; HOLDER, Daniel; KAUFMANN, Andreas; MAIER, Thomas: *Strategies for User-Centered Adaptation of Future Vehicles*. In: Black, Neumann et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st Congress*, 2021, S. 798-805.
- Schmid und Maier 2017 SCHMID, Markus; MAIER, Thomas: *Technisches Interface Design: Anforderungen, Bewertung und Gestaltung*, Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg, 2017.

Entwicklung eines aktiven Aufgabenwarn- und assistenzsystems für Unterarm und Handgelenk im Kontext von chirurgischen Armassistenzsystemen und Exoskeletten

Development of an active task warning and assistance system for forearm and wrist in the context of surgical arm assistance systems and exoskeletons

Ferdinand Langer¹, Tim Matschuck¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Forschungs- und Lehrgebiet
Technisches Design, Stuttgart
ferdinand.langer@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Bei einer laparoskopischen OP ergeben sich häufig statische, nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen, welche zu einer hohen Beanspruchung der oberen Extremitäten der Operierenden führen. Um dem entgegenzuwirken wurde ein chirurgisches Armassistenzsystem entwickelt, das die oberen Extremitäten des Operateurs physisch entlastet. Bei Fahrzeugen warnt und assistiert ein Lane Departure Warning System beim Halten der Spur. Inspiriert davon wird ein aktives Aufgabenwarn- und assistenzsystem (AWAS) für den Einsatz in medizinischen Armassistenzsystemen für den Unterarm konzipiert und integriert. Aus den potentiellen Fehlerursachen in laparoskopischen Anwendungen, wird die Art der Warnungen und Assistenz abgeleitet. Zur Assistenz wird eine translatorische dreidimensionale Bewegung und zur Warnung ein haptisches Feedback umgesetzt. Der Arm der operierenden Person lässt sich in alle Raumrichtungen bewegen und dadurch eine potentielle Kollision des Instruments mit dem Patienten verhindern. Die Funktionsfähigkeit des Systems wird durch eine Evaluation mit fünf Probanden geprüft, wobei die Zuordnung der Bewegungsrichtung und die Vibrationswahrnehmung untersucht werden.

Keywords (deutsch):

Armassistenzsystem, Exoskelett, Mensch-Maschine-Interaktion, Unterarmauflage, Warn- und Assistenzsystem

Abstract (english): Laparoscopic surgery often results in static, uncomfortable arm and upper body postures, which lead to high stress on the surgeon's upper extremities. To counteract this, a surgical arm assistance system was developed that physically relieves the upper extremities of the surgeon. In vehicles, a Lane Departure Warning System warns and assists with lane keeping. Inspired by this, an active task warning and assistance system is being designed and integrated for use in medical arm assistance systems for the forearm. From the potential causes of errors in laparoscopic applications, the type of warnings and assistance is derived. A translational three-dimensional motion is implemented for assistance and haptic feedback is implemented for warning. The arm of the person performing the operation can be moved in all spatial directions, thus preventing a potential collision of the instrument with the patient. The functionality of the system is tested by an evaluation with five test persons, whereby the assignment of the direction of movement and the vibration perception are examined.

Keywords (english):

Arm assistance systems, exoskeleton, human-machine-interaction, forearm support, warning- and assistance system

1 Motivation

Bei einer laparoskopischen Operation ergeben sich häufig statische, nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen, welche zu einer hohen Beanspruchung der oberen Extremitäten der Chirurgen führt [Galleano et al. 2006, Szeto et al. 2012, Choi 2012]. Dadurch kann es bei Präzisionsaufgaben zu Ermüdung und Effektivitätsreduzierung mit erhöhter Fehlerrate kommen [Galleano et al. 2006]. Um dem entgegenzuwirken, wurde im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts (IoC 103) ein interaktionsbasiertes chirurgisches Armassistenzsystem (CAS) entwickelt (siehe Bild 1), das die oberen Extremitäten des Operateurs während laparoskopischer Eingriffe physisch entlastet. Dies wird durch die aktive Unterstützung der Unterarme erreicht. Dabei wirkt auf die Unterarme proximal eine individuell an das Körpergewicht adaptierbare Unterstützungskraft [Karlovic 2019]. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle stellt die Unterarmauflage (vgl. Bild 1) dar. Der Einsatz des chirurgischen Armassistenzsystems zur Stützung des proximalen Unterarms hat einen positiven Einfluss auf die Fehlerreduktion bei der dynamischen Aufgabenausführung im Vergleich zu keiner Unterstützung, ohne die Ausführungszeit negativ zu beeinflussen [Langer et al. 2022a].

Eine Anforderung an das System stellt das Lösen des Unterarms vom chirurgischen Armassistenzsystem dar, was in sicherheitskritischen Situationen jederzeit möglich sein muss. Dies geschieht durch eine schnelle vertikale Bewegung der Arme nach oben [Karlovic et al. 2015]. Folglich können die Unterarme nicht fest, z. B. durch ein Klettband, mit der Unterarmauflage verbunden werden. Die Interfaceparameter Form und Material der Unterarmauflage sind Kriterien für die effektive und effiziente Interaktion mit dem CAS. Diese Interfaceparameter werden im Rahmen eines Forschungsprojekts (DFG 430136438) untersucht. Voruntersuchungen zeigen bei der Stützung am proximalen Unterarm einen Vorteil einer perzentiladaptierten anthropomorphen Form gegenüber einer flachen Unterarmauflage und gegenüber keiner Stützung [Langer et al. 2022b]. Das Thema der aktiven Fehlervermeidung mithilfe von Eingriffen durch CAS wurde bisher nicht adressiert.

Joice et al. [1998] beschreiben, dass die meisten Fehler in laparoskopischen Cholezystektomien (Gallenblasenentfernung) im Zusammenhang mit unangemessenem Kraftaufwand und falschen Bewegungen (Rotation und Translation) stehen. Weiterhin werten Tang et al. [2004] 200 Videoaufzeichnungen derartiger Eingriffe aus, was ergab, dass 86% der Vorkommnisse ohne Konsequenzen und 95% der Vorkommnisse mit gesundheitlichen Konsequenzen auf die Modi „exzessive oder geringe Kraft/Distanz“, „Bewegungen in falsche Richtung“ oder schlecht sichtbare Spitze des verwendeten Instrumentes zurückzuführen sind (Übersetzung durch Verfasser).

In einem anderen Bereich mit kognitiv anspruchsvollen Bedienungsaufgaben, wie bei modernen Fahrzeugen warnt und assistiert ein Spurhalteassistenzsystem (LDWS; engl.: Lane Departure Warning System) dem Fahrer beim Halten der Spur. Sollte z. B. die Mittellinie überfahren werden, vibriert zunächst das Lenkrad und darauffolgend lenkt es selbstständig wieder in die korrekte Spur. Inspiriert durch ein LDWS soll ein aktives Aufgabenwarn- und assistenzsystem (AWAS) für den Einsatz in Exoskeletten und medizinischen Armassistenzsystemen für den Unterarm bzw. das Handgelenk konzipiert und in ein bestehendes Armassistenzsystem integriert werden. Dabei handelt es sich um eine adaptierte Variante eines Spurhalteassistenzsystems aus Kraftfahrzeugen, welche insbesondere in der minimalinvasiven Chirurgie die Usability der Mensch-Maschine-Interaktion steigern und die Fehlerquote potentiell verringern soll. Das im Rahmen dieser Veröffentlichung aufgebaute System soll dabei primär der abstrakten Untersuchung und Verbesserung der Interaktion mit dem Menschen sowie der Eingrenzung und Definition von Feedbackparametern dienen. Dies macht eine anschließende Übertragung auf kommerziell verfügbare Produkte möglich.

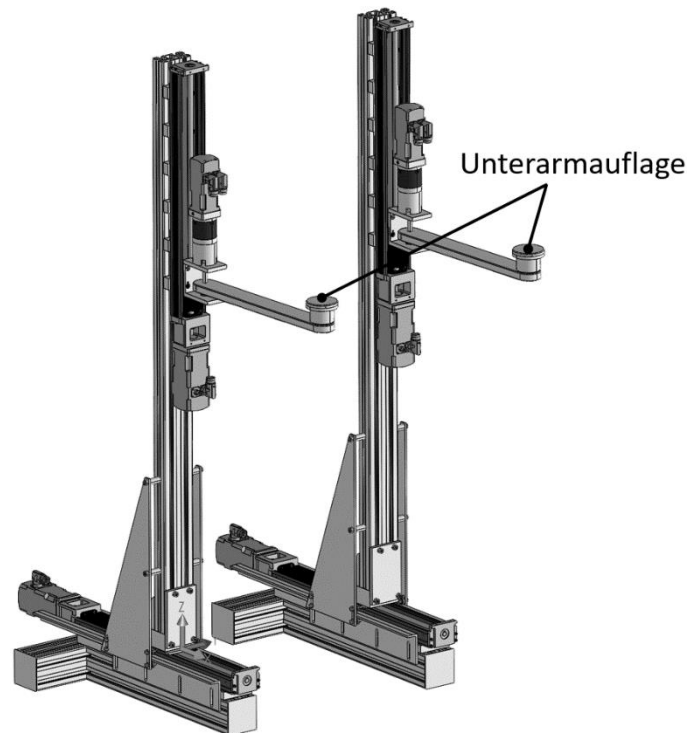


Bild 1: CAD-Modell des bestehenden chirurgischen Armsystems (CAS) mit der Unterarmauflage als Mensch-Maschine-Schnittstelle

2 Entwicklung und Aufbau des Warn- und Assistenzsystems

2.1 Planung des Warn- und Assistenzsystems

Spurhalteassistenzsysteme werden in Spurhaltewarnsysteme und Notfall-Spurhalteassistenz unterschieden und zählen im Allgemeinen zu den aktiven Sicherheitsmaßnahmen in modernen Kraftfahrzeugen [EU 2019]. Die Systeme unterstützen den Fahrer beim Halten einer sicheren Fahrzeugposition in der Fahrspur und bauen funktional aufeinander auf. Warnungen können den Fahrerinformationssystemen (FIS) zugeordnet werden, wohingegen die eingreifende Assistenz als Fahrerassistenzsysteme (FAS) eine primäre Fahraufgabe übernimmt (z. B. Spurhalteassistenzsystem). Die ISO 17361 [2017] umfasst Leistungsanforderungen und Testabläufe speziell für Spurhalteassistenzsysteme (LDWS) und beinhaltet folgende Anforderungen an die Fahrerinformation [Winner et al. 2015]: deutlich (auch für unaufmerksame Fahrer wahrnehmbar), intuitiv (Fahrerinformation begünstigt die intendierte Fahrerreaktion), exklusiv (Reaktion des Fahrers erfordert kein Überlegen), seitenselektiv (Fahrer kann auf intendierte Lenkrichtung schließen), auf den Fahrer beschränkt (nicht durch Fahrzeuginsassen bemerkbar) und kostengünstig (wenig Zusatzbauteile erforderlich). Diese Anforderungen lassen sich in ihrer abstrakten Form ebenfalls auf die Entwicklung eines Warn- und Assistenzsystems für chirurgische Armsysteme übertragen. Obwohl verschiedene Schätzungen über 90% aller Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückführen [NHTSA 2015], wodurch sich ein positiver Beitrag zur Verkehrssicherheit durch die Implementierung von FAS ableiten lässt, ist die Schuldfrage bei Fehlfunktionen ein kritischer Bestandteil der Entwicklung solcher Systeme. Die Übersteuerbarkeit des Systems durch den Bediener ist deshalb eine universelle Anforderung an FAS, die durch den Hersteller sichergestellt wird [Winner et al. 2015]. Diese Anforderung ergibt sich ebenfalls in der Medizintechnik, sodass medizinisches Fachpersonal jederzeit Warnung und Assistenz eines Unterstützungssystems übersteuern kann. Die Übertragbarkeit des Konzeptes von LDWS aus Kraftfahrzeugen auf die Anwendung in medizinischen Armsystemen ergibt sich aus den grundsätzlich vergleichbaren Zielen dieser

Systeme: Positions- und Trajektorienabweichungen eines bedienergeführten Objektes sind während der Aufgabenausführung in einem gegebenen Rahmen zu begrenzen. Bei laparoskopischen Eingriffen umfasst dies primär eine zu hohe Ausführungskraft, eine falsche Position oder eine nicht sichtbare Position der Instrumentenspitze, wie in Kapitel 1 bei möglichen Fehlerquellen beschrieben.

Die Aufgabenbereiche eines Aufgabenwarn- und assistenzsystems lassen sich dabei in „Überwachung“ und „Handlung“ unterteilen. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird der Aspekt Handlung mit dem Eingriff durch das Assistenzsystem betrachtet mit Fokus auf die Usability der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der Aspekt der Überwachung, welcher Erkennung sowie Auswertung einer möglichen Gefahr bzw. Fehlerquelle und die daraus abgeleitete Konsequenz in Form des Eingriffs durch das System beinhaltet, werden nicht betrachtet.

Es wird zunächst analysiert und festgelegt, welche Handlungen, d. h. Warnungen und Eingriffe (Assistenz), im Kontext von Unterarm und Handgelenk in medizinischen Armassistenzsystemen sinnvoll sind. Die Sinnhaftigkeit ergibt sich dabei maßgeblich aus der Wahrnehmbarkeit und dem Informationsgehalt von übermittelten Signalen sowie deren Einfluss auf die ausgeführten Tätigkeiten. Aus den potentiellen Fehlerursachen bei laparoskopischen Eingriffen und unter Betrachtung der aktuell eingesetzten Assistenztechnik in chirurgischen Anwendungen, wird die Art der Warnungen und der Assistenz abgeleitet.

Unter Berücksichtigung der Übertragungsraten der Wahrnehmungskanäle sind akustische, visuelle und haptische (taktil, kinästhetisch) Signale als Parameter denkbar [Schaal et al. 2015]. Abgeleitet aus den beschriebenen Anforderungen an LDWS, werden für die Parameterauswahl die folgenden Kriterien als Bewertungsgrundlage festgelegt:

- Wahrnehmbarkeit,
- Ablenkung/Einfluss auf die Bedienungsaufgabe,
- Praktischer Nutzen und Informationsgehalt.

Die Wahrnehmbarkeit der Reize hängt u. a. von den Bedienerereigenschaften ab, ist jedoch im Kontext von Operationssälen besonders durch die Umgebungsbedingungen eingeschränkt. Akustische Signale werden in der Medizintechnik bei diversen Geräten eingesetzt und sind somit gegebenenfalls nicht deutlich unterscheidbar. Zudem wird während der Behandlung häufig Musik gespielt, welche andere Signale übertönen kann [Weldon et al. 2015] und so die auditive Wahrnehmbarkeit behindert.

Visuelle Signale sind insbesondere durch die hohe Aufnahmezeit für Warnfunktionen gut geeignet. Gegenüber Spurhaltewarnsystemen, bei welchen auch visuelle Signale eingesetzt werden, ist im Kontext von bildbasierten Operationen die Wahrnehmbarkeit stärker eingeschränkt. Dies ergibt sich aus dem engeren Sicht- und Arbeitsbereich des Operateurs, wodurch ein aktiver Blickrichtungswechsel seltener erfolgt [Aitchison et al. 2016]. Das Wahrnehmen und Interpretieren eines Signals außerhalb der verwendeten Monitore bedeutet daher immer auch eine Ablenkung und schafft somit zusätzliches Gefahrenpotenzial.

Taktile Reize ermöglichen eine hinreichend hohe Übertragungs- bzw. Aufnahmezeit, um als Warnsignal zu fungieren. Die Signalübermittlung erfolgt bei CAS im Bereich des Unterarms und Handgelenks. Vibration ist deshalb im Vergleich zu anderen taktilen Reizen besonders gut geeignet, da sie in diesen Bereich sehr dynamisch variiert und wahrgenommen werden kann [Hatzfeld 2013].

Für die Auswahl der Assistenzparameter ist die praktische Anwendung relevant. Die in Kapitel 1 vorgestellten Fehlermöglichkeiten stehen grundsätzlich im Zusammenhang mit den Bewegungen und der ausgeübten Kraft des Bedieners. Insbesondere die Präparation, also das Auftrennen von Gewebe, stellt eine Aufgabe mit hohem Gefahrenpotenzial dar. Es kann somit festgestellt werden, dass die Positionierung des Unterarms, d. h. das Aufbauen von Distanz zwischen Unterarm und Patient, eine allgemein gefahrenmindernde Eingriffsstrategie darstellt und somit eine hohe Funktionsrelevanz aufweist. Aufgrund der hochdynamischen Platzverhältnisse und Orientierungen der Objekte in der Bauchhöhle, ist eine eindimensionale Bewegung nur in wenigen Fällen ausreichend. Das Aufgabenwarn- und assistenzsystem soll den Unterarm des Bedieners in drei Dimensionen, welche entsprechend Bild 2 und Bild 3 im Folgenden als x-Achse (Tiefenachse), y-Achse (Querachse) und z-

Achse (Längsachse) bezeichnet werden. Dabei haben proximale und zentrale Bewegungen (entlang der x-Achse in Körperrichtung) Priorität, da diese Bewegung in jedem Szenario Distanz aufbaut. Kraft wird nicht als ein von der Bewegung unabhängiger Assistenzparameter eingeordnet. Dies begründet sich darin, dass der Bediener stets die Kontrolle über das Armassistenzsystem haben muss (Übersteuerbarkeit). Eine Bewegung, die durch das AWAS am Unterarm hervorgerufen wird, muss durch Kraftaufwand unterbunden werden können, womit sie durch den Operateur immer auch als Kraft wahrgenommen wird (kinästhetisch).

Eine translatorische dreidimensionale Bewegung (Assistenzparameter: Bewegungsrichtung, Distanz, Beschleunigung und Geschwindigkeit) und Warnung über haptisches Feedback (Warnparameter: Vibration) werden als Assistenz- bzw. Warnparameter ausgewählt. Somit lässt sich der Arm der operierenden Person in alle Raumrichtungen bewegen und dadurch eine potentiell ungewünschte Kollision des Instruments mit dem Patienten verhindern.

2.2 Aufbau des Warn- und Assistenzsystems

Das chirurgische Armassistenzsystem CAS ist ein stationäres Armassistenzsystem, welches mit einer konstanten Unterstützkraft die Unterarme des Bedieners unabhängig voneinander entlastet. Der Unterarm des Bedieners liegt auf einer austauschbaren Unterarmauflage, die über einen 6-Achs-Kraftsensor auf einem Tragarm mit CAS verbunden ist, wie in Bild 2 dargestellt. Der Sensor bzw. die Armauflage bildet das Ende einer seriellen Kinematik mit drei elektrischen Starkstrommotoren und kann hierdurch frei im Raum positioniert werden. Je ein Motor bewegt den Aufbau linear entlang der x- bzw. der z-Achse und der dritte Motor rotiert den Tragarm um die z-Achse (vgl. Bild 3). Die Sensordaten werden über verschiedene Steuerungsmodule an einen Leitstand übertragen und dort softwarebasiert ausgewertet. Der Leitstand steuert über diese Module regelungsbasiert die Motoren, sodass die voreingestellte Kraft am Sensor konstant bleibt. Wenn der Bediener seinen Unterarm bewegt, wird über den Sensor eine Kraftänderung (Richtung und Betrag) registriert und die Armauflage entsprechend mitbewegt, in der Bestrebung die eingestellte Unterstützkraft wiederherzustellen.

Für die Umsetzung des Warn- und Assistenzsystems wird ein integrativer Ansatz gewählt, bei welchem zusätzliche Aktorik in das vorhandene Armassistenzsystem CAS integriert wird (siehe Bild 2 und Bild 3). Da die Steuerung des Armassistenzsystems nicht verändert werden soll, sind die Motoren nicht direkt steuerbar und es wird stattdessen der Kraftsensor als Systemschnittstelle verwendet. Alle Bewegungen der Armauflage führt das System basierend auf den hierüber gemessenen Daten aus, weshalb durch Manipulation des Sensors auch jede Bewegung erzwungen werden kann. Die Steuerung der Motoren des CAS wird über eine Schnittstelle zu der regulären Steuerungseinheit des Assistenzsystems (6-Achs-Kraftsensor) möglich, d. h. es findet eine Maschine-Maschine-Kommunikation statt [Schmid & Maier 2017]. Die Bewegung wird mit der vorhandenen Mechanik des CAS umgesetzt. Solange die zusätzlichen Aktoren des Warn- und Assistenzsystems eine weitere Kraft aufbringen, ist CAS bestrebt die entstandene Differenz zwischen der eingestellten Kraft und der gemessenen Kraft auszugleichen. Dies resultiert in einer Bewegung der Armauflage bzw. des Unterarms, sofern der Bediener die Kraftdifferenz nicht ausgleicht. Aufgrund der Verzögerung bei der menschlichen Reaktion und Muskelanspannung führt der Eingriff durch das AWAS zu einer Bewegung des Unterarms.

Um verschiedene Bewegungsrichtungen durch das AWAS zu ermöglichen, ist pro Raumachse je ein Aktor (Servo-Motor) erforderlich, welcher jeweils bidirektional Kraft auf den 6-Achs-Kraftsensor des CAS ausüben kann (siehe Bild 2). Die funktionsbedingte Verformung des verbauten Kraftsensors ist im Betrieb nicht optisch wahrnehmbar, darf jedoch nicht behindert werden. Um dies zu gewährleisten, dürfen die Aktoren des AWAS nicht starr mit dem Sensor verbunden werden, weshalb ein zusätzliches Federelement zwischengeschaltet wird. Dies ermöglicht zum einen eine Entkopplung von Sensor und Aktor und erlaubt auf der anderen Seite eine präzise Dosierung der wirkenden Kraft über die Verformung und Steifigkeit des Federelementes. Die Assistenzfunktion wird durch den

beschriebenen Mechanismus über die Weiterleitung der Servo-Bewegung über den Kraftleitungsarm praktisch umgesetzt.

Am Ort der Kraftübertragung zwischen Bediener und CAS wird zusätzlich ein elektrischer Vibrationsmotor integriert (siehe Bild 2), da dort die Kraftübertragung stattfindet. Damit die Auflage austauschbar bleibt, wird deren Halterung als Befestigung für den Vibrationsmotor verwendet.

Der Arduino zur Steuerung wird dabei mit einem Akku betrieben und direkt mit den Servo-Motoren und dem Vibrationsmotor verbunden.

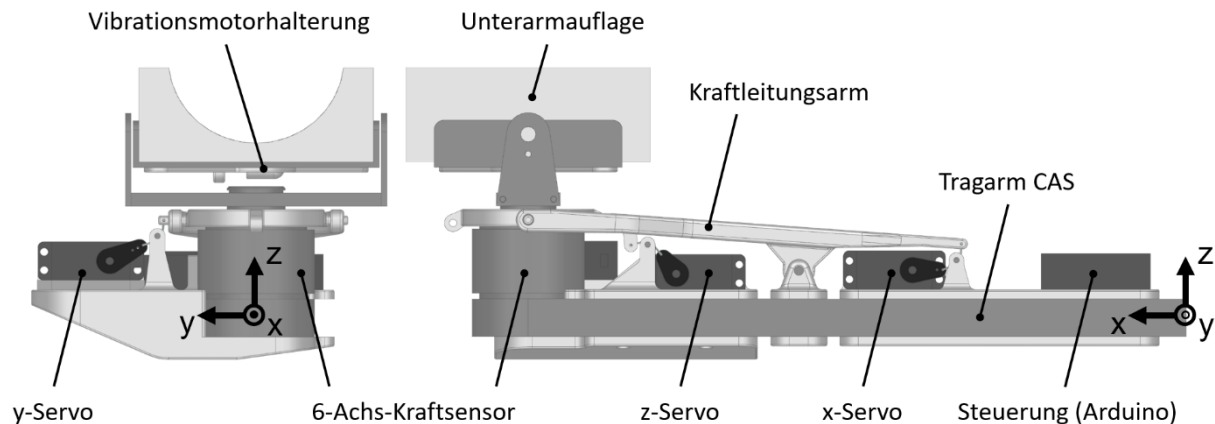


Bild 2: CAD-Modell Gesamtentwurf des Aufgabenwarn- und assistenzsystems in Frontansicht (links) und Seitenansicht (rechts)

Das ausgearbeitete und aufgebaute Konzept zeichnet sich durch einen hohen Integrationsgrad in dem eingesetzten chirurgischen Armassistenzsystem aus (siehe Bild 2 und 3). Es wird auf bereits vorhandene Kinematik bzw. Motoren zugegriffen, um die Eingriffe durch das Aufgabenwarn- und Assistenzsystem umzusetzen. Die Warn- und Assistenzparameter (Vibrationsmuster und -intensität, Bewegungsrichtung, -distanz, -beschleunigung und -geschwindigkeit) lassen sich variabel einstellen und ansteuern. Die Eingriffe des Systems können durch die Bedienenden jederzeit durch Entgegenwirken überschrieben werden.

3 Evaluation des Warn- und Assistenzsystems

Die Evaluation des Systems bezieht sich primär auf die Umsetzung der Warn- und Assistenzfunktion. Es ist nachzuweisen, dass das System die in Abschnitt 2.1 ermittelten Parameter umsetzt. Hierfür wird eine Evaluation durchgeführt, bei der die Wahrnehmbarkeit der Eingriffe durch Probanden überprüft wird. Darauf aufbauend können Verbesserungspotentiale abgeleitet und weiterer Forschungsbedarf ermittelt werden.

Die Probanden erhalten eine Präzisionsaufgabe, welche sie unter Verwendung des CAS (Unterstützkraft 21 N; Hautkontakt mit der Armauflage; anthropomorphe U-Form der Unterarmauflage 25-perzentil Mann) ausführen sollen. Bei der Aufgabe handelt es sich um ein Muster aus unregelmäßigen Flächen auf einem weißen Hintergrund, welche zufällig nummeriert sind (vgl. Bild 3). Der Proband soll mit einem Stift die Flächen in der richtigen Reihenfolge verbinden, und dabei nur auf dem weißen Untergrund zwischen den Flächen zeichnen. Der Tisch wird dabei auf eine für den Probanden ergonomisch angenehme Höhe eingestellt. Die Auswahl der Probanden basiert auf den Merkmalen Alter zwischen 18 und 67 Jahren und keine körperlichen Einschränkungen im Schulter-, Arm- und Handbereich der rechten Hand. Es wird eine Probandenanzahl von fünf gewählt, da in der Evaluation zunächst die Funktionsfähigkeit und das generelle Konzept abgeprüft werden soll und nicht spezielle Warn- und Assistenzparameter.

Während der Aufgabenausführung wird durch das AWAS ein Eingriff simuliert, welcher durch den Versuchsleiter gestartet wird. Die Aufgabenausführung darf abgebrochen werden, sobald ein Eingriff

oder eine Warnung durch den Probanden erkannt wurde. Anschließend soll die Bewegungsrichtung und die wahrgenommene Vibration beschrieben werden. Es werden die nachfolgenden Bewegungskombinationen jeweils einzeln abgeprüft und mit Vibrationsmustern kombiniert:

- Bewegung nach rechts (-x) und nach oben (+y-Richtung),
- Bewegung nach hinten (-x-Richtung),
- Bewegung nach rechts (+z), und nach hinten (-x-Richtung),
- Bewegung nach oben (+z) und nach hinten (-x-Richtung),
- Keine Bewegung.

Dies wird pro Proband durchgeführt, wobei die Eingriffsparameter des Warn- und Assistenzsystems und die Nummerierung der Flächen vor jedem Durchlauf geändert werden. Zudem wird die Dauer zwischen dem Beginn der Aufgabenausführung und dem Eingriff variiert, sodass der Proband den Zeitpunkt nicht abschätzen kann. Nach Beendigung aller Durchläufe wird erfragt, ob die Eingriffe Schmerzen oder unangenehme Bewegungen verursacht haben.

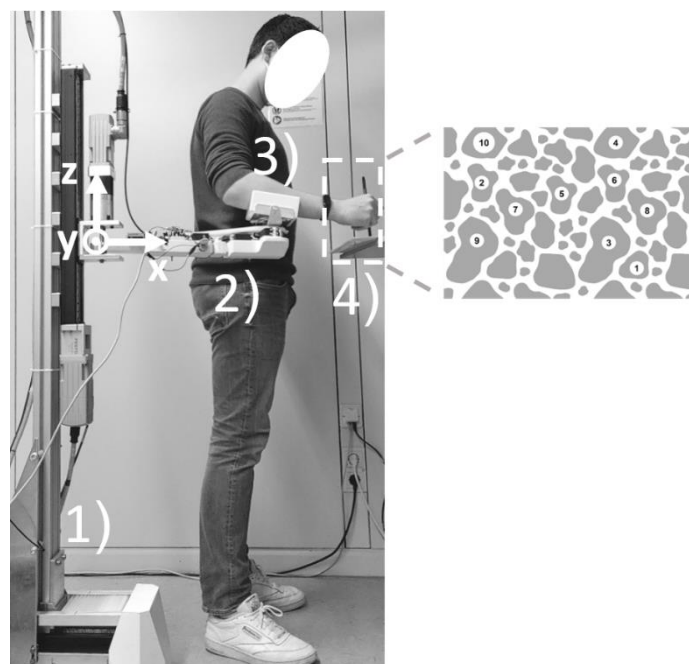


Bild 3: Versuchsaufbau mit rechtshändiger Person; interaktionsbasiertes Armassistenzsystem CAS (1), Aufgabenwarn- und Assistenzsystem montiert an Tragarm und 6-Achs-Kraftsensor des CAS (2), Mensch-Maschine-Schnittstelle Unterarmlauf (3), Versuchsaufgabe (4)

Alle fünf Probanden (Alter: \bar{x} = 26,4 Jahre, SD = 1,6 Jahre, Range = 24-29 Jahre; 20% weiblich, 80% männlich) haben die Studie vollständig abgeschlossen und gaben an, keine Schmerzen oder unangenehmen Bewegungen registriert zu haben. In allen 20 Durchläufen mit Assistenz durch das System (5 Probanden, jeweils 5 Durchläufe) wurde der Eingriff erkannt und die Aufgabenbearbeitung selbstständig abgebrochen. Zudem wurde von jedem Probanden fehlerfrei erkannt, ob dabei eine Bewegung stattgefunden hat, wobei jeder Proband in jedem Durchlauf mindestens eine Bewegungsrichtung korrekt identifiziert hat. Drei von fünf Probanden haben bei dem Eingriff mit einer Bewegung nach rechts auch eine Bewegung nach hinten wahrgenommen. Die Bewegung nach oben wurde in fünf Fällen (von insgesamt 15) erkannt, wobei jeweils betont wurde, dass Unsicherheit diesbezüglich besteht. Dies war auch dann der Fall, wenn der Arm des Probanden sich sichtbar nach oben bewegt hat, weshalb diese subjektive Einschätzung kritisch hinterfragt bzw. untersucht werden sollte.

Obwohl jedes Eingriffsszenario auch ein taktiles Signal beinhaltet, wurde in fünf Fällen angegeben, dass keine Vibration stattgefunden hat, oder dass die Vibration ohne die damit verbundenen

Geräusche eventuell nicht wahrgenommen worden wäre. Allgemein wurde die Vibration in keinem Durchlauf als stark beschrieben und obwohl die Art der Vibration in vier Fällen intuitiv richtig benannt wurde, konnte in keinem Durchlauf die Anzahl der Wiederholungen eines Effektes korrekt beziffert werden. Auffallend ist, dass der Vibrationseffekt in Eingriffsszenario „keine Bewegung“ von jedem Probanden als deutlich wahrnehmbar und „wesentlich stärker als in den vorherigen Eingriffen“ beschrieben wurde.

Der einzige Proband gänzlich ohne Vorerfahrung mit CAS hatte die größten Schwierigkeiten bei der korrekten Bewegungszuordnung (einer von fünf Eingriffen vollständig korrekt), wohingegen der Teilnehmer mit der meisten Erfahrung in vier der fünf Durchläufe alle Warn- und Assistenzparameter richtig identifiziert hat. Die Teilnehmer mit mittelmäßiger Vorerfahrung (z. B. vorangegangene Teilnahme an einer Studie mit CAS) lagen dazwischen, was auf einen Zusammenhang zwischen der Vertrautheit mit CAS und der Effektivität des AWAS hindeutet und auf den Einfluss von Erfahrungswissen auf die Kognition zurückgeführt werden kann.

Anmerkungen der Probanden bezogen sich auf Schwierigkeiten bei der Unterscheidung von Bewegungsrichtungen, die durch das AWAS hervorgerufen wurden und von Bewegungsrichtungen, die der natürlichen Biomechanik des Armes entsprechen. So wurde in drei Durchläufen Unsicherheit geäußert, ob die wahrgenommenen Bewegungsrichtungen das AWAS ausgeführt hat, oder ob eine eindimensionale Bewegung des AWAS möglicherweise durch den Probanden selbst in eine mehrdimensionale Bewegung überführt wurde.

4 Diskussion und Ausblick

Die Evaluation zeigt, dass die Eingriffe des Assistenzsystems in unterschiedliche Bewegungsrichtungen wahrgenommen werden können und der Eingriff des Systems die Position des Unterarms der Probanden beeinflussen und diesen bewegen kann.

Die Evaluation offenbart mechanisches Optimierungspotenzial, wie einen stärkeren Vibrationsmotor. Der Vibrationsmotor kann ersetzt oder durch weitere Motoren ergänzt werden, wobei letzteres auch Änderungen an der Steuerungstechnik beinhaltet.

Die Einstellungen der Assistenzparameter in dem erstellten Programmcode sind aktuell Erfahrungswerte und können nicht in physikalische Größen (z. B. Bewegungsgeschwindigkeit) übersetzt werden. Es ist daher sinnvoll, den Zusammenhang zwischen den Variablen im Programm und real messbaren Größen in Form einer Kennlinie zu bestimmen, um präzise bzw. eindeutige Einstellungen von Distanz, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Unterarmbewegung zu ermöglichen.

Die Evaluationsstudie hat Unstimmigkeiten zwischen Wahrnehmung und Realität hinsichtlich der Unterarmbewegung aufgezeigt. Neben der Untersuchung mentaler Modelle (bzgl. der Nutzerreaktion bei Assistenzeingriffen) erscheint auch die biomechanische Komponente relevant und könnte in zukünftigen Studien untersucht werden. Die Untersuchung und Verbesserung der Interaktion mit dem Menschen sowie die Feedbackparameter des Systems sind Felder zukünftiger Forschung.

Der aktuelle Prototyp bietet funktionale Bestandteile, welche auch außerhalb des medizintechnischen Kontextes relevant sind. So kann eine aktive Unterstützung während jeglicher Aufgabe, mit der menschlichen Sensorik oder Motorik als Schwachstelle, untersucht und optimiert werden. Beispiele hierfür sind Montagearbeiten in schlecht einsehbaren Maschinenbereichen (Führung des Unterarms) und Aufgaben, welche eine gute Tiefenwahrnehmung erfordern (z. B. Abstand wird über Vibrationsimpulse signalisiert).

Weiterhin muss die Implementierung des Aufgabenwarn- und assistenzsystems in Bilderkennungs- und Bildanalysesysteme zur Fehlererkennung durchgeführt werden. Des Weiteren ist die Übertragung des Aufgabenwarn- und assistenzsystems auf Exoskelette ein potentielles Forschungsfeld.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojekts "Usability-Optimierung der Interfaceparameter Form und Material bei einem interaktionsbasierten Armassistenzsystem" (Projektnummer 430136438) gefördert.

Literatur

- Aitchison et al. 2016 AITCHISON, Lucy Ping; CUI, Cathy Kexin; ARNOLD, Amy; NESBITT-HAWES, Erin; ABBOTT, Jason: *The ergonomics of laparoscopic surgery: a quantitative study of the time and motion of laparoscopic surgeons in live surgical environments*. In: *Surgical Endoscopy*, 30 (2016), Nr. 11, S. 5068-5076.
- Choi 2012 CHOI, Sang: *A review of the ergonomic issues in the laparoscopic operating room*. In: *Journal of Healthcare Engineering*, Vol. 3 (2012), Nr. 4, S. 587-603.
- EU 2019 EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom [...] über die Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit und den Schutz der Fahrzeuginsassen und von ungeschützten Verkehrsteilnehmern [...]*: Verordnung (EU) 2019/2144, 2019, S. 9.
- Galleano et al. 2006 GALLEANO, Raffaele; CARTER, Fiona; BROWN, Stuart; FRANK, Timothy; CUSCHIERI, Alfred: *Can Armrests Improve Comfort and Task Performance in Laparoscopic Surgery?*. In: *Annals of Surgery*, Vol. 243 (2006), Nr. 3, S. 329 - 333.
- Hatzfeld 2013 HATZFELD, Christian: *Experimentelle Analyse der menschlichen Kraftwahrnehmung als ingenieurtechnische Entwurfsgrundlage für haptische Systeme*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Dissertation, 2013, S. 8
- ISO 17361 2017 Norm ISO-17361:2017: *Intelligent transport systems - Lane departure warning systems: Performance requirements and test procedures*
- Joice et al. 1998 JOICE P.; HANA, G.; CUSCHIERI, A.: *Errors enacted during endoscopic surgery – a human reliability analysis*. In: *Applied Ergonomics* 29 (1998), Nr. 6, S. 409-414.
- Karlovic et al. 2015 KARLOVIC, Kristian; PFEFFER, Stefan; MAIER, Thomas; HEIDINGSFELD, Michael; EDERER, Michael; SAWODNY, Oliver: *Effects on performance when using a Posture Assistance Device – results of a usability evaluation in laboratory setting*. In: *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics and the Affiliated Conferences*, Las Vegas, USA, 2015, S. 3323-3330.
- Karlovic 2019 KARLOVIC, Kristian: *Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle interaktionsbasierter, adaptiv physischer Assistenzsysteme*. IKTD, Universität Stuttgart: Dissertation, 2019, S. 8-147.
- Langer et al. 2022a LANGER, Ferdinand; CAY, Eray; MAIER, Thomas: *Experimentelle Untersuchung der Form einer Unterarmauflage eines interaktionsbasierten Armassistenzsystems in der laparoskopischen Chirurgie*. In: 68. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Magdeburg, 2022, B.9.4.
- Langer et al. 2022b LANGER, Ferdinand; MATSCHUCK, Tim; DREHSAJ, Nora; MAIER, Thomas: *Experimental investigation of anthropomorphic forms of a forearm support of a surgical arm assistance system in precision tasks*. In: *Triennial conference on Healthcare Systems Ergonomics and Patient Safety*. Delft, Niederlande, 2022.

- NHTSA 2015 NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION AND US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: *Crash Stats: Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey 2015*, 2015.
- Schaal et al. 2015 SCHAAL, Steffen; KUNSCH, Konrad; KUNSCH, Steffen: *Der Mensch in Zahlen: Eine Datensammlung in Tabellen mit über 20000 Einzelwerten*, Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 208
- Schmid & Maier 2017 SCHMID, Markus; MAIER, Thomas: *Technisches Interface Design: Anforderungen, Bewertung und Gestaltung*, Berlin, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 63.
- Szeto et al. 2012 SZETO, Grace P. Y.; CHENG, Stephen W. K.; POON, Jensen T. C.; TING, Albert C. W.; TSANG, Raymond C. C.; HO, Pei: *Surgeons' Static Posture and Movement Repetitions in open and Laparoscopic Surgery*. In: *Journal of Surgical Research* 172, 2012, S. e19-e31.
- Tang et al. 2004 TANG, B.; HANNA, G. B.; JOICE, P.; CUSCHIERI, A.: *Identification and Categorization of Technical Errors by Observational Clinical Human Reliability Assessment (OCHRA) During Laparoscopic Cholecystectomy*, In: *Arch Surg.* 139 (2004), Nr. 11, S. 1215-1220.
- Weldon et al. 2015 WELDON, Sharon-Marie; KORAKIANGAS, Terhi; BEZEMER, Jeff; KNEEBONE, Roger: *Music and communication in the operating theatre*. In: *Journal of advanced nursing*, 71 (2015), Nr. 12, S. 2763-2774.
- Winner et al. 2015 WINNER, Hermann; LOTZ, Felix; HAKULI, Stephan; SINGER, Christina: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, Wiesbaden Springer Vieweg, 2015, S. 907-947.

Impressum

Kontaktadresse

Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD)
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
www.iktd.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Daniel Roth
Telefon +49 711 685-60240, Fax -66219
daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

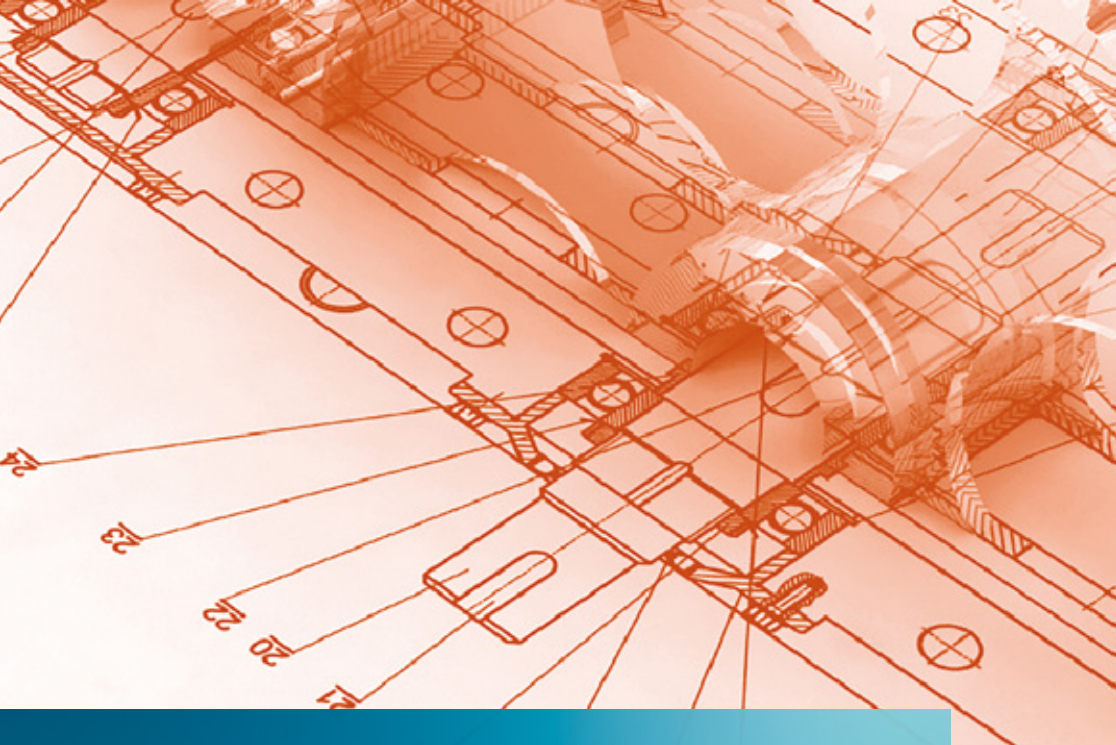
Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografi-
sche Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich all seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann das Institut keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

ISSN: 2364-4885

© Fraunhofer IAO, 2023



Die vollständigen Beiträge finden Sie unter:
<http://s.fhg.de/symposium-ssp>

Sponsoren:

