

STUTTGARTER SYMPOSIUM FÜR PRODUKTENTWICKLUNG SSP 2017

Stuttgart, 29. Juni 2017 | Wissenschaftliche Konferenz



SSP 2017

© Eric Milos – Fotolia

Herausgeber:

Hansgeorg Binz, Bernd Bertsche, Wilhelm Bauer, Dieter Spath, Daniel Roth

Abstractheft

STUTTGARTER SYMPOSIUM FÜR PRODUKTENTWICKLUNG SSP 2017

Produktentwicklung im disruptiven Umfeld

Stuttgart, 29. Juni 2017 | Wissenschaftliche Konferenz

ORGANISATION

IKTD, Universität Stuttgart

IMA, Universität Stuttgart

IAT, Universität Stuttgart

Fraunhofer IAO

Kontaktadresse:

*Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD),
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
www.iktd.uni-stuttgart.de*

Dipl.-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 bibliografische
Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.*

ISSN: 2364-4885

Druck und Weiterverarbeitung:

*IRB Mediendienstleistungen
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB,
Stuttgart*

*Für den Druck des Buchs wurde chlor- und
säurefreies Papier verwendet.*

© Fraunhofer IAO, 2017

Alle Rechte vorbehalten

*Dieses Werk ist einschließlich all seiner Teile urheberrechtlich
geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Ur-
heberrechtsgesetzes 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 Wa-
renbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt
nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Wa-
renzeichen- 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, Vollstän-
digkeit oder Aktualität übernehmen.*

Alle eingereichten Beiträge für das Stuttgarter Symposium 2017 wurden mindestens von zwei unabhängigen Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats begutachtet.

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

Wissenschaftlicher Beirat

- Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum (ITM)
- Prof. Dr. Albert Albers, Karlsruher Institut für Technologie (IPEK)
- Prof. Dr. Wilhelm Bauer, Fraunhofer IAO
- Prof. Dr. Bernd Bertsche, Universität Stuttgart (IMA)
- Prof. Dr. Hansgeorg Binz, Universität Stuttgart (IKTD)
- Prof. Dr. Herbert Birkhofer (i. R.), Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr. Iris Gräßler, Universität Paderborn/Heinz Nixdorf Institut
- Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg (LKT)
- Prof. Dr. Günter Höhne, Technische Universität Ilmenau
- Hon.-Prof. Alfred Katzenbach, Universität Stuttgart
- Prof. Dr. Eckhard Kirchner, Technische Universität Darmstadt (pmd)
- Prof. Dr. Dieter Krause, Technische Universität Hamburg-Harburg (PKT)
- 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. Mirko Meboldt, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)
- Prof. Dr. Kristin Paetzold, Universität der Bundeswehr München (ITPE)
- Prof. Dr. Frank Rieg, Universität Bayreuth
- Dipl.-Ing. Daniel Roth, Universität Stuttgart (IKTD)
- Prof. Dr. Wolfgang Schinköthe, Universität Stuttgart (IKFF)
- Prof. Dr. Dieter Spath, Universität Stuttgart (IAT)
- Prof. Dr. Karsten Stahl, Technische Universität München (FZG)
- Prof. Dr. Rainer Stark, Fraunhofer IPK
- Prof. Dr. Klaus-Dieter Thoben, Universität Bremen
- Prof. Dr. Michael Vielhaber, Universität des Saarlandes (LKT)
- Prof. Dr. Thomas Vietor, Technische Universität Braunschweig
- Prof. Dr. Sandro Wartzack, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (KTmfk)
- Prof. Dr. Christian Weber, Technische Universität Ilmenau
- Prof. Dr. Michael Weigand, Technische Universität Wien
- Prof. Dr. Detmar Zimmer, Universität Paderborn (KAT)



VORWORT

Das Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP findet dieses Jahr zum vierten Mal statt. In logischer Weiterführung und -entwicklung der erfolgreichen Symposien in den Jahren 2011, 2013 und 2015 stehen im Rahmen des Forums vorwiegend Themen des industriellen Umfelds im Mittelpunkt. Die wissenschaftliche Konferenz bietet demgegenüber vor allem Doktoranden eine Plattform zur Vorstellung und intensiven Diskussion ihrer Forschungsergebnisse.

Wir freuen uns außerordentlich, dass dieses Konzept so gut in der wissenschaftlichen Community aufgenommen und eine sehr beachtenswerte Anzahl von 76 Beiträgen eingereicht wurde. Wir danken allen Autoren, bitten aber gleichermaßen um Verständnis, dass aufgrund des zur Verfügung stehenden Zeitrahmens und der Berücksichtigung der Begutachtungsergebnisse nicht alle Beiträge angenommen werden konnten.

Schwerpunktt Themen der diesjährigen Konferenz stellen unter anderem das Digital Engineering, Konstruktionsmethodiken sowie das Innovations- und Technologiemanagement dar.

Die Vorbereitung und Durchführung dieses Symposiums bedarf tatkräftiger Unterstützung vieler Personen. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Daniel Roth, der wesentlich zum Gelingen der Konferenz beigetragen hat.

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

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Bauer

Prof. Dr. Dieter Spath

STUTTGARTER SYMPOSIUM FÜR PRODUKTENTWICKLUNG SSP 2017

WISSENSCHAFTLICHE KONFERENZ
STUTTGART, 29. JUNI 2017

8.30 Uhr **Begrüßung und Einführung**

*Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz, Institutsleiter,
IKTD der Universität Stuttgart*

9.00 Uhr **Entwicklung smarter Produkte und Services**

*Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici, Inhaber des
Lehrstuhls für Maschinenbauinformatik,
Ruhr-Universität Bochum*

9.30 Uhr **Best Paper-Vortrag**

10.00 Uhr **Kaffeepause**

Track 1: (Auditorium ZVE)
Virtuelle
Produktentwicklung

Track 2: (G 1.00)
Methoden und Prozesse
der Produktentwicklung

Track 3: (Z1.83)
Technologiemanagement
und Nutzerzentriertes
Design

10.30 Uhr **Parallelstream 1**

Industrie 4.0/
Cyber-Physical Products

Wissensmanagement in
der Produktentwicklung

Innovations- und
Technologie-
management

12.00 Uhr **Mittagessen**

13.00 Uhr **Parallelstream 2**

Zuverlässige Produkt-
entwicklung & Digital
Engineering

Konstruktions-
methodiken

Innovations- und
Technologie-
management & Nutzer-
zentriertes Design

14.30 Uhr **Kaffeepause**

15.00 Uhr **Parallelstream 3**

Digital Engineering

Konstruktions-
methodiken

Nutzerzentriertes
Design

16.30 Uhr **Ende der Konferenz**

VORTRÄGE IM PLENUM

09:00 – 10:00 UHR

Themen: Industrie 4.0 / Cyber-Physical Products, Digital Engineering

Stichworte: Produktentwicklung, Digitalisierung, Smart Product, Smart Service

Entwicklung smarter Produkte und Services

Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Ruhr-Universität Bochum

Neueste Entwicklungen im Bereich des Internets, der eingebetteten Mikrosysteme, der mobilen Kommunikation, der Hardware-Infrastrukturen sowie der Software-Technologien durchdringen verstärkt nicht nur Konsumprodukte, sondern auch die meisten Industriegüter und wandeln diese zu sogenannten "smarten Produkten". Diese neuen Produkte verfügen über eine gewisse eigene „Intelligenz“, können zum Teil autonom agieren, sind mit anderen „smarten“ Produkten und mit dem Internet vernetzt und mit produktbezogenen Services sehr eng verbunden. Dadurch können diese Produkte als Gesamtleistungen über ganz neue Geschäftsmodelle (z. B. „Product as a Service“) im Markt angeboten werden.

Für die Entwicklung dieser neuen Produktgeneration reichen heutige Methoden und Werkzeuge aus dem Mechatronik-Bereich nicht mehr aus. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren von verschiedenen Gremien eine Vielzahl von Aktivitäten initiiert, um Forschungs- und Handlungsbedarfe in diesem Bereich zu identifizieren.

Der vorliegende Beitrag fasst die wichtigsten Ergebnisse mehrerer Studien, Workshops und Positionspapiere zusammen, die im Umfeld der Entwicklung smarter Produkte und Services erarbeitet wurden.

Topics: Industry 4.0 / Cyber-Physical Products, Digital Engineering

Keywords: Engineering, Digitalization, Smart Product, Smart Service

Engineering of Smart Products and Services

Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici

Chair of IT in Mechanical Engineering, Ruhr-University Bochum

The penetration of embedded microsystems, mobile communication, hardware infrastructures and software technologies by recent Internet-driven innovations triggers the transition from traditional products to so called "Smart Products". This change does not solely affect the consumer market, but also increasingly applies to the industrial sector. This new generation of products is mainly characterized by a certain degree of own intelligence, (partly) autonomous capabilities, a high degree of connectivity as well as a close link to product-related services. The shift towards Smart Products enables companies to offer their products "as a Service" by utilizing new business models.

Traditional engineering methods and IT-tools for mechatronic products have to be extended in order to be suitable for this new generation of Smart Products. Therefore, different committees initiated several projects and activities in order to identify demand for action and research needs in this area. The contribution in hand summarizes the most important findings of different studies, workshops and position papers that address the "Engineering of Smart Products and Services".

Themen: Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Additive Fertigung, Konstruktionsrichtlinien, funktionsgerechte Gestaltung

Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke

*Stefan Schulz, Josef Schlattmann, Stephan Rosenthal
Technische Universität Hamburg*

In diesem Beitrag werden Konstruktionsrichtlinien und -empfehlungen für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke präsentiert. Dafür werden Standardgelenke mit bis zu drei Freiheitsgraden analysiert und in elementare geometrische Grundkörper aufgeteilt, für die allgemeine Konstruktionsrichtlinien für ihre additive Fertigung erarbeitet werden. Auf dieser Grundlage werden Gelenke in integrierter Bauweise entwickelt und Richtlinien für deren funktionsgerechte Gestaltung formuliert.

Topics: Design Methodology

Keywords: Additive Manufacturing, Design Guidelines, Design for Functionality, Polymer Joints

Design Guidelines for Additive Manufactured Polymer Joints

*Stefan Schulz, Josef Schlattmann, Stephan Rosenthal
Hamburg University of Technology*

In this paper, we present design guidelines for additive manufactured polymer joints to ensure their working capabilities. In order to derive such guidelines, state of the art joints with up to three degrees of freedom are analyzed and divided into elementary basic bodies. These basic bodies are 3D printed and analyzed, and the results are presented in this paper. Based on these results, we formulate design guidelines for additive manufactured polymer joints which are printed without additional support material and in integrated structures, meaning that no assembly of the joints is necessary.

TRACK 1: VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 1: INDUSTRIE 4.0 / CYBER-PHYSICAL PRODUCTS

10:30 – 12:00 UHR

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung

Stichworte: Kundenorientierte Produktentwicklung, Intelligente technische Systeme, Produktkonzipierung

Kundenorientierte Entwicklung von intelligenten technischen Systemen im Maschinenbau

Andre Lipsmeier, Harald Anacker, Roman Dumitrescu, Arno Kühn
Fraunhofer Einrichtung für Entwurfstechnik Mechatronik IEM

Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus werden durch den rasanten Wandel von Märkten und Technologien vor Herausforderungen gestellt. Neben verkürzten Entwicklungszeiten und einer geringen Investitionsbereitschaft der Kunden steigt die Wettbewerbsintensität in der Maschinenbaubranche stetig. Um sich im internationalen Wettbewerb zukünftig behaupten zu können, gilt es den Wandel von bislang rein mechatronischen Systemen hin zu intelligenten technischen Systemen (ITS) erfolgreich zu vollziehen. Für die gewinnbringende Platzierung einer Marktleistung im Wettbewerb der Maschinenbaubranche reicht es nicht mehr aus, die klassischen Differenzierungsmerkmale zu verfolgen. Es gilt den individuellen Kundennutzen in den Mittelpunkt der Wertschöpfung zu stellen. Kern des Beitrags ist die kundenorientierte Entwicklung von intelligenten technischen Systemen im Maschinenbau. Es wird ein 5-stufiges Vorgehensmodell zur schrittweisen und methodengestützten Konzeption von ITS vorgestellt. Hierbei werden Konzepte von ITS unter Einbeziehung des Kunden entlang des Produktentwicklungsprozesses sowie unter Berücksichtigung bestehender Unternehmensstrukturen erarbeitet.

Topics: Sustainable Product Development

Keywords: Customer-oriented Product Development, Intelligent Technical Systems, Product Design, Customer Integration

Customer-oriented development of intelligent technical systems in mechanical engineering

Andre Lipsmeier, Harald Anacker, Roman Dumitrescu, Arno Kühn
Fraunhofer Institute for Mechatronic Systems Design, Paderborn

Machinery and plant engineering companies are faced with challenges by the rapid change of markets and technologies. In addition to shortened development times and a low level of investment, the competitive intensity in the machine building industry is steadily increasing. In order to be able to assert itself in international competition in the future, the change from previously purely mechatronic systems to intelligent technical systems (ITS) has to be carried out successfully. For the profitable placement of a market performance in the competition of the machine building sector, it is no longer sufficient to pursue the classical differentiation features. It is important to place individual customer benefit at the center of value creation. The core of the contribution is the customer-oriented development of intelligent technical systems in mechanical engineering. A 5-step approach for the progressive and method-based design of ITS is presented. ITS concepts are developed taking the customer into account along the product development process as well as taking into account existing company structures.

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung

Stichworte: Industrie 4.0, Cybertronische Systeme, Modellbasierte Produktentwicklung (MBSE)

Modellbasierte Entwicklung cybertronischer Systeme in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses – Ein Vergleich mit der klassischen Produktentwicklung

Marcel Cadet¹, Tim Schulte², Thomas Dickopf³, Nicole Stephan¹, Martin Eigner³

¹Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau (KIMA); ²Schaeffler AG, Herzogenaurach; ³Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung (VPE)

In Zeiten zunehmender Digitalisierung im Maschinenbau und im Hinblick auf Industrie 4.0 steigt die Komplexität technischer Systeme stark an. Im Zuge dessen entwickeln sich mechatronische Systeme weiter zu cybertronischen Systemen, einem temporären Zusammenschluss cyber-fähiger Elemente, die durch Kommunikation und Kooperation ein gemeinsames Ziel erfüllen. Durch diese (R)Evolution sind die konventionellen Vorgehensweisen zur Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen herausgefordert und müssen überdacht und angepasst werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes mecPro² wurde ein modellbasierter Entwicklungsprozess für cybertronische Produkte und Produktionssysteme unter Verwendung der Systems Modeling Language (SysML) erarbeitet, der den Herausforderungen dieser neuartigen Systeme gerecht wird. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf einem kurzen Überblick über das Konzept in der frühen Phase der modellbasierten Entwicklung cybertronischer Produkte und zeigt, inwiefern die klassischen Entwicklungsmethodiken aus dem Maschinenbau auch für die Entwicklung komplexer Systeme nützliche Ansätze bieten und in welchen Bereichen von anderen Fachdisziplinen gelernt werden kann.

Topics: Sustainable Product Development

Keywords: Industry 4.0, Cybertronic Systems, Cyber-physical Systems, Model-based Systems Engineering (MBSE)

Model-based engineering of cybertronic systems in early phases of the development process – A comparison with classical approaches in product development

Marcel Cadet¹, Tim Schulte², Thomas Dickopf³, Nicole Stephan¹, Martin Eigner³

¹University of Kaiserslautern, Chair of Design in Mechanical Engineering (KIMA); ²Schaeffler AG, Herzogenaurach; ³University of Kaiserslautern, Institute for Virtual Product Engineering (VPE)

In times of increasing digitalization in mechanical engineering and with regards to Industry 4.0, the complexity of technical systems is escalating. In the course of the rising complexity, mechatronic systems are developing into cybertronic systems, which extend the capabilities to mutually communicate and cooperate in order to accomplish a specific collective task. Because of this (r)evolution, the conventional approaches in product development and manufacturing system planning have to be analyzed and reconsidered. To this end, within the scope of the research project mecPro², a model-based development process for cybertronic products and production systems has been developed. This development process uses the Systems Modeling Language (SysML) to cope with the challenges of this innovative systems.

This paper focuses on a brief overview of the approach in the early phases of the model-based engineering of cybertronic products. It shows that the classical methodologies in mechanical engineering offer useful contributions for the development of complex systems and in which fields mechanical engineering should learn from other disciplines.

TRACK 1: VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 1: INDUSTRIE 4.0 / CYBER-PHYSICAL PRODUCTS

10:30 – 12:00 UHR

Themen: Industrie 4.0 / Cyber-Physical Products

Stichworte: Lager, smart, Leichtbau

Smarte Leichtbaulagerung durch innovative Sensorintegration und intelligente Auswertelgorithmen

Manuel Bauer, Markus Kley, Marco Thomisch, Maximilian Hauf
Hochschule Aalen

Durch die zunehmende Relevanz des Themas Industrie 4.0 wird die Vernetzung von Komponenten immer bedeutender. Hierbei ist es wichtig die Komplexität so gering wie möglich zu halten, d. h. die Funktion durch möglichst wenige Elemente bereitzustellen. Eine Drehverbindung ist aufgrund ihrer zentralen Position bedeutend für die Vernetzung. Aufgrund des Gewichtsvorteils kommen hier Drahtwälzlager zum Einsatz. Über das Condition Monitoring hinaus werden im Rahmen dieses Projekts weitere, für die Lagerung und für das Gesamtsystem wichtige Werte erfasst. Zur Detektion der Daten werden Piezobeschleunigungssensoren verwendet. Anschließend werden die Messreihen aufbereitet, verarbeitet und ausgewertet. Aufgrund gewollter und gegebener Unregelmäßigkeiten bei einem Drahtwälzlager ist das Grundsignal berechenbar. Abweichungen von diesen Amplituden müssen erfasst und bewertet werden, damit an diesen Größen die Belastung oder die Überlast festgemacht werden können. Es ändert sich die Frequenz der Amplituden bei Drehzahländerung, bei Belastungen oder anderen Kräfteinflüssen ändert sich die Form. Hier müssen jedoch auftretende Streuungen und Überlagerungen bei den Algorithmen berücksichtigt werden.

Topics: Industry 4.0 / Cyber-Physical Products

Keywords: Intelligent Evaluation Algorithms, Wire Race Bearing, Sensor Integration, Condition Monitoring, Smart Lightweight Bearing

Smart lightweight bearing connection based on innovative sensor integration and intelligent evaluation algorithms

Manuel Bauer, Markus Kley, Marco Thomisch, Maximilian Hauf
University of Applied Sciences Aalen

Due to high distinct tendency of Industry 4.0, the collaboration of components becomes more and more important. Here it is important to keep the complexity as small as possible, i.e. to provide the function with less elements as possible. Based on its central position, a bearing connection is predestinated for using in collaboration. Due to the advantage of light-weight design, wire race bearing is used. In order to condition monitoring, the measurement devices will store all machine-related necessary data. Piezo acceleration sensors are used for measurement. Afterwards the huge number of data will be prepared and evaluated for further steps and diagnostic tasks. Based on given irregularities default signal for operation state will be created. Deviations of these default values will be recorded and evaluated, as the load or overload can be determined at these variables. Variation of the amplitudes frequency is characterized by speed changes, the shape of the amplitudes changes as a result of loads or other forces. In this case, however, scattering and overlay in the algorithms must be considered.

Themen: Industrie 4.0 / Cyber-Physical Products, Digital Engineering

Stichworte: Virtueller Zwilling, Rekonfiguration, Lifecycle Engineering

Rekonfiguration von Smarten Produkten basierend auf virtuellen Produktzwillingen

Abramovici Michael, Jens Christian Göbel, Philipp Savarino, Philip Gebus

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik

Gegenwärtige Innovationen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sind die maßgeblichen Treiber für die digitale Transformation traditioneller Produkte zu einer neuen Generation von Produkten, sogenannter „Smarter Produkte“. Dieser Wandel der Produkte geht einher mit dem Bedarf grundlegend veränderter Engineering-Prozesse. Aufgrund der charakteristischen Eigenschaften von Smarten Produkten darf die Produktentwicklung nicht mehr nur die frühen Phasen des Produktlebenszyklus fokussieren, sondern muss den gesamten Produktlebenszyklus, insbesondere die Produktnutzungsphase, berücksichtigen. Eine neue Herausforderung in diesem Kontext ist die Rekonfiguration bestehender Smarter Produkte über verschiedene Engineering-Domänen hinweg. In diesem Beitrag wird ein Ansatz für die Rekonfiguration Smarter Produkte aufgezeigt, der basierend auf dem Konzept des virtuellen Produktzwillings die dynamischen Veränderungen der virtuellen und realen Produktinstanzen in integrierter Weise berücksichtigt. Dieser Ansatz wurde in einer Modellumgebung für smarte Fahrzeuge, die während ihrer Nutzungsphase temporär rekonfiguriert werden, prototypisch implementiert und validiert.

Topics: Industry 4.0 / Cyber-Physical Products, Digital Engineering

Keywords: Reconfiguration, Smart Products, Virtual Twin, Lifecycle Engineering

Dynamic Reconfiguration as a new Engineering-Challenge in the Smart Product Lifecycle

Abramovici Michael, Jens Christian Göbel, Philipp Savarino, Philip Gebus

Chair of IT in Mechanical Engineering, Ruhr-University Bochum

Recent ICT innovations are the driver for the digital transformation of traditional products towards intelligent, connected Smart Products. These product-related changes inevitably imply the need for radically new engineering processes. Due to the characteristic properties of Smart Products, product development will no longer solely concentrate on the early phase of the product lifecycle but also on the product use phase. In this context, especially the reconfiguration of products during their use phase across different engineering domains will be a core challenge. This paper introduces a conceptual approach for the reconfiguration of Smart Products, which considers each product instance's dynamic, virtual models using the concept of virtual product twins. The conceptual approach is prototypically demonstrated and validated by considering a model environment for smart vehicles, which are temporarily reconfigured during their use phase.

TRACK 1:

VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 2:

ZUVERLÄSSIGE PRODUKTENTWICKLUNG / DIGITAL ENGINEERING

13:00 – 14:30 UHR

Themen: Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Lebensdauermodell, Zuverlässigkeitsanalyse

Anpassung bestehender Zuverlässigkeitsmethoden für eine entwicklungsbegleitende Ermittlung eines Lebensdauermodells

Jan Gröber¹, Wolfgang Gauchel¹, Peter Zeiler², Bernd Bertsche³

¹Festo AG & Co. KG; ²Hochschule Esslingen; ³Institut für
Maschinenelemente, Universität Stuttgart

In diesem Beitrag wird ein Vorgehen vorgestellt, mit welchem die Zuverlässigkeit eines neuartigen mechatronischen Systems auch für bisher unbekannte Anwendungsfälle und unterschiedliche Randbedingungen ermittelt werden kann. Kern dieses Vorgehens ist eine statistische Versuchsplanung (Design of Experiments - DoE) für die Komponenten des mechatronischen Systems. Zur erfolgreichen Durchführung des DoE müssen verschiedene Informationen erarbeitet werden. Es wird daher vorgestellt, welche Methoden sich vorbereitend auf ein DoE anwenden lassen. Weiterhin wird dargestellt, wie sich die mittels Versuchen ermittelten Informationen in einem gesamtheitlichen Ansatz der Zuverlässigkeitsanalyse zur Bestimmung eines Lebensdauermodells anwenden lassen. Hierbei werden u.a. Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulationen, sowie eine Modellierung und Simulation mit Petrinetzen vorgeschlagen. Das hier vorgestellte Vorgehen wird am Beispiel eines neuartigen mechatronischen Systems in Form einer pneumatischen Ventillinse angewendet.

Topics: Reliable Product Development

Keywords: Reliability, Mechatronics, R-DoE, Interactions

Adaptation of Existing Reliability Methods for a Development Based Determination of a Lifetime Model

Jan Gröber¹, Wolfgang Gauchel¹, Peter Zeiler², Bernd Bertsche²

¹Festo AG & Co. KG; ²Hochschule Esslingen, Faculty of Mechatronics
and Electrical Engineering; ³University of Stuttgart, Institute of
Machine Components

This paper presents a procedure that can be used to determine the reliability of a novel mechatronic system for previously unknown applications and different boundary conditions. This approach is based on Design of Experiment (DoE) for the relevant components of the mechatronic system. For the successful use of DoE, various information need to be gained. It is therefore shown, which methods can be applied in preparation of a DoE. It is presented, how the information obtained by DoE can be implemented into a holistic approach of reliability analysis with the goal to determine a lifetime model. Interactions between components of the mechatronic system are considered. Hardware-in-the-loop (HIL) simulation as well as modelling and simulation with petri nets is proposed. The procedure described is applied to the example of a novel mechatronic system in the form of a pneumatic valve terminal.

Themen: Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Simulation, Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeitstestplanung auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit

Stefan Jetter¹, Frank-Oliver Müller¹, Ralph Weller¹, Bernd Bertsche²

¹Daimler AG; ²Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart

Neue Herausforderungen in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung, vor allem durch immer leichter und komplexer werdende Konstruktionen, stellen den bislang überwiegend historisch gewachsenen Auslegungs- und Erprobungsprozess buchstäblich auf den Prüfstand. Bislang gültige Auslegungs- und Prüfprofile gilt es kritisch zu hinterfragen sowie stetig zu erweitern und zu optimieren. Neue Möglichkeiten, vor allem durch die im Zuge von Big-Data mögliche Erfassung von Kundenkollektiven, sowie verbesserte Berechnungs- und Simulationsmethoden können hierbei unterstützend eingesetzt werden. Dabei gilt es zu überprüfen, welche Betriebspunkte für eine Auslegung in Frage kommen und wie relevant diese für den Kunden sind. Durch die Überlagerung der digitalen Baustufe mit dem Kundennutzungsverhalten kann diese Fragestellung mittels eines simulativen Zuverlässigkeitsprozesses geklärt und dadurch Rückschlüsse auf die notwendigen Erprobungsprofile gezogen werden.

Topics: Reliable Product Development

Keywords: Reliability, Testing, Simulation, Operational Fatigue Strength

Reliability test plan by simulated operational fatigue strength

Stefan Jetter¹, Frank-Oliver Müller¹, Ralph Weller¹, Bernd Bertsche²

¹Daimler AG; ²Institute of Machine Components, University of Stuttgart

Light and complex constructions are new challenges in the automobile and engine development and require a review of current design and testing procedures. These have to be verified as well as further developed and optimized. Therefore new possibilities like the recording of load collectives in the field in combination with optimized simulation methods can be applied. In particular it has to be examined which operating points are relevant for the design process and if they are also suitable for the customer's driving behavior. This question can be answered by using a reliability-oriented simulation process which is based on digital tools and detailed field analyses. Thereby new approaches for the development of adapted testing profiles can be generated.

TRACK 1:

VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 2:

ZUVERLÄSSIGE PRODUKTENTWICKLUNG / DIGITAL ENGINEERING

13:00 – 14:30 UHR

Themen: Digital Engineering, Leichtbau in der Produktentwicklung

Stichworte: Topologieoptimierung, Virtueller Produktentwicklungsprozess, Designvorschlag-Bewertung

Bewertungswerkzeug zur effizienten Einbindung der Topologieoptimierung in den virtuellen Produktentwicklungsprozess

*Daniel Billenstein, Christian Dinkel, Christian Glenk, Frank Rieg
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth*

Die im virtuellen PEP integrierte Topologieoptimierung unterstützt den Produktentwickler mit einem Designvorschlag zur Neukonstruktion. Die hierbei einstellbaren Optimierungsparameter verlangen jedoch ein hohes Expertenwissen. Die oftmals zur Unterstützung herangezogene Sensitivitätsanalyse zur Identifikation von relevanten Parameterbereichen benötigt bisher im Bereich der Topologieoptimierung zusätzlich einen visuellen Vergleich der Designvorschläge durch den Produktentwickler. Das entwickelte Bewertungswerkzeug, welches die topologische Ähnlichkeit von Designvorschlägen computergestützt beurteilt, vereinfacht die Arbeit des Produktentwicklers deutlich und erlaubt ein tieferes Simulations- und Produktverständnis.

Topics: Digital Engineering, Lightweight Design within the Product Development

Keywords: Topology Optimization, Evaluation Tool, Topological Comparison, Major Topology

Evaluation tool for the efficient integration of topology optimization in the virtual product development process

*Daniel Billenstein, Christian Dinkel, Christian Glenk, Frank Rieg
University of Bayreuth, Department of Engineering Design and CAD*

Because of globalization and associated consequences companies are in need of an accelerated product development process. The latest optimization methods can lead to substantial material savings. Though the complexity of the methods often prevents their use in the industrial practice. This complexity arises for one thing from the many settings parameters of the finite element analysis and for another thing from the additional optimization variables, which require a high level of expertise of the product developer. Supporting parameter studies lead to a variety of design proposals, which have to be evaluated manually. The newly developed evaluation tool simplifies the systematic investigation of the influence parameters by comparing the topological similarity of design proposals computer-aided. The results are the relevant major topologies and in each case the corresponding parameter range. This automated evaluation of design proposals enables a better integration of the optimization in the virtual product development process.

Themen: Digital Engineering, Leichtbau in der Produktentwicklung

Stichworte: Topologieoptimierung, Prozesssimulation, Druckguss

Effiziente Entwicklung von prozessoptimalen Druckgussbauteilen durch Kombination von Topologieoptimierung und Prozesssimulation

Stefan Hautsch¹, Florian Heilmeier², Frank Rieg¹, Wolfram Volk²

¹Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth;

²Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München

Die Generierung von produkt- und prozessoptimalen Druckgussbauteilen durch eine Topologieoptimierung verspricht eine Effizienzsteigerung im Produktentwicklungsprozess, gepaart mit einer Verbesserung der Produkteigenschaften durch Formleichtbau und einer Steigerung der Prozesssicherheit. Dieses Vorgehen verlangt auf Grund der besonderen Eigenschaften der Restriktionen des Gießprozesses nach einer Koppelung von Topologieoptimierung und Prozesssimulation. Hierbei wird der Designvorschlag aus einer ersten Optimierung durch einen einzelnen Prozesssimulationsdurchlauf in Kombination mit einer schnellen geometrischen Bauteilanalyse untersucht, um Bereiche mit schlechter Füllqualität zu identifizieren. Diese Bauteilbereiche werden für einen zweiten Optimierungslauf aus dem Bauraum entfernt, wodurch das neue Ergebnis der Topologieoptimierung nicht nur ein produkt-, sondern auch prozessgerechtes Design aufweist. Das neu entwickelte Vorgehen wird an einem Anwendungsbeispiel erläutert und zeigt hier eine deutliche Reduktion der prozesskritischen Bauteilzellen bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand.

Topics: Digital Engineering, Lightweight Design within the Product Development

Keywords: Die Casting, Process Simulation, Topology Optimization, Process Optimal

Efficient design of process optimal die casting parts through combination of topology optimization and process simulation

Stefan Hautsch¹, Florian Heilmeier², Frank Rieg¹, Wolfram Volk²

¹University of Bayreuth, Department of Engineering Design and CAD, ²Chair of Metal Forming and Casting, Technical University of

Munich

The design of structural die casting components using topology optimization promises a time and resource efficient product development process. However, the development of a producible design is only possible with respect to process restrictions. Due to that, the presented approach suggests a link-up of topology optimization and process simulation. The initial optimization run is processed by a single form filling simulation in combination with a time-saving geometrical analysis, which identifies part regions with poor form filling. These regions are excluded from the design space for a second optimization run, which leads to an optimized geometry that includes process-related aspects. The new approach is exemplified and shows a distinct reduction of process critical part regions with comparatively low computing time. This promises an efficient generation of lightweight part designs with improved product features and an increase of process reliability, especially when the procedure is automated through software.

TRACK 1: VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: DIGITAL ENGINEERING

15:00 – 16:30 UHR

Themen: Konstruktionsmethodiken, Digital Engineering

Stichworte: ProVIL, LiveLab, verteilte Entwicklungsteams

ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor: Anwendungs- und Implementierungsmodell des Live-Labs

*Benjamin Walter, Albert Albers, Gernot Benesch, Nikola Bursac
Karlsruher Institut für Technologie, IPEK - Institut für
Produktentwicklung*

Im Live-Lab ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor entwickeln Studierende jährlich in Kooperation mit einem Industriepartner innovative Produktkonzepte. Es existieren hierbei drei Dimensionen: Im Sinne der Lehre zielt ProVIL auf Handlungskompetenz bei Studierenden. In der Dimension Forschung wird ProVIL als Forschungsumgebung zur Evaluierung von Methoden, Prozessen und Tools verstanden. Im Sinne der Innovationsdimension sollen die Projektergebnisse möglichst hohes Innovationspotential aufweisen. Zwischen den drei Dimensionen bestehen vielfältige Synergiepotentiale und Zielkonflikte. Im vorliegenden Beitrag wird das Live-Lab ProVIL 2016 umfangreich analysiert, um ein Implementierungsmodell für ProVIL 2017 abzuleiten. Weiterführend wird dieses Implementierungsmodell im integrierten Produktentstehungsmodell abgebildet, um daraus in Zukunft ein Referenzmodell für ProVIL entwickeln zu können.

Topics: Design Methodology, Digital Engineering

Keywords: Live-Lab, Distributed Product Development, Virtual Teams, Process Model

ProVIL – Product Development in the virtual Idea Laboratory: Application and Implementation Model of a Live-Lab

*Benjamin Walter, Albert Albers, Gernot Benesch, Nikola Bursac
Karlsruher Institute for Technology, IPEK – Institute for product
development*

In the Live-Lab ProVIL – Product development in the virtual Idea Laboratory students yearly develop innovative product concepts in cooperation with a partner from the industries. Thereby exist three dimensions: In terms of teaching ProVIL follows the goal to skill up the students. In the research dimension, ProVIL is understood as research environment to evaluate methods, processes and tools. In respect to the innovation dimension, the project results shall have as much innovation potential as possible. Between the three dimensions, large synergetic potentials and conflicts of objectives exist. In this article, the Live-Lab ProVIL 2016 is analyzed to deviate an implementation model for ProVIL 2017. The implementation model is modeled using the integrated product development model to enable the generation of a reference model for ProVIL in the future.

Themen: Konstruktionsmethodiken, Digital Engineering

Stichworte: Digitaler Produktlebenszyklus, Entwurfssprachen, Produktentwicklung

Forschungsperspektiven für die durchgängige digitale Modellierung des Produktlebenszyklus

Markus Till¹, Ralf Stetter¹, Stephan Rudolph²

¹Hochschule Ravensburg-Weingarten; ²Universität Stuttgart

Eine zentrale Herausforderung für produzierende Unternehmen ist das ganzheitliche Engineering immer komplexer werdender Produkte. Vielversprechende Ansätze entstehen aus der digitalen Abbildung von interdisziplinären Produkt- und Prozessmodellen über deren gesamten Lebenszyklus hinweg. Ziel des beschriebenen Forschungsvorhabens ist die vollständige digitale Abbildung und maschinelle Ausführbarkeit des Produktlebenszyklus. Der besondere Ansatz im beschriebenen Projekt ist die Anwendung eines Engineering-Frameworks mit sogenannten graphenbasierten Entwurfssprachen, welche die Automation und Wiederverwendung von bereits bestehenden Engineering-Modellen und Engineering-Know-how ermöglichen. Dieser Ansatz bietet eine große Anzahl von Forschungsperspektiven, welche im Forschungsprojekt anhand von drei Anwendungsfällen beleuchtet werden.

Topics: Design Methodology, Digital Engineering

Keywords: Product Life Cycle, Design Languages, Digital Modeling

Research perspectives for the continuous digital modeling of the product life cycle

Markus Till¹, Ralf Stetter¹, Stephan Rudolph²

¹University of Applied Sciences Ravensburg-Weingarten;

²University of Stuttgart

A central challenge for manufacturing companies is the holistic engineering of increasingly complex products. Multidisciplinary approaches arise from the digital representation of interdisciplinary product and process models over their entire life cycle. To explore these approaches, the Center for Applied Research (ZAFH) "Digital Product Life Cycle (DiP)" was established in Baden-Württemberg in 2015 at four universities and the University of Stuttgart; one third of which is financed by the European Regional Development Fund (ERDF) and two-thirds by the country of Baden-Württemberg. The aim of this research project is the complete digital depiction and machine executability of the product life cycle. The particular approach in the described project is the application of an engineering framework with so-called graph-based design languages, which enable the automation and reuse of already existing Engineering models and engineering know-how. This approach offers a large number of research perspectives, which are examined in the research project on the basis of three application scenarios.

TRACK 1: VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: DIGITAL ENGINEERING

15:00 – 16:30 UHR

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Konstruktive Lösungsräume, Wissensbasierte Konstruktion, Produktkonfiguration

EIN BEITRAG ZUR MODELLIERUNG KONSTRUKTIVER LÖSUNGRÄUME

Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer

Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

Heutige Werkzeuge zur rechnerunterstützten Konstruktion erlauben durch Parametrik und Feature-Technik die Beschreibung eines konstruktiven Lösungsraums, aus dem Varianten für definierte Anforderungen konfiguriert werden können. Im vorliegenden Beitrag wird die Entwicklung eines solchen konstruktiven Lösungsraumes diskutiert. Nach der Vorstellung von unterschiedlichen Konzepten und Sichtweisen auf konstruktive Lösungsräume wird ein Fallbeispiel aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung untersucht. Die Erstellung der parametrischen CAD-Modelle wird anschließend kurz dargestellt, wobei mit der Parameterraum-Matrix ein Hilfsmittel vorgestellt wird, mit dem die Planung und der Aufbau von CAD-Modellen und ihrer Parametrik unterstützt werden kann.

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Design Methodology

Keywords: Design Solution Spaces, Knowledge-Based-Engineering, Product Configuration, Parameter Planning

A CONTRIBUTION TO THE MODELLING OF DESIGN SOLUTION SPACES

Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer

Leibniz Universität Hannover, Institute of Product Development and Engineering Design

Today's tools for computer-aided design (CAD) allow the development of design solution spaces through parameterization and feature technology. From such a solution space product variants can be configured for given requirements. In the present paper, the development of such a design solution space is discussed. After the description of different concepts and perspectives on design solution spaces from literature, a case study from the field of mass customization is examined. The setup of the parametric CAD models is then briefly shown, whereby the parameter space matrix is presented as a tool to support the planning and implementation of CAD models and their parameters. In the parameter space matrix the single model parameters are listed and related to product requirements and manufacturing restrictions. Although this step seems to make parametric modelling in CAD more complicated it rather makes model planning more transparent. The effects of conflicting requirements can easily be seen and relations between multiple parameters may be described.

Themen: Digital Engineering, Lean Development

Stichworte: frühe Validierung, XiL

Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen

Sven Matthiesen¹, Thomas Gwosch¹, Michael Steck¹,
Patric Grauberger¹, Stefan Cersowsky², Sebastian Mangold¹
¹Karlsruher Institut für Technologie, IPEK - Institut für
Produktentwicklung; ²Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH

Derzeit geschieht Frontloading, also der frühe Erkenntnisgewinn, in der Produktentwicklung häufig simulativ über Berechnungstools, durch Rapid-Prototyping und durch den Einsatz von Hardware-Prüfständen. Während Simulationen oft komplexe Modelle erfordern, ist der Einsatz von Prototypen aus Rapid-Prototyping Verfahren bislang oft auf Grund der limitierten Beanspruchbarkeit sowohl in Prüfständen, als auch frühen Funktionstests nur eingeschränkt möglich. Ziel der hier vorgestellten IPEK-sCiL-Methode ist es, eine Validierungsmethode für Prototypen mit geringer Beanspruchbarkeit bereitzustellen. Der Einsatz von leistungsskalierten Prototypen soll im Vorgängerprodukt durch eine Skalierung des Leistungsflusses auf HiL-Plattformen ermöglicht werden. Die Methode wird am Beispielsystem Akkubohrschrauber zur Untersuchung von leistungsskalierten Prototypen der Sperrkörperkupplung gezeigt.

Topics: Digital Engineering, Lean Development

Keywords: Frontloading, Testing, Power-Tools, Prototypes

Frontloading in product development of power tools through early validation supported by power-scaled prototypes

Sven Matthiesen¹, Thomas Gwosch¹, Michael Steck¹,
Patric Grauberger¹, Stefan Cersowsky², Sebastian Mangold¹
¹Karlsruher Institute for Technology, IPEK – Institute for product
development, ²Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH

Frontloading is a method to gain knowledge in early stages of product development. It is currently done through calculation tools, rapid prototyping and the use of hardware test rigs. While simulations often require complex models, the use of prototypes from rapid prototyping methods in test rigs and early function testing is limited, due to their low load capacity. The aim of the presented IPEK-sCiL method is to provide a validation method for these low load capacity prototypes. The use of power-scaled prototypes in the predecessor system is enabled through scaling of the power flow on HiL-platforms. The method is shown on the example system of a cordless screwdriver with investigation of power-scaled prototypes of the overload clutch.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 1: WISSENSMANAGEMENT IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

10:30 – 12:00 UHR

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung
Stichworte: Prozessorientiertes Wissensmanagement,
Wissensmanagementmethoden, Produktentwicklungsprozess

Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess

Alexander Laukemann, Hansgeorg Binz, Daniel Roth
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD),
Universität Stuttgart

In diesem Beitrag wird ein Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess vorgestellt. Motiviert durch aktuelle Herausforderungen hinsichtlich der zielgerichteten Unterstützung von Produktentwicklungsmitarbeitern, wird ein prozessorientierter Katalog vorgestellt, der neben konventionellen Produktentwicklungsmethoden auch relevante Wissensmanagementmethoden beinhaltet. Neben dem Aufbau und dem Inhalt des Katalogs ist vor allem die auf digitalen Prozessmodellen basierende Funktionsweise als Alleinstellungsmerkmal hervorzuheben. Der an die Systematik und den Aufbau von Konstruktionskatalogen angelehnte Katalog berücksichtigt im Gliederungsteil prozessbedingte Problemfelder und verknüpft diese mit den Grundlagen des Wissensmanagements. Dies ermöglicht, Methoden der Produktentwicklung und des Wissensmanagements als mögliche Lösung eines identifizierten Problems anzubieten. Darüber hinaus fördert der Katalog die Entwicklung neuartiger Kombinationen von Wissensmanagementlösungen. Ziel des Beitrags ist es, diesen Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess als Unterstützungsmaßnahme detailliert zu beschreiben.

Topics: Knowledge Management within the Product Development
Keywords: Knowledge Management, Product Development Process, Design
Methods, Design Catalog

Catalog of knowledge management solutions for the product development process

Alexander Laukemann, Hansgeorg Binz, Daniel Roth
Institute for Engineering Design and Industrial Design,
University of Stuttgart

This contribution presents a catalog of knowledge management solutions for the product development process. Motivated by current challenges with regard to target-oriented support of product developers, a process-oriented catalog is introduced. In addition to conventional product development methods, the catalog offers relevant knowledge management methods. Besides the structure and the content of the catalog, the functionality based on digital process models represents a unique feature. The catalog, which is based on the well-known systematologies and structure of construction catalogs by Roth, provides process-related problem areas within the classifying criteria of the catalog and deals with the basics of knowledge management. This allows offering methods of product development and knowledge management as a possible solution for an identified problem. In addition, the catalog promotes the development of novel combinations of knowledge management solutions. The aim of this contribution is to describe in detail this catalog of knowledge management solutions in order to support the product development process.

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung,
Digital Engineering

Stichworte: Wissensbasierte Produktentwicklung, Wissensbasierte
Konstruktion, Knowledge Based Engineering

Die neue VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 „Wissensbasierte Konstruktion“

Thomas Luft¹, Daniel Roth², Hansgeorg Binz², Sandro Wartack¹
¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl
für Konstruktionstechnik; ²Institut für Konstruktionstechnik und
Technisches Design (IKTD), Universität Stuttgart

Ein entscheidender Faktor innerhalb des Produktentwicklungsprozesses ist der zielgerichtete und systematische Umgang mit Wissen. Das konstruktionsrelevante Wissen zu erfassen, zu formalisieren und in CAD-Systeme zu integrieren ist dabei von hohen Anforderungen geprägt. Verschiedene Methoden und Werkzeuge des „Wissensbasierten Konstruierens“ (Knowledge Based Engineering, kurz: KBE) können Konstrukteure dabei unterstützen, diese Herausforderungen erfolgreich zu bewältigen. Bislang existiert jedoch keine allgemeingültige Beschreibung zur Realisierung von KBE-Anwendungen. Daher ist die Zielsetzung des Beitrags die Vorstellung einer Vorgehensweise zur Umsetzung von KBE-Anwendungen, die sich aus den vier Phasen Planung, Entwicklung, Test sowie Betrieb einer KBE-Anwendung zusammensetzt. Zudem werden beteiligte Rollen und das Thema Wissensschutz betrachtet. Im abschließenden Kapitel erfolgen die Vorstellung grundsätzlicher (software-)technischer Lösungen zum wissensbasierten Konstruieren sowie eine konkrete Implementierung einer KBE-Systemanwendung.

Topics: Knowledge Management within the Product Development,
Digital Engineering

Keywords: Knowledge Management, Knowledge Based Engineering,
Construction Methodology, Guideline Activities

The new VDI-Guideline 5610 Sheet 2 „Knowledge Based Engineering“

Thomas Luft¹, Daniel Roth², Hansgeorg Binz², Sandro Wartack¹
¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Chair of
Engineering Design (KTmfk), ²Institute for Engineering Design and
Industrial Design, University of Stuttgart

The targeted and systematic handling of knowledge is a key factor in the product development process. When capturing and formalizing the knowledge relevant for engineering and integrating it into CAD systems one is faced with high requirements. Various methods and tools of Knowledge Based Engineering (abbr. KBE) can help designers to successfully meet those challenges. However, a generally valid description for the realization of KBE applications does not exist yet. Therefore, this paper aims to introduce a procedure for the implementation of KBE applications consisting of the following four phases: planning, development, test, and the operation of a KBE application. Furthermore, the roles involved as well as the issue of knowledge protection are considered. The final chapter introduces basic (software) technical solutions for KBE and one specific implementation of a KBE system application.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 1: WISSENSMANAGEMENT IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

10:30 – 12:00 UHR

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Konstruktionswissen, Wissensbereitstellung, Technologiebewertung

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

Keywords: Design Knowledge, Knowledge Provision, Design Guidelines, Multi Material Design

Ein Potentialmodell für die Nutzung neuer Technologien in der Produktentwicklung

David Inkermann, Sebastian Kleemann, Thomas Vietor
Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik

Die Verfügbarkeit von Wissen ist ein zentraler Erfolgsfaktor für die Produktentwicklung. Abhängig von der Entwicklungssituation sind unterschiedliche Arten von Wissen erforderlich, um neue Lösungsansätze zu erarbeiten oder Entscheidungen abzusichern. Die Akquise des erforderlichen Wissens ist dabei zeitaufwändig, weshalb in der Produktentwicklung verschiedene Hilfsmittel wie z. B. Lösungssammlungen oder Konstruktionskataloge verbreitet sind. Diese Hilfsmittel orientieren sich in ihrer Zugrifflogik vorwiegend an Produkteigenschaften oder Funktionen und unterstützen die für eine zielgerichtete Technologieauswahl erforderliche Orientierung z. B. hinsichtlich der Einflüsse auf verschiedene Lebenslaufphasen nicht ausreichend. Zur durchgängigen Unterstützung der Entwicklung wird in diesem Beitrag ein Potentialmodell vorgestellt, welches das zur Technologiebewertung und -auswahl erforderliche strategische Wissen sowie prozedurale und deklarative Wissen für die Realisierung von Lösungen verknüpft. Hierzu wird eine Wissensstrukturierung und -aufbereitung anhand von drei Ebenen vorgestellt. Struktur und Inhalte des Potentialmodells werden am Beispiel hybrider Bauweisen verdeutlicht.

A Potential-Model for Purposive Use of new Technologies within Engineering Design

David Inkermann, Sebastian Kleemann, Thomas Vietor
Technische Universität Braunschweig, Institute for Engineering Design

Availability of knowledge is a key factor for successful product development. In different development situation, different types of knowledge are required to elaborate new solutions or to assure decision making. Because acquisition of the required knowledge is often time-consuming, there are different tools like collections of solutions or design catalogues to provide the knowledge needed. The access structure and logic of these tools is normally based on product properties or functions. Therefore, the tools do not support the orientation required for suitable technology selection for instance with regard to the effects on various life-cycle phases. In order to provide comprehensive support for engineering designers, this contribution presents a potential-model containing the strategic knowledge required for the technology assessment and selection as well as procedural and declarative knowledge needed to realize the solutions. For this purpose, knowledge structuring and Preparation is presented on three levels. Structure and contents of the potential model are highlighted using multi material design as an example.

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung,
Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Wissensbasierte Konstruktion, KBE,
Konstruktionsautomatisierung

Topics: Knowledge Management within the Product Development,
Design Methodology

Keywords: Knowledge Based Design, Knowledge Based Engineering,
MOKA, CAD-Automation

ENTWICKLUNGSPROZESS ZUR WISSENSBASIERTEN PRÜFSTANDSKONSTRUKTION

Paul Christoph Gembarski¹, Tobias Wellmann², Hans-Ulrich Fleige²,
Roland Lachmayer¹

¹Leibniz Universität Hannover; ²Aerzener Maschinenfabrik GmbH

Wissensbasierte Systeme bieten vielfältige Möglichkeiten, um für ein gegebenes Konstruktionsproblem das für Konzeptauswahl, Auslegung und Ausdetaillierung zu verwendende Wissen dauerhaft zu konservieren und für zukünftige Entwicklungsaufgaben verfügbar zu machen. Im nachfolgenden Beitrag wird ein Prozess vorgestellt, mit dem ein wissensbasiertes Konstruktionssystem für einen Prüfstand zur Volumenströmmessung entwickelt worden ist. Der Prozess lehnt sich an MOKA (Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications) an, das für diese Aufgabe um eine Konzeptebene erweitert wurde.

DEVELOPMENT PROCESS FOR KNOWLEDGE-BASED TEST FACILITY DESIGN

Paul Christoph Gembarski¹, Tobias Wellmann², Hans-Ulrich Fleige²,
Roland Lachmayer¹

¹Leibniz Universität Hannover; ²Aerzener Maschinenfabrik GmbH

Knowledge-based systems offer a wide range of possibilities for permanently preserving the knowledge to be used for concept selection, dimensioning and detailing for a given design problem. This makes it not only available for future development tasks but discloses potential for design automation of either routine design tasks or the setup of configurable product components. The following article presents a development process that has been used to implement a knowledge-based design system for a volumetric flow test facility. The process is based on MOKA (Methodology and Tools Oriented to Knowledge-Based Engineering Applications), which has been extended to include a conceptual level for this task. As a result, a decision table documents the applicability of different test facility concepts regarding initial requirements. Taking this as a basis for justification the differential pressure method was chosen as measuring principle that has been implemented in the knowledge-based design system. As example for the formalization within the MOKA-cycle the measurement uncertainty analysis according to GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) is described.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 2: KONSTRUKTIONSMETHODIKEN

13:00 – 14:30 UHR

Themen: Innovations- und Technologiemanagement
Stichworte: Additive Manufacturing, Business Capabilities,
Produktentwicklung

Additive Manufacturing - Business Capabilities in der Produktentwicklung

Michelle Moisa
Universität Stuttgart, GSaME

Die Fertigungstechnologie Additive Manufacturing (AM) kann in zahlreichen Branchen zum Umbruch von Wertschöpfungsketten führen und kann in Industrieunternehmen ein wettbewerbsrelevanter Faktor sein. Der Impuls zum Einsatz entspringt oftmals forschungsnahen Unternehmensbereichen. Denn insbesondere die Produktentwicklung hat maßgeblichen Einfluss auf die Gestaltung des gesamten Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses. Unternehmen stehen jedoch vor der Fragestellung, welche Anpassungen intern und gegenüber Dritten zu treffen sind, um das Potenzial von AM wirtschaftlich und zielgerichtet nutzen zu können. Hierzu sind unterstützende Ansätze entwickelt worden, die unterschiedlichen Abstraktionsgraden und Schwerpunkten nachgehen. Für die vorliegende Arbeit bedarf es eines Ansatzes, der im Abstraktionsniveau heruntergebrochen werden kann und der sowohl für den initialen als auch den fortführenden AM-Einsatz Unterstützung bietet. Daher wird nachfolgend ein Capability (Fähigkeiten)-basierter Ansatz herangezogen, der diesen Anforderungen nachkommt. Für die Produktentwicklung werden Capabilities instanziiert, die als Basis zur Ableitung von Handlungsbedarfen dienen.

Topics: Innovation and Technology Management
Keywords: Additive Manufacturing, Business Capabilities, Product
Development, Needs for Action

Additive Manufacturing – Business Capabilities in Product Development

Michelle Moisa
University of Stuttgart, GSaME

The manufacturing technology, Additive Manufacturing (AM), can lead to radical changes of value chains and be a relevant factor of competition in industrial companies. The impulse for application often arises from divisions close to research. The product development, in particular, has substantial influence on the design of the entire product development and utilization processes.

Companies, though, face the question of which adjustments to make internally, as well as towards third parties in order to economically and purposefully use the potential of AM. For this purpose, supportive concepts were developed, which pursue various degrees of abstraction and topical focuses.

The present work demands an approach which can be broken down concerning the level of abstraction and which provides support for the initial as well as the continual application of AM. Therefore, a capability-based approach is subsequently used that meets these requirements. For the product development, capabilities are instantiated, which serve as a foundation for the derivation of needs for action.

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung,
Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Additive Fertigung, Obsoleszenzmanagement, Ersatzteil-
Identifikationsalgorithmus

Obsoleszenzmanagement unterstützt durch additive Fertigung – Von der Bauteilidentifikation bis zum fertigen Ersatzteil

*Maximilian Ley, Karsten Hilbert, Nils Buschhorn, Nicole Stephan
Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Konstruktion im
Maschinen- und Apparatebau*

Investitionsgüter, wie z. B. Nutz- und Schienenfahrzeuge sowie technische Anlagen, sind durch geringe Stückzahlen bei gleichzeitig langen Lebensdauern charakterisiert. Dies führt zu zahlreichen Herausforderungen im Obsoleszenzmanagement (OM). Hier bieten additive Fertigungsverfahren durch eine werkzeuglose, kurzfristige und bedarfsgerechte Herstellung von Bauteilen enorme Potentiale. Trotz der fertigungstechnischen Flexibilität additiver Verfahren sollte aus ökonomischen Gründen nicht jedes Bauteil additiv gefertigt werden. Um den Anwender bei der Auswahl potentiell geeigneter Bauteile zu unterstützen, wurde eine Bewertungsmethodik entwickelt und validiert. Mit dieser kann eine Aussage über die prinzipielle technisch-wirtschaftliche Eignung eines Bauteils für die additive Fertigung getroffen werden, was bereits früh im OM von Interesse ist. Des Weiteren werden die notwendigen Arbeitsschritte für die Bereitstellung von funktionsfähigen Ersatzteilen, unter Einsatz der additiven Fertigungstechnologie, aufgezeigt. Diese sind in Form einer entwickelten sowie ebenfalls validierten Prozesskette strukturiert, welche alternative Wege bei der Bauteilbereitstellung im OM beschreibt.

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Design
Methodology

Keywords: Additive Manufacturing, Obsolescence Management, Spare
Part, Identification Algorithm

Obsolescence Management supported by Additive Manufacturing – From component identification to ready-to-use spare parts

*Maximilian Ley, Karsten Hilbert, Nils Buschhorn, Nicole Stephan
University of Kaiserslautern, Chair of Design in Mechanical
Engineering*

Investment goods, such as commercial and rail vehicles as well as technical systems, are characterized by low unit numbers and long service life. This leads to numerous challenges in obsolescence management (OM). Here, additive manufacturing (AM) processes offer enormous potential thanks to a tool-free, short-term and demand-driven production of components. Despite of the manufacturing flexibility of AM processes, however for economic reasons not every component should be made additively. In order to support the user in the selection of potentially suitable components an evaluation methodology has been developed and validated. With this, a statement can be made about the basic technical-economic suitability of a component for AM. This is of high interest in the early phase of OM. In addition, the necessary process steps for the supply of spare parts, supported by AM, are presented. These are structured in the form of a developed as well as validated process chain, which describes alternative paths for part supply in the OM.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 2: KONSTRUKTIONSMETHODIKEN

13:00 – 14:30 UHR

Themen: Konstruktionsmethodiken, Leichtbau in der Produktentwicklung
Stichworte: Additive Fertigung, Strukturoptimierung, Konstruktionsprozess

Prozess zur computergestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen

Florian Weiss, Lasse Ahlgrimm, Hansgeorg Binz, Daniel Roth
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD),
Universität Stuttgart

Bei der additiven Fertigung spielt die Bauteiloptimierung wegen der damit verbundenen Material- und somit Kosteneinsparung eine besondere Rolle. Zur Durchführung einer Optimierung sind dabei mehrere Arbeitsschritte durchzuführen. In diesem Beitrag wird ein computergestützter Prozess zur Anpassung von Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen für additiv gefertigte Bauteile vorgestellt. Der Prozess ist dafür schrittweise beschrieben und wird an einem durchgängigen Beispiel veranschaulicht.

Topics: Design Methodology, Lightweight Design within the Product Development

Keywords: Additive Manufacturing, Structural Optimization, Design Methodology

Process for the computer-aided adaptation of AM-compatible solution principles to product-specific boundary conditions

Florian Weiss, Lasse Ahlgrimm, Hansgeorg Binz, Daniel Roth
Institute for Engineering Design and Industrial Design,
University of Stuttgart

In additive manufacturing, component optimization plays a special role because of the associated material and cost savings. In order to carry out an optimization, several work steps are to be carried out. This paper presents a computer-aided process for adapting solution principles to product-specific boundary conditions for additive-manufactured components. The process is described step by step and is illustrated by a continuous example.

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Anwendungsbezogene Variantenplanung, Produktentwicklung

Marktorientierte Variantenplanung als Grundlage der Produktentwicklung

*Tom Schneider, Maria Fritz, Arne Herberg, Matthias Kreimeyer
Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt;
MAN Truck & Bus AG*

Die weltweite Vernetzung im Zuge der Globalisierung gekoppelt mit den sich wandelnden Kundenforderungen nach sowohl preiswerten als auch individualisierbaren Produkten birgt neue Herausforderungen für Unternehmen und deren zukunftsorientiertes Handeln. Gerade in der Nutzfahrzeugbranche spielt die marktinduzierte Individualisierung und die daraus resultierende Variantenvielfalt eine entscheidende Rolle, da die Fahrzeuge investitionsintensive Arbeitsmaschinen darstellen, die aufgrund der zahlreichen variablen Einsatzgebiete und Aufgabenbereiche eine Vielzahl von spezifischen Anforderungen erfüllen müssen. Die Herausforderung von OEMs liegt in der Erarbeitung einer marktorientierten Variantenplanung, um sowohl schnell als auch passend auf Marktanforderungen reagieren zu können. Das Ziel ist durch marktorientierte Variantenvielfalt eine Modularisierung der Fahrzeugkomponenten und zugehöriger Prozesse zu erreichen und dadurch das komplexe System Gesamtfahrzeug in beherrschbare Bausteine zu zerlegen. Das Paper beschäftigt sich mit der Anwendung der Modular Function Deployment (MFD) Methode im Kontext einer Hinterachsentwicklung zur Etablierung der marktorientierten Variantenplanung.

Topics: Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Variant Planning, Market Orientation, Knowledge Management, Modularization

Market-oriented variant planning as the basis for product development

*Tom Schneider, Maria Fritz, Arne Herberg, Matthias Kreimeyer
University of Applied Sciences Würzburg-Schweinfurt; MAN Truck & Bus AG*

Global networking in the course of globalization coupled with changing customer requirements for both low-priced and customizable products presents new challenges for companies and their future-oriented action. Particularly in the commercial vehicle industry, the market-induced individualization and the resulting diversity of variants play a decisive role, as the vehicles represent investment-intensive machines, which have to fulfill a multitude of specific requirements due to the numerous variable fields of application and tasks. The challenge of commercial vehicle manufacturers lies in the development of a market-oriented variant planning in order to be able to react quickly and suitably to market requirements. The goal is to achieve a modular design of the vehicle components and associated processes by means of market-oriented diversity of variants and thus to disassemble the complex system of the entire vehicle into controllable building blocks. The paper deals with the Modular Function Deployment (MFD) method for the establishment of the market-oriented variant planning, which was applied to the example of a commercial vehicle axle.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: KONSTRUKTIONSMETHODIKEN

15:00 – 16:30 UHR

Themen: Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Losteilgeräusch, Doppelkupplungsgetriebe

Suche neuer Lösungsansätze zur Losteilgeräuschreduktion bei Doppelkupplungsgetrieben

Benjamin Heumesser, Bernd Bertsche

Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart

Losteilgeräusche entstehen, wenn nicht lastführende, spielbehaftete Bauteile im Getriebe, wie Losräder oder Synchronringe, durch eingeleitete Drehschwingungen angeregt werden und an ihren Spielgrenzen anschlagen. Doppelkupplungsgetriebe sind aufgrund von langen Losteilketten besonders anfällig für Losteilgeräusche. In der vorliegenden Arbeit wird am Beispiel der Losteilgeräusche bei Doppelkupplungsgetrieben eine Vorgehensweise vorgestellt, mit deren Hilfe einerseits bekannte Abhilfemaßnahmen geordnet und bewertet, andererseits aber auch gezielt neue Ansätze gegen Losteilgeräusche gesucht werden können. Die Vorgehensweise kann hierbei als eine Erweiterung bereits bekannter methodischer Konstruktionsprozesse, vor allem bei der Konzeptfindung, angesehen werden.

Topics: Design Methodology

Keywords: Concept Development, Noise Reduction, Loose Part Noises, Dual Clutch Transmission

Generation of new solutions to reduce loose part noises in dual clutch transmissions

Benjamin Heumesser, Bernd Bertsche

Institute of Machine Components, University of Stuttgart

As a matter of principle, loose part noises arise in all spur gear transmissions with several gears to shift, for example manual transmission, automated transmissions or dual clutch transmission. These noises mainly are a comfort problem. The article shows a development cycle to generate new solution approaches, using loose part noises in dual clutch transmissions as an example. The cycle is based on the combination of system elements with operating principles and a subsequent selection of promising combinations. This selection consists of successive valuation and selection on several levels. The presented cycle is designed to create solutions for problems in existing systems and can be readily adapted to other problems and other systems. The results of this cycle are solution principles and solution concepts. Therefore, the cycle can be an alternative for the first three process steps of the general approach to design of the methodological product development in VDI 2221.

Themen: Konstruktionsmethodiken, Leichtbau in der Produktentwicklung

Stichworte: Adaptive Bauwerke, Requirements Engineering, Konstruktionsmethodik

Requirements Engineering für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke

Clemens Honold, Hansgeorg Binz, Daniel Roth

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

Um im Bauwesen den immensen Ressourcenverbrauch bei gleichzeitig steigendem Bauvolumen bewältigen zu können, stellen adaptive Bauwerke einen interdisziplinären Ansatz für zukünftige Gebäude dar. Aufgrund der Komplexität dieser Bauwerke und deren Planung sind während des Planungsbeginns von Beteiligten der Architektur, dem Bauingenieurswesen und dem Maschinenbau zahlreiche Anforderungen zu identifizieren und verwalten, sodass ein spezifisches Requirements Engineering für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke erforderlich ist. In diesem Beitrag wird ein entsprechender Ansatz vorgestellt, der eingebettet in einem ganzheitlichen Planungsprozess die Planung adaptiver Bauwerke methodisch unterstützt. Der Beitrag analysiert zunächst die kontextrelevante Literatur sowie die Randbedingungen für das zu entwickelnde Konzept. Anschließend wird dieses einschließlich einer zugehörigen webbasierten Anforderungsliste für das Anforderungsmanagement vorgestellt.

Topics: Design Methodology, Lightweight Design within the Product Development

Keywords: Adaptive Buildings, Requirements Engineering, Web-based Requirements List, Multidisciplinary Processes

Requirements Engineering for planning and developing Adaptive Buildings

Clemens Honold, Hansgeorg Binz, Daniel Roth

Institute for Engineering Design and Industrial Design, University of Stuttgart

To reduce the immense consumption of resources in the building industry in times of a concurrent rising construction volume, Adaptive Buildings constitute an interdisciplinary approach to realize the next generation of buildings. At the beginning of the planning, numerous requirements have to be identified and managed by the participants from architecture, civil and mechanical engineering due to the complexity of these buildings and their planning. Consequently, a specific Requirements Engineering approach to plan and develop Adaptive Buildings is needed. This paper presents an approach which supports the planning of Adaptive Buildings integrated in a holistic planning process. First, the contribution analyses the relevant literature as well as the boundary conditions for the approach to be developed. This is subsequently described including an integrated web-based requirements list for the requirements management.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: KONSTRUKTIONSMETHODIKEN

15:00 – 16:30 UHR

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken
Stichworte: Methodenakzeptanz, Problemlösung, Methoden

Das Methodenspiel „SPALTEN Expedition“: Akzeptanzsteigerung durch Erfahrungen und Erfolgslebnisse

Nicolas Reiß, Albert Albers, Michael Janke, Fabian Popp, Nikola Bursac
Karlsruher Institut für Technologie, IPEK - Institut für Produktentwicklung

Es existieren eine Vielzahl von Methoden, die ein Produktentwickler während des ganzen Produktentstehungsprozesses einsetzen kann. Gründe dafür, dass die Methoden nicht häufig genug zum Einsatz kommen, sind eine zu geringe Transparenz über relevante, situations- und bedarfsgerechte Methoden, Defizite bei der nutzergerechten Aufbereitung der Methode und ein Mangel an Erfolgslebnissen beim Einsatz und der Anwendung von Methoden im Alltag. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der Einsatzhäufigkeit und der Akzeptanz von Methoden ist es, diese spielerisch zu erlernen und durchzuführen. Dies kann Anwendungshemmnisse abbauen und den Methodeneinsatz erhöhen. Diese neuartige Herangehensweise wird in der Literatur als "Gamification" bzw. „Game Based Learning“ beschrieben. Im Rahmen der Forschung wurde untersucht wie Methoden im kontrollierten und praxisnahen Umfeld motiviert erlernt und erlebt werden können? Hierzu wurde ein Spielkonzept entwickelt, welches das Erlernen der SPALTEN Methode unterstützt. In diesem Paper wird das Methodenspiel „Die SPALTEN Expedition“ vorgestellt und diskutiert.

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Design Methodology
Keywords: Methods, Methodacceptance, Gamification, SPALTEN Problemsolving, Game Based Learning

The methods game “SPALTEN expedition”: increase method acceptance with experience and success

Nicolas Reiß, Albert Albers, Michael Janke, Fabian Popp, Nikola Bursac
Karlsruher Institute for Technology, IPEK – Institute for product development

During product creation, product developers can apply various methods to be supported in their work and enhance the quality and efficiency of the respective processes. Even though the additional benefits and added value of the different methods have been verified in many studies, they are not used very widely due to insufficient transparency about relevant methods suitable for the specific situations and requirements, deficiencies in user friendliness, and a lacking sense of achievement during everyday use. The question is, how can methods be learned and experienced in a controlled practical environment and how can actual achievements be attained? A possible approach to increasing the frequency of application and the acceptance of methods is to learn and implement them by playing. This may reduce application obstacles and increase method application. In the literature, this novel approach is referred to as gamification. In the projects performed at the Institute of Product Engineering, a game format for method learning and experiencing was developed. It was the objective to create a learning game by means of which methods can be learned and experienced using the SPALTEN problem solving method.

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Physische Produktentwicklung, agile Methoden, Produktlebenszyklus

Topics: Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Methodical Product Engineering, Scrum, Knowledge Management, Product Development

Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses durch agile Entwicklungsmethoden

Ina Maier¹, Lisa Kurz¹, Wilhelm Bauer²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement; ²Fraunhofer IAO, Stuttgart

Bedingt durch zunehmende Globalisierung, steigende Vernetzung und höheren Wettbewerbsdruck haben Produkte eine stetig kürzer werdende Verweildauer am Markt. Um als Unternehmen wettbewerbsfähig zu bleiben, ist eine effektive, effiziente und strukturierte Entwicklung neuer Produkte unumgänglich. Der hier vorgestellte Entwicklungsansatz soll helfen, den Entwicklungsprozess physischer Produkte zu beschleunigen und zu verbessern. Der Ansatz basiert auf der in der Softwareentwicklung etablierten agilen Entwicklungsmethode Scrum. Deren Kernelemente sind die freie Aufgabenwahl durch die Mitarbeitenden, das „Jeder kann alles“-Prinzip sowie klare Rollen und Regeln. In diesem Paper werden die Möglichkeiten und Grenzen einer Übertragung der agilen Methode Scrum auf die physische Produktentwicklung betrachtet. Der Beitrag endet mit einer kritischen Diskussion und zeigt weiteres Forschungspotential auf.

Agile engineering methods: How they shorten product engineering processes

Ina Maier¹, Lisa Kurz¹, Wilhelm Bauer²

¹Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, University of Stuttgart; ²Fraunhofer IAO, Stuttgart

Caused by growing globalization, increasing connectivity and greater competitive pressure; products are subject to continuously reduced lifetime in the market. To remain competitive, companies are in an indispensable need of effective, efficient and structured methods for developing new products. This paper introduces an approach for accelerating the development process of physical products without negatively influencing factors such as costs or quality. The approach is based on the agile developing method Scrum, which is proven in the area of software engineering. Its key elements are free task selection of the development team, the principle that "anyone can do it" and clearly defined roles and regulations. This paper demonstrates the opportunities and limits of transferring the agile method Scrum to the development process of physical products. Research regarding the demands of a development method for physical products was needed and the requirements of an agile method being applied in physical product engineering are discussed. Particularly issues related to the organizational and structural demands in physical product development and its particular challenges are addressed.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND NUTZERZENTRIERTES DESIGN

SESSION 1: INNOVATIONS- UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT

10:30 – 12:00 UHR

Themen: Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Radikale Innovationen, Ideenmanagement, Produktentwicklungsprozess

Forschungsbedarf und erste Lösungsansätze im Umgang mit radikalen Innovationen im Kontext heutiger Produktentwicklungsprozesse

Thorsten Herrmann, Hansgeorg Binz, Daniel Roth

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

Von Unternehmensseite häufen sich Forderungen nach einem methodischen Vorgehensrahmen zur Ermittlung von radikalen Produktideen und zu deren Umsetzung in radikale Innovationen. Die Wichtigkeit von radikalen Innovationen und der Wunsch, diese vermehrt zu entwickeln, werden seit längerem betont. Allerdings treten bei der Fragestellung, wie radikale Innovationen umgesetzt werden können, in der Praxis gehäuft Probleme auf. Diese während der Produktentwicklung von radikalen Produktideen auftretenden Probleme werden in diesem Beitrag ausgehend von einer Literaturanalyse untersucht. Zudem gehen Experteneinschätzungen aus der industriellen Praxis in die Analyse mit ein. Auf dieser systematischen Problemanalyse basierend werden erste Lösungsansätze zum verbesserten Umgang mit radikalen Produktideen während der Produktentwicklung präsentiert, um diese Ideen erfolgreich in radikale Innovationen umsetzen zu können. Das Ziel dieses Beitrags ist es, Forschungsbedarf bezüglich der Thematik eindeutig zu beschreiben, um künftig begründete Forschungsarbeit zu betreiben, die in einer ganzheitlichen Unterstützung für die Produktentwicklung radikaler Innovationen resultiert.

Topics: Innovation and Technology Management

Keywords: Radical Innovation, Radical Product Idea, Idea Management, Product Development Process

Research needs and initial approaches to deal with radical innovations within the context of today's product development processes

Thorsten Herrmann, Hansgeorg Binz, Daniel Roth

Institute for Engineering Design and Industrial Design, University of Stuttgart

The demand for a methodical approach for the identification of radical product ideas and their transformation into radical innovations is increasing. The importance of radical innovations and the request to develop a greater number of such innovations have been emphasized for a long time. However, problems arise in business practice concerning the question how radical innovations can be implemented. These problems are investigated during the product development of radical product ideas by a detailed literature analysis. Assessments by industrial experts are also included in the analysis. Based on this systematic problem analysis, first solutions are presented to improve the handling of radical product ideas during the product development process in order to successfully transform these ideas into radical innovations. The aim of this paper is to clearly define research needs regarding this subject in order to carry out justified scientific research in the future, which should result in a holistic support for the product development of radical innovations.

Themen: Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Radikale Innovation, neue Akteurskonstellationen in F&E

Hürden und Strategien für die Realisierung radikaler Innovationen durch FuE-orientierte Organisationen

Florian Schütz

Fraunhofer IAO, Center for Responsible Research and Innovation, Berlin

Radikale Innovationen werden heute nicht nur von Seiten des Top-Managements internationaler Unternehmen gefordert, sie sind gleichermaßen das Ziel innovationspolitischer Agenden. Gänzlich neue Ansätze für Themen wie Mobilität oder Energie zu verfolgen und diese erfolgreich im Gefüge von Gesellschaft, Gesetzgeber und bestehenden Marktstrukturen umzusetzen, stellt für die Akteure des Innovationssystems jedoch keine triviale Aufgabe dar. Anhand einer empirischen Experten-Befragung in Großunternehmen, KMU, Start-ups und Forschungsorganisationen identifiziert der vorliegende Beitrag Hürden für radikale Innovationen aus der Perspektive der Innovationspraxis sowie gegenwärtige Strategien, um diese zu überwinden. Dabei weist die Untersuchung auf die hohe Bedeutung neuartiger Akteurskonstellationen im Innovationsprozess hin, um im Zusammenspiel der Organisationen und durch den Einbezug relevanter Wissensbestände die zuvor beschriebenen Hemmnisse für Radikalität zu minimieren.

Topics: Innovation and Technology Management

Keywords: Radical Innovation, Innovation Networks, New Business Models in R&D

How R&D-focused organizations can promote radical innovation – challenges and strategies

Florian Schütz

Fraunhofer IAO, Center for Responsible Research and Innovation, Berlin

While radical innovation is growing increasingly central to the agendas of both business organizations and research policy, actors within the innovation system are faced with the specific challenges of producing it, particularly in areas such as energy and transportation. To identify major barriers to radical innovation, the author of this study interviewed experts in start-ups, established business firms of every size, and research institutions. This paper presents the study's findings and proposes new approaches to promoting radical innovation based on trans-disciplinary and inter-organizational collaboration.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND NUTZERZENTRIERTES DESIGN

SESSION 1: INNOVATIONS- UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT

10:30 – 12:00 UHR

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Innovationsprozess, Erfolgsfaktoren, Leitfaden

Erfolgsfaktoren beim Innovieren – Fallstudien basierter adaptiver Leitfaden für die Textilindustrie

Heiko Matheis¹, Thomas Fischer¹, Meike Tilebein^{1,2}

¹DITF Denkendorf - Zentrum für Management Research; ²Institut für Diversity Studies in den Ingenieurwissenschaften (IDS), Universität Stuttgart

In diesem Beitrag wird ein interaktiver Leitfaden vorgestellt, der die Unternehmen der Heimtextil-Branche bei der Beschreibung, Bewertung und Bearbeitung von Entwicklungsvorhaben unterstützt und begleitet. Die Übertragbarkeit auf weitere Branchen wird durch das fallstudienbasierte Konzept sichergestellt. Ziel des Leitfadens ist es, den Entwicklungsprozess in Abhängigkeit der besonderen technischen und organisatorischen Herausforderungen der Entwicklungsvorhaben zu gestalten, um auch bei komplexen Anforderungen die Innovationsqualität zu sichern. Dabei spielt der Wissenstransfer von vergangenen erfolgreichen, aber auch erfolglosen Innovationsprojekten eine entscheidende Rolle für den Erfolg zukünftiger Innovationsvorhaben. Die ebenfalls vorgestellte Methode zur Implementierung des Leitfadens zeigt auch wie die gewonnenen Erkenntnisse und das in den jeweiligen Unternehmen entwickelte spezifische Wissen im Sinne des Wissenstransfers operativ und projektspezifisch einsetzbar gemacht werden kann.

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

Keywords: Innovation Process, Success Factors, Adaptive Guide, Story-Telling

Success Factors for Innovations – Case Study based adaptive Guide for the Textile Industry

Heiko Matheis¹, Thomas Fischer¹, Meike Tilebein^{1,2}

¹DITF, Management Research, Denkendorf; ²Institut für Diversity Studies in den Ingenieurwissenschaften (IDS), Uni Stuttgart

This paper presents an interactive guide to support and accompany home textile companies in describing, assessing and handling new product development projects. The aim of the guide is to design the development process according to specific technical and organisational features of each development project. Thus, the guide assures high innovation quality even when facing complex requirements. Therefore the guide promotes an intensive transfer of experiences made in successful and unsuccessful past projects to foster success of future innovation projects. The as well presented implementation method is independent of the sector and therefore guarantees the transferability of the case study based concept on further industry sectors. Furthermore, the implementation method is a perfect example for active knowledge management: experiences from completed projects are stored and transferred both, explicitly in the guide and implicitly via story-telling.

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung, Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Produktstrategie, Vorausschau

Zukunftsorientierte Konsolidierung von Produktportfolios

*Christian Dülme, Jürgen Gausemeier, Lisa Hannes
Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut*

Unternehmen sind mit einem Anstieg der Anzahl von Produkten bzw. Produktvarianten konfrontiert. Vielfach binden alten Produkte einen Großteil der Ressourcen. In der Folge stehen diese für wichtige Zukunftsthemen nicht zur Verfügung – eine Bereinigung des Portfolios ist unausweichlich. Aus Angst des Verlusts von Skalen- und Verbundeffekten scheuen Unternehmen jedoch oftmals die Straffung des Portfolios. Sie stehen vor der Frage, wie sie im Lichte der zukünftigen Entwicklung, unter Maßgabe möglichst geringer Umsatzverluste und möglichst hoher Kosteneinsparungen, ihr Produktportfolio bereinigen und die Ressourcen für Erfolg versprechende Produkte nutzen können.

In dem vorliegenden Beitrag wird eine Methode zur zukunftsorientierten Konsolidierung von Produktportfolios präsentiert. Kern ist eine IT-unterstützte Auswertung der technischen und marktorientierten Vernetzung der Produkte sowie eine Wettbewerbs- und Trendanalyse. Die Anwendung führt zu einer Konsolidierungs-Roadmap, die die Aufgabe unprofitabler Produkte zugunsten vielversprechender Innovationen ermöglicht.

Topics: Sustainable Product Development, Innovation and Technology Management

Keywords: Product Strategy, Product Portfolio, Product Deletion, Product Portfolio Management

Future-oriented consolidation of product portfolios

*Christian Dülme, Jürgen Gausemeier, Lisa Hannes
University of Paderborn, Heinz Nixdorf Institute*

Nowadays, companies face drastically increasing numbers of products or product variants. Often old products require intensive support. Resources are therefore tied and not available for import future themes – the consolidation of product portfolios is hence inevitable. For fear of loss of scale and scope effects companies still shy away from streamlining of the portfolio. Companies face the question: How can we clear up our portfolio in the light of future developments under the condition minimal turnover losses and cost savings and use the resources for promising products?

In this paper, we present a methodology for the future-oriented consolidation of product portfolios. Key components are an automated cross-linking-analysis from a market and a technical perspective as well as a systematic anticipation of the future relevance of products based on a trend and competitive analysis. The result is a future-oriented consolidation-roadmap, which allows for the elimination of unprofitable products in favor of promising innovations.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND NUTZERZENTRIERTES DESIGN

SESSION 2: INNOVATIONS- UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT / NUTZERZENTRIERTES DESIGN

13:00 – 14:30 UHR

Themen: Nutzerzentriertes Design, Digital Engineering

Stichworte: Informationsvisualisierung, Kundenintegration, Kundenfeedback

Topics: User Centered Design, Digital Engineering

Keywords: Information Visualization, Customer Integration, Customer Feedback, Product Design

Webbasierte Informationsvisualisierung zur frühen Kundenintegration

Maurice Preidel¹, Thomas Damerau², Rainer Stark¹

¹Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik; ²Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik

Getrieben durch die Entwicklungen der Informationstechnik, insbesondere im Bereich der Virtualisierung von Entwicklungsmodellen, sieht sich die Produktentwicklung mit steigenden Datenmengen konfrontiert. Die Fähigkeit Daten zu Information zu verdichten, zu visualisieren und mit ihnen zu interagieren gewinnt für den Entwicklungserfolg an Relevanz. Insbesondere gilt dies für neue Entwicklungsansätze wie etwa Open Innovation, denn abgegebenes Kundenfeedback kann mit steigender Informationsmenge vom Produktentwickler schlechter verwertet werden. Die geeigneten IT-Werkzeuge zur Beherrschung dieser Informationsmenge und –art fehlen derzeit. Damit Entwicklungsingenieure produktiv mit einer großen Menge an positionengebundenen Freitext-Kundenkommentaren arbeiten können, wird ein webbasiertes Software Framework (VCIVF: Virtual Customer Integration Visualization Framework) vorgestellt. Dieses Softwareframework ermöglicht Analyse der Kundenkommentare im Webbrowser direkt am 3D CAD Modell. In einer Anwenderstudie wird abschließend gezeigt, dass das VCIVF die Zeit zur Interpretation von Kundenfeedback reduziert und gleichzeitig die Interpretationsqualität erhöht.

Web-based information visualization for early customer integration

Maurice Preidel¹, Thomas Damerau², Rainer Stark¹

¹Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin, Industrial Information Technology; ²Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology

Driven by current advances in information technology ,product design is confronted with increasing data volumes. The ability to aggregate, visualize and interact with information is increasingly relevant for successful product design. This applies in particular to new development approaches, such as Open Innovation, because an increasing volume of customer feedback leads to less efficient feedback interpretation by product designers. The appropriate IT tools for mastering this amount of information and type are currently missing. Therefore a web-based software framework (VCIVF: Virtual Customer Integration Visualization Framework) is presented for product design engineers to increase productivity while working with a large number of position-based customer comments. The proposed software framework enables product designers to analyze customer feedback within the web browser - directly on the 3D CAD model. A user study finally shows that the VCIVF reduces the time for interpreting customer feedback and while increasing the interpretation quality.

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Produktspezifikation, Referenzprodukt, Variationsanteile

Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung

*Albert Albers, Simon Rapp, Clemens Birk, Nikola Bursac
Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für
Produktentwicklung*

Eine bewertete Produktspezifikation, die ausreichend viele Differenzierungsmerkmale für einen Produkterfolg vorsieht, und dennoch ein gewisses Entwicklungsrisiko nicht überschreitet, ist das Ziel der „Frühen Phase“ der Produktgenerationsentwicklung. Hierbei getroffene Entscheidungen haben einen großen Einfluss auf nachgelagerte Prozess- und Produkteigenschaften, deren Tragweiten zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung kaum abzusehen sind und folglich eine hohe Unsicherheit verursachen. Betrachtet man die „Frühe Phase“ nicht im Verständnis einer klassischen Neukonstruktion, sondern im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung, kann der reale Sachverhalt klarer beschrieben und strukturiert werden. Entsprechend wird in diesem Beitrag eine Definition der „Frühen Phase“ im Kontext der PGE eingeführt. Es wird gezeigt, wie die Struktur der „Frühen Phase“ gesteigert und die Unsicherheit auf Basis des PGE-Ansatzes mit Referenzprodukten als zentralem Element reduziert werden kann. Durch die präzisierete Beschreibung und gezieltere Gestaltung der „Frühen Phase“ verbessern sich die Grundlage für zu treffende Entscheidungen sowie die Abschätzung von deren Auswirkungen und somit deren Güte.

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

Keywords: Development Planning, Development Risk, New Development, Radical Innovation

The Early Stage of PGE – Product Generation Engineering

*Albert Albers, Simon Rapp, Clemens Birk, Nikola Bursac
Karlsruher Institute for Technology, IPEK – Institute for product development*

The “Early Stage” of the PGE – Product Generation Engineering aims at an evaluated product specification which on one hand includes a sufficient amount of differentiating characteristics for product success and on the other hand doesn’t exceed a certain development risk. Decisions which are made at this point have a great impact on following process and product characteristics; those consequences can hardly be foreseen completely resulting in a high amount of uncertainty. Looking at the “Early Stage” in terms of PGE instead of classic new construction allows for better description and structuring of the situation. With that in mind this contribution introduces a definition of the “Early Stage” in the context of PGE. Based on the PGE approach reference products serve as an essential element to enhance the structure of the “Early Stage” and reduce uncertainty. A more precise description and a more focused design of the “Early Stage” improve the basis for necessary decisions as well as for the estimation of their consequences and thus the quality of those decisions.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND NUTZERZENTRIERTES DESIGN

SESSION 2: INNOVATIONS- UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT / NUTZERZENTRIERTES DESIGN

13:00 – 14:30 UHR

Themen: Konstruktionsmethodiken, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Zielkonflikte, Maßkonzeption, Design-DNA

Zielkonfliktidentifikation zwischen Design, Technik und Ergonomie – Ein Beitrag zur Lösungsfindung am Beispiel der PKW-Maßkonzeption

Petia Krasteva², Theodoros Tzivanopoulos¹, Thomas Vietor², David Inker mann²

¹Volkswagen Konzernforschung; ²Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Identifikation fachübergreifender Zielkonflikte in der frühen Phase der Fahrzeugkonzeption. Fokussiert wird das Spannungsfeld der Entwicklungsdisziplinen Design, Technik und Ergonomie, die durch ihre Interaktion die Gestalt des Gesamtfahrzeugkonzepts wesentlich bestimmen. Ausgehend von fachspezifischen Zieleigenschaften werden bestehende Verifikationsmodelle zur Abbildung ästhetischer, technischer und ergonomischer Eigenschaften vorgestellt und die Verknüpfung dieser Modelle in etablierten Vorgehensweisen und Werkzeugen diskutiert. Hieraus wird der Handlungsbedarf zur Verbesserung der Kommunikation bspw. durch Nutzung integrierter Modelle abgeleitet. Mit dem Fokus auf Design-bestimmende Elemente und Verhältnisse und einer rudimentären PKW-Maßkettenberechnung unter Berücksichtigung ergonomischer Eigenschaften wird ein Ansatz zur Zielkonfliktidentifikation in der frühen Fahrzeugkonzeption vorgestellt. Der Ansatz wird anhand eines Fahrzeugkonzepts für das automatisierte Fahren verdeutlicht.

Topics: Design Methodology, User Centered Design

Keywords: Goal conflicts, Vehicle Conception, Vehicle Layout Conception, Design-DNA

Identification of goal conflicts between design, technology and ergonomics – an approach for consistent vehicle layout conception

Petia Krasteva², Theodoros Tzivanopoulos¹, Thomas Vietor², David Inker mann²

¹Group Research of Volkswagen; ²Institute for Engineering Design, Technische Universität Braunschweig

This contribution addresses the identification of interdisciplinary goal conflicts in the early stages of vehicle conception. For that the interactions between the developing disciplines design, technology and ergonomics are considered in order to defining a consistent shape of the overall vehicle concept. Based on technical target properties, existing verification models to present aesthetic, technic and ergonomic properties will be shown and the connection to established practices and tools will be discussed. Out of this the need for action to improve the communication, for instance by using integrated models, will be guided. Therefore a new approach for goal conflicts will be presented. It considers a combination between design determining elements and relations with a rudimentary computation of a vehicle layout conception witch also consider ergonomic properties. By using a vehicle concept for autonomous driving as an example, this approach is highlighted.

Themen: Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Emotionserkennung, User Experience, Nutzerzentriertes Design, Mensch-Maschine-Schnittstelle

Emotionserkennung im nutzerzentrierten Design für das Fahrzeuginterieur und automatisierte Fahren

Sven Bischoff¹, Christian Ulrich², Manfred Dangelmaier², Harald Widlroither², Frederik Diederichs²

¹Fraunhofer IAQ/IAT, Universität Stuttgart; ²Fraunhofer IAO

Vorgestellt wird ein Experiment mit einer Sensorplattform zur Messung von Emotionen im automobilen Kontext. Basierend auf state-of-the-art Equipment zur Emotionserkennung wurde eine Architektur für eine Plattform zur Emotionserkennung spezifiziert und für Anwendungsfälle und Emotionen im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktion im Automobil für das Fahrzeuginterieur und automatisierten Fahrmanöver getestet. Die Sensoren umfassen Gesichtsausdruck-Analyse, Kopf- und Eye-tracking, GSR, EEG und Herzfrequenzmessung. Emotionale Zielzustände waren Spaß, Freude, Ärger, Trauer, Angst, kognitiver Workload, visuelle Ablenkung, Langeweile, Komfort (ergonomisch), Vertrauen (in Automatisierung), Interessiertheit, (Un-)zufriedenheit (mit Produktmerkmalen) und Überraschung. In einer Fahrsimulatorstudie mit 30 Probanden konnten diese Emotionen mit den entwickelten Stimuli mit einer Erfolgsquote von 90% hervorgerufen werden. Viele Klassifikationsergebnisse der verschiedenen Sensoren korrelieren, die Ergebnisse zeigten jedoch keine absolute Redundanz. Mit Klassifizierungsraten von 28% erzielte Random Forest Klassifizierung die besten Ergebnisse bei der Vorhersage der Zielzustände (5% random guess).

Topics: User Centered Design

Keywords: Emotion Recognition, User Experience, User Centered Design, Human Machine Interface

Emotion Recognition in User-Centered Design for Automotive Interior and Automated Driving

Sven Bischoff¹, Christian Ulrich², Manfred Dangelmaier², Harald Widlroither², Frederik Diederichs²

¹Fraunhofer IAQ/IAT, University of Stuttgart; ²Fraunhofer IAO

In this paper an experiment with a sensor platform for measurement of emotions in the automotive context will be presented. Based on state-of-the-art equipment for emotion recognitions, an architecture for an emotion recognition sensor platform was specified and tested for specific use cases and target emotions in the context of automotive Human-Machine-Interaction (HMI) the car interior and automated driving maneuvers. The sensors include facial expression analysis, head and eye tracking, GSR, EEG and heart rate measurement.

Emotional target states are joy, pleasantness, anger, sadness, fear, cognitive workload, visual distraction, boredom, comfort (ergonomic), trust (in automation), interestedness, (dis-)satisfaction (with product features), and surprise. Within a driving simulator study with 30 participants those emotions could be evoked with the designed stimuli at 90% success rate. Many classification results of the different sensors correlate. Results revealed no absolute redundancy in different sensors. With classification rates of the 28 %, Random Forest classification achieved the best results in predicting target emotional states (5% random guess).

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND NUTZERZENTRIERTES DESIGN

SESSION 3: NUTZERZENTRIERTES DESIGN

15:00 – 16:30 UHR

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Nutzerzentriertes Design, Komplexitätsreduktion, Arbeitsumgebung

Topics: Knowledge Management within the Product Development, User Centered Design

Keywords: User Centered Design, User Interface, Complexity Reduction, Engineers Workplace

Komplexitätsreduktion durch nutzerzentrierte Gestaltung eines Arbeitsplatzes für die Produktentwicklung

Olga Lange¹, Matthias Bues²

¹IAT, Universität Stuttgart; ²Fraunhofer IAO, Stuttgart

Die Anforderungen an den Ingenieur verändern sich stetig, in erster Linie durch steigende Komplexität auf verschiedenen Ebenen des Arbeitsprozesses. Eine nutzerzentrierte Gestaltung der Arbeitsumgebung mit einer gezielten Anwenderunterstützung durch die Software-Benutzungsschnittstelle kann wesentliche Beiträge zur Reduktion dieser Komplexität leisten. Sie betrifft vor allem die Optimierung der Mensch-Computer-Schnittstelle, sowohl hinsichtlich der Art und Dimension der Informationsdarstellung als auch der nutzbaren Eingabetechniken. In diesem Beitrag werden das Konzept und die Implementierung einer nutzerzentrierten Benutzungsschnittstelle und deren Evaluation an zwei praxisrelevanten Anwendungsfällen aus den Bereichen Konstruktion und Fertigungsplanung beschrieben. Das Konzept der Benutzungsschnittstelle umfasst sowohl deren physischen Aufbau als auch deren Funktionalität. Die Evaluierung erfolgt durch den Vergleich der Geschäftsprozesse am heutigen Arbeitsplatz mit denjenigen am Extended Workdesk, mittels der Methoden Expertengespräch und Probandentest. In dieser Evaluierung konnte eine Komplexitätsreduktion statistisch nachgewiesen werden.

Complexity reduction through a user-centred designed workspace for product development

Olga Lange¹, Matthias Bues²

¹IAT, University of Stuttgart; ²Fraunhofer IAO, Stuttgart

The requirements on engineers are constantly changing, primarily through the increasing complexity at different levels of the work process. The user-centred design of workplaces with its focus on user support through software interfaces can significantly reduce this complexity, especially in the optimization of human-computer-interfaces (HCI) by influencing the type and scope of information presentation as well as the usable input technique. This paper reviews the concept, the implementation and the evaluation of a novel user interface resulting from a user-centered design process. The developed user interface concept covers the physical setup (horizontal/vertical displays) and its functionality (touch/multitouch navigation). The evaluation was carried out on two practical applications in the areas of construction and production planning, by comparing the business processes using the standard workplace of today with those using the new user interface concept. The used methods are expert discussion and user tests. Statistical analysis has provided evidence for a significant complexity reduction.

Themen: Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Persona, Zukunft, Innovation

Future Personas als Werkzeug zum Entwurf von Produkten und Dienstleistungen für den Kunden der Zukunft

Harriet Kasper, Monika Kochanowski, Maximilien Kintz, Anette Weisbecker

Fraunhofer IAO, Stuttgart

Future Personas kombinieren den Ansatz der Persona, als konkrete Darstellung von Kunden durch Archetypen, mit Megatrends – langfristigen zukünftigen Entwicklungen, die viele Lebensbereiche betreffen. Sie sind damit ein Werkzeug, um Produkte und Dienstleistungen sowohl kunden- als auch zukunftsorientiert zu entwickeln. Diese Arbeit beschreibt sowohl das Vorgehen zur Erstellung von Future Personas als auch Anwendungsmöglichkeiten und Ansätze zur Erweiterung des Konzeptes. Die konkrete Validierung im Rahmen eines Workshops sowie die Auswertung mittels Fragebogen deuten auf eine hohe Relevanz und Akzeptanz bei den Anwendern hin.

Topics: User Centered Design

Keywords: Persona, User Centered Design, Future Studies, Service Design

Future Personas – a Tool for Designing Products and Services for Future Customers

Harriet Kasper, Monika Kochanowski, Maximilien Kintz, Anette Weisbecker

Fraunhofer IAO, Stuttgart

Future personas combine the persona concept, the concretization of customers by archotyping, with megatrends – long-term future developments targeting different areas of life. They are a tool for designing products and services for the customer and the future at the same time. This is necessary due to constraints in flexibility of production as well as certain software environments and long-term business models. In this work we describe the method for creating future personas as well as their application and possible extensions. The presentation of a future persona is close to a normal persona, focusing on the understandability, comfort and applicability for product and service designers in their design process. The validation performed in a workshop and supported by a small survey show a high relevance and user acceptance of the future persona concept.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND NUTZERZENTRIERTES DESIGN

SESSION 3: NUTZERZENTRIERTES DESIGN

15:00 – 16:30 UHR

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: nutzerzentrierte Produktentwicklung, Power-Tools, Testfälle

Ansatz zur nutzerzentrierten Gesamtsystemvalidierung von Power-Tools

Sven Matthiesen, René Germann

Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

Um Kundenbedürfnissen gerecht zu werden, müssen diese bereits bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Damit dies gelingt, müssen die Bedürfnisse erfasst und in konkrete Konstruktionszielgrößen überführt werden. Aktuelle Ansätze berücksichtigen zwar den Bedarf nach anwendungsorientierten Zielgrößen geben aber keine konkreten Handlungsempfehlungen zur effizienten Erfassung der Anwendungseignung. Der vorliegende Beitrag stellt eine methodische Herangehensweise zur Erfassung der empfundenen Anwendungseignung von Power-Tools (z. B. Bohrhämmer, Winkelschleifer, etc.) vor, durch welche eine objektive und effiziente Erfassung erfolgen kann. Diese Herangehensweise wurde dabei iterativ aus den Erkenntnissen aufgebaut, welche innerhalb von Handversuchen, in über 2000 Stunden mit Testpersonen generiert wurden. Die Erkenntnisse haben gezeigt, dass eine Unterteilung der Power-Tool Benutzung in die Phasen des Kaufentscheids, der Disposition und der Markenbindung sinnvoll ist. Des Weiteren wurden geeignete Erfassungsmethoden der Anwendungseignung von Power-Tools entwickelt und vorgestellt.

Topics: Sustainable Product Development, User Centered Design

Keywords: User Centered Design, Power Tools, User-Application Suitability, Questionnaire

Approach to an objective and efficient acquisition of the subjective user-application suitability of power tools

Sven Matthiesen, René Germann

Karlsruher Institute for Technology, IPEK – Institute for product development

One main target of a product development process is to meet customers' needs. In order to achieve this goal, demands need to be detected and transmitted into specific design aims. Although current approaches consider the need for user-centered design aims, there are no concrete recommendations for an efficient detection of user-application suitability. This contribution introduces a methodical approach for the detection of subjective user-application suitability of power tools (e.g. hammer drills, angle grinder, etc.), which enables an objective and efficient detection and which includes appropriate methods for the registration of the user application suitability of power tools. The approach has been established iteratively out of the knowledge that has been gained during handheld testing of power tools in about 2000 hours with several test persons. The investigation has shown that the utilization of power tools should be separated into purchase decision phase, disposition phase and brand-bonding phase.

Themen: Altersgerechte Produktentwicklung, Nutzerzentriertes Design
Stichworte: User Experience, menschenzentrierte Gestaltung, Bedürfnisse

Positive, bedürfniszentrierte Gestaltungsprozesse am Beispiel eines virtuellen Begleiters für Senioren

Kathrin Pollmann¹, Nora Fronemann², Anne Elisabeth Krüger²,
 Matthias Peissner²

¹IAT, Universität Stuttgart; ²Fraunhofer IAO, Stuttgart

Um eine positive User Experience zu ermöglichen, werden in der menschenzentrierten Gestaltung Nutzerbedürfnisse herangezogen. Deren Erfassung und Übertragung ins Produktdesign gestalten sich in der praktischen Anwendung jedoch häufig schwierig. Im vorliegenden Beitrag werden Methoden vorgestellt, die es Produktgestaltern erleichtern sollen, Zugang zu den Bedürfnissen der Nutzer zu erlangen und diese in den Gestaltungsprozess zu integrieren. Am Beispiel der Gestaltung eines virtuellen Begleiters für Senioren werden die Vorgehensweise erläutert, Ergebnisbeispiele gezeigt und die Vor- und Nachteile diskutiert.

Wir verwenden die Methode der Erlebnisinterviews, um konkrete positive Alltagserlebnisse der Nutzer zu erfassen und daraus die zu Grunde liegenden Bedürfnisse abzuleiten. Die Interviewergebnisse dienen als Ausgangspunkt für einen Ideenworkshop, in dem basierend auf Methoden des Ansatzes Building Ideas erste Produktkonzepte entwickelt werden, die sich an den Bedürfnissen der Nutzer orientieren.

Topics: Age-appropriate Product Development, User Centered Design
Keywords: User Experience, Human Centred Design, Positive Design, User Needs

Positive, needs-centered design in practice: Creating a virtual companion for seniors based on experience interviews

Kathrin Pollmann¹, Nora Fronemann², Anne Elisabeth Krüger²,
 Matthias Peissner²

¹IAT, University of Stuttgart; ²Fraunhofer IAO, Stuttgart

In connection with human-centered design researchers often refer to user needs as a theoretical basis for promoting a positive User Experience. However, in practice, it appears to be rather difficult to identify user needs and take them into account when designing a product. This work presents methods that aid the assessment and integration of user needs into the design process. We provide a practical description of the methods and illustrate their application and benefits in the context of a project aimed at designing a virtual companion for seniors.

We use the method experience interviews to capture specific, positive experience from everyday life and extract the underlying user needs. The interview results are used as a starting point for an ideation workshop in which, based on the Building Ideas approach, we develop product ideas and concepts that address the user needs and thereby facilitate a positive User Experience.

Das Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017
wird unterstützt vom VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. und
der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung
WiGeP e. V.



WiGeP
Wissenschaftliche Gesellschaft
für Produktentwicklung

Vortrag liegt nicht vor:

Entwicklung smarterer Produkte und Service

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici

Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke

Stefan Schulz, Josef Schlattmann, Stephan Rosenthal

Technische Universität Hamburg, Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik,
Arbeitsbereich Anlagensystemtechnik und meth. Produktentwicklung, Hamburg, Deutschland
st.schulz@tuhh.de

Abstract:

In diesem Beitrag werden Konstruktionsrichtlinien und -empfehlungen für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke präsentiert. Dafür werden Standardgelenke mit bis zu drei Freiheitsgraden analysiert und in elementare geometrische Grundkörper aufgeteilt, für die allgemeine Konstruktionsrichtlinien für ihre additive Fertigung erarbeitet werden. Auf dieser Grundlage werden Gelenke in integrierter Bauweise und möglichst geringen Einsatz von Supportstruktur entwickelt und Richtlinien für deren funktionsgerechte Gestaltung formuliert.

Keywords:

additive Fertigung, Konstruktionsrichtlinien, funktionsgerechte Gestaltung, Kunststoffgelenke

1 Einleitung

Die additive Fertigung erfreut sich immer breiterer Beliebtheit. Sowohl private als auch kommerzielle Fertigungsverfahren nutzen mittlerweile den Prozess, bei dem das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird (VDI 3405 2014). Die Gründe liegen dabei in der einfachen Handhabung von 3D-Druckern, der schnellen und einfachen Erstellung von komplexen Geometrien, in der Möglichkeit der Herstellung sowohl differenziell als auch integriert gefertigter Baugruppen sowie in der Erzeugung kraft-, form- und stoffschlüssiger Verbindungen. Die additive Fertigung lässt sich als Fertigungsverfahren nach DIN 8580 in die Hauptgruppe Urformen einordnen, siehe Bild 1, wobei je nach Verfahren die Erzeugung der Geometrie aus dem festen oder aus dem flüssigen Zustand stattfindet. Aufgrund der Vielzahl an Verfahren, zu denen unter anderem das Fused Deposition Modeling (FDM) sowie die Stereolithografie (SLA) gehören, und verwendeten Materialien, von Kunststoffen über Verbundwerkstoffe bis hin zu Metallpulvern, ist eine genaue Einteilung in die Gruppen schwierig.

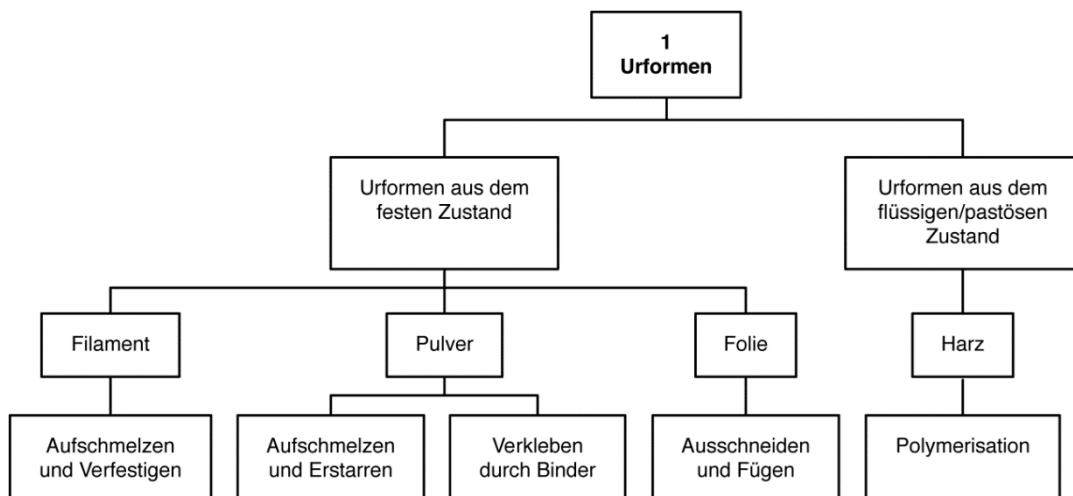


Bild 1: Einteilung der additiven Fertigungsverfahren, nach (DIN 8580)

Der Ursprung der additiven Fertigung liegt im Prototypenbau und wird von großen Unternehmen bereits seit den 1980er Jahren eingesetzt. Fertigungsmuster oder Anschauungsbeispiele, die früher kosten- und zeitintensiv hergestellt werden mussten, lassen sich heutzutage direkt mit Hilfe des vorhandenen CAD-Modells erstellen. Die additive Fertigung bietet zudem großes Potential im medizinischen Sektor, beispielsweise im Bereich des Tissue Engineering, bei dem eine poröse Knochenstruktur gedruckt wird, an der dann gesundes Gewebe anwachsen kann (Yang et al. 2002). Auch Orthesen können speziell auf den Patienten angepasst erstellt werden, sodass der Tragekomfort erhöht und der Heilungsprozess beschleunigt wird (Pröbsting und Günther 2014). Die additive Fertigung von Kunststoffbauteilen bietet sich besonders im Leichtbau an. So lassen sich beispielsweise Kardangelenke aus Faser-Kunststoff-Verbunden mit einem um 50 % niedrigeren Gewicht als Kardangelenke aus Stahl konstruieren (Bleser und Schürmann 2013).

Prinzipiell sollen Konstruktionsrichtlinien bei der Konstruktion helfen, den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden, beispielsweise der Funktionalität oder der Beanspruchung (Pahl et al. 2007). Da die additive Fertigung ursprünglich aus dem Prototypenbau stammt, werden üblicherweise Konstruktionsrichtlinien anderer Herstellungsverfahren genutzt. Um die Vorteile des additiven Fertigungsverfahrens vollständig ausnutzen zu können, müssen eigenständige, verfahrensoptimierte Konstruktionsrichtlinien entwickelt werden.

Für die additive Fertigung existieren momentan keine einheitlichen Konstruktionsrichtlinien, wobei die Geläufigsten für die additive Fertigung mit Metallpulvern existieren. Zimmer und Adam (2013) entwickelten einen verfahrensunabhängigen Katalog an Konstruktionsregeln, der experimentell an den Verfahren Lasersintern, Laserschmelzen und dem Fused Deposition Modeling erarbeitet wurde, sich aber ausschließlich auf die fertigungsgerechte Gestaltung bezieht. Weitere Konstruktionsrichtlinien für die fertigungsgerechte Gestaltung entwickelten unter anderem Schäfer (2008) für das Fused Deposition Modeling, Thomas (2009) für das Laserschmelzen, Wegner und Witt (2012) für das Lasersintern und Klahn et al. (2014) für das Lasersintern und Laserschmelzen. Kranz et al. (2015) stellen hingegen materialspezifische Gestaltungsrichtlinien vor. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung sich ausschließlich auf die fertigungsgerechte Gestaltung beziehen und meist verfahrens- oder materialspezifisch sind. Der Aspekt der funktionsgerechten Gestaltung wird bislang in der additiven Fertigung nicht behandelt. Bei der funktionsgerechten Gestaltung steht die sichere Erfüllung der Produktanforderungen, also der Funktion, im Mittelpunkt. Empfehlungen, die für eine fertigungsoptimierte Konstruktion erarbeitet wurden, müssen nicht zwangsläufig für funktionsgerechte Konstruktionen gelten. Sind bei der fertigungsgerechten Konstruktion hohe Fertigungsqualität und -geschwindigkeit sowie niedrige Kosten entscheidend, liegt beim funktionsgerechten Konstruieren das Hauptaugenmerk auf der Erfüllung der Funktion.

Als Untersuchungsobjekt bieten sich hier besonders Gelenke an, da sich diese nicht nur in differenzieller Bauweise, sondern ebenfalls in integrierter und stoffschlüssiger Bauweise konstruieren lassen, siehe (Campanile 2013) und (Raatz 2006). In nahezu jeder Konstruktion, die eine Relativbewegung ausführt oder in der sich bewegende Bauteile befinden, kommen Gelenke zum Einsatz. Gelenke ermöglichen im Allgemeinen definierte Relativbewegungen zwischen zwei Körpern und stellen gleichzeitig eine zweiseitige Bindung her (Grübler 1917, Woernle 2011). Ihre genaue Funktion ist es, die optimale Beweglichkeit in den Freiheitsgraden und gleichzeitig die optimale Kraft- und Momentübertragung in den Unfreiheitsgraden zu gewährleisten. Maßgeblich dafür sind die Berührflächen, deren Abstände groß genug sein müssen, um die Bewegungen der Bauteile zueinander zu gewährleisten und gleichzeitig gering bleiben sollen, um das Spiel in den Unfreiheitsgraden zu minimieren.

In diesem Beitrag werden daher Konstruktionsrichtlinien und -empfehlungen für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke präsentiert. Der Beitrag gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 wird das systematische Vorgehen zur Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien beschrieben und die exemplarisch verwendeten Fertigungsverfahren und -geräte vorgestellt. Der Abschnitt 3 zeigt die Analyse der Wirkflächenpaarungen von Standardgelenken, aus denen im Anschluss daran elementare geometrische Grundkörper abgeleitet werden. In Abschnitt 4 werden ausgewählte Richtlinien für Grundkörper präsentiert, die unter anderem die Basis für die in Abschnitt 5 vorgestellten Richtlinien für Gelenke darstellen. Der Abschnitt 6 fasst den Beitrag zusammen und gibt einen Ausblick über Untersuchungspotentiale.

2 Untersuchungsdesign

2.1 Vorgehen

Zur Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke wird das Top-Down-Prinzip verwendet. Dabei wird ein komplexes Problem in viele kleinere, einfachere Probleme unterteilt. Hier werden zunächst bestehende Standardgelenke analysiert und funktionale Wirkflächenpaarungen identifiziert. Im nächsten Schritt werden die Wirkflächenpaarungen auf geometrische Grundkörper überführt. Diese werden dann mit verschiedenen additiven Verfahren gefertigt und analysiert. Anhand der Resultate lassen sich Konstruktionsrichtlinien für Grundkörper ableiten, die wiederum zur Entwicklung funktionsgerechter Kunststoffgelenke verwendet werden. Diese Gelenke werden ebenfalls gefertigt, analysiert und deren Funktionalität geprüft. Zudem dienen sie als Grundlage, aus der die Konstruktionsrichtlinien für additiv gefertigte Kunststoffgelenke erarbeitet werden. Ebenfalls lassen sich aus den Erkenntnissen über Grundkörper und Gelenke die bestehenden Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung ergänzen und anpassen. In Bild 2 ist das Vorgehen zur Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke dargestellt.

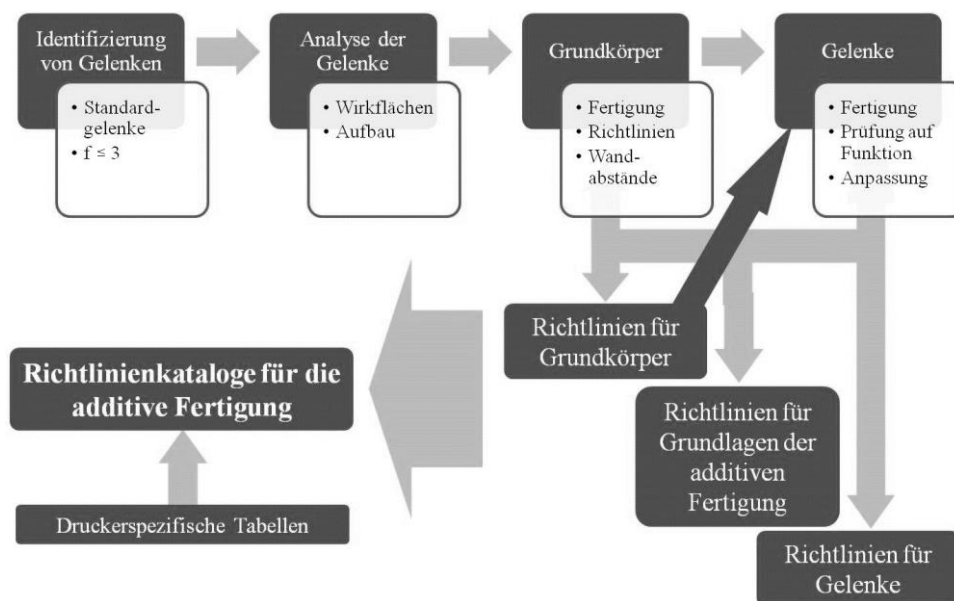


Bild 2: Vorgehen zur Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke

2.2 Fertigungsverfahren und -geräte

In der experimentellen Phase der Untersuchung werden zwei additive Fertigungsverfahren verwendet, das Fused Deposition Modeling und die Stereolithografie. Beim FDM-Verfahren wird ein strangförmiges, thermoplastisches Kunststoffmaterial aufgeschmolzen, verflüssigt und entlang der Bauteilkontur abgelegt. Beim Erstarren verbindet sich das Material mit bereits vorhandenen Schichten. In der Stereolithografie wird hingegen ein flüssiges, UV-reaktives Polymerharz durch einen Laser ausgehärtet, wobei der Laser die Bauplattform schichtweise belichtet und so das Harz entsprechend der Bauteilkontur verfestigt. Beide Verfahren besitzen ihre eigenen Vor- und Nachteile, die ausführlich in (Gebhardt 2007) aufgeführt sind.

Zur experimentellen Untersuchung werden zwei FDM-Drucker sowie ein SLA-Drucker verwendet. Als Materialien werden für das FDM-Verfahren die Kunststoffe ABS und PLA als Strangmaterial (Filament) und für das SLA-Verfahren Standardharze genutzt, wobei ausschließlich Materialien vom Hersteller verwendet werden, um den Einfluss von Materialunterschieden und -schwankungen zu reduzieren. Die Tabelle 1 zeigt die Spezifikationen der 3D-Drucker, die für die experimentellen Untersuchungen verwendet werden.

Tabelle 1: Maschinendaten

Verfahren	Maschine	Werkstoff	Parameter
Fused Deposition Modeling (FDM)	Leapfrog XEED	ABS-, PLA-Filament	Bauvolumen (mm ³): 250 × 220 × 230 Düsendurchmesser (mm): 0,35 Schichtstärke (µm): 10 - 350 max. Druckgeschwindigkeit (mm/s): 180 max. Drucktemperatur (°C): 275 max. Druckraumtemperatur (°C): 80
Fused Deposition Modeling (FDM)	3D Systems CubePro Duo	ABS-, PLA-Filament	Bauvolumen (mm ³): 243 × 220 × 270 Düsendurchmesser (mm): k. A. Schichtstärke (µm): 70 - 300 max. Druckgeschwindigkeit (mm/s): 15 max. Drucktemperatur (°C): 280 max. Druckraumtemperatur (°C): k. A.
Stereolithografie (SLA)	formlabs Form 2	Standardharze GPCL02 und GPGR02	Bauvolumen (mm ³): 145 × 145 × 175 Strahldurchmesser (µm): 140 Schichtstärke (µm): 25 - 100

3 Gelenkanalyse

Gelenke sind Modellelemente eines Mehrkörpersystems, die kinematische Bindungen zwischen zwei Körpern herstellen, wobei sich die geometrische Form der Berührelemente zeitlich nicht verändert (Woernle 2011). Nach (Reuleaux 1875) kann zwischen niedrigen Elementpaaren, sogenannten Standardgelenken, die sich entlang von Flächen berühren, und höheren Elementpaaren unterschieden werden. Zu den niedrigen Elementpaaren gehören Schraub-, Dreh- und Schubgelenke, Gelenke mit einem Freiheitsgrad $f > 1$ wie Drehschub-, Kardan- oder Kugelgelenke sowie ebene Gelenke, die sich aus Kombinationen von Dreh- und Schubgelenken zusammensetzen lassen. Höhere Elementpaare hingegen berühren sich entlang von Linien oder Punkten und werden allgemein als Getriebe bezeichnet. Die Tabelle 2 fasst die niedrigen Elementpaare, ihre Anzahl an Freiheitsgraden sowie ihre Berührfläche zusammen. Komplexe stoffschlüssige Gelenke spannen ein eigenständiges Gebiet der Gelenke auf, bei denen die beiden Körper fest miteinander verbunden sind und trotzdem, zum Beispiel aufgrund der Nachgiebigkeit des Materials, eine Bewegung zueinander ermöglichen (Campanile 2013). Für die niedrigen Elementpaare der herkömmlichen, differentiellen Fertigung aus Tabelle 2 existieren stoffschlüssige Pendants (Raatz 2006), die alle auf dem Prinzip des Filmscharniers basieren.

Tabelle 2: Niedrige Elementpaare und ihre Berührfläche (nach Woernle 2011)

Gelenktyp	Symbol	Freiheitsgrad	Berührfläche
Schraubgelenk	H	1	Schraubenfläche
Drehgelenk	R	1	Rotationsfläche
Schubgelenk	P	1	Mantelfläche eines Prismas
Drehschubgelenk	C	2	Zylindermantel
Kardangelenk	U	2	Rotationsfläche
Kugelgelenk	S	2	Kugeloberfläche
ebenes Gelenk	E	3	Ebene

Maßgeblich für die Beweglichkeit und damit die Funktionalität der Gelenke sind die Abstände zwischen den Berührflächen, die einerseits groß genug sein müssen, um eine Bewegungen zueinander zu gewährleisten und andererseits so gering wie möglich bleiben sollen, um das Spiel in den Unfreiheitsgraden zu minimieren. Für eine experimentelle Untersuchung werden daher die Berührflächen der Gelenke aus Tabelle 2 in standardisierte Grundkörper überführt. Dies erfolgt durch Extraktion der geometrischen Merkmale, ihrer Vereinfachung und ihrer Überführung in einem geometrischen Grundkörper. In Bild 3 ist dies am Beispiel des Drehgelenks dargestellt. Die funktionellen Berührflächen des Drehgelenks sind Rotationsflächen. Hinzu kommen ebene Flächen, die eine axiale Bewegung verhindern. Damit lässt sich

die Funktionalität des Drehgelenks auf den axialen und radialen Abstand runder sowie gerader Wände zurückführen, welche sich, zur besseren experimentellen Untersuchung, auf die geometrischen Grundkörper Zylinder und Quader überführen lässt. Die Tabelle 3 zeigt zusammenfassend eine Übersicht über die Standardgelenke, ihre geometrischen Merkmale und ihrer geometrischen Grundkörper.

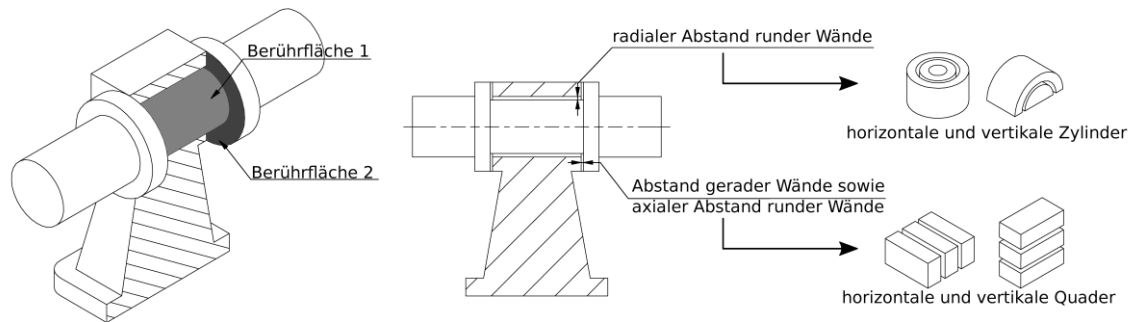


Bild 3: Überführung der Abstände der Berührflächen auf die Abstände von geometrischen Grundkörpern am Beispiel des Drehgelenks

Tabelle 3: Übersicht über Gelenke, ihre geometrischen Merkmale und ihrer geometrischen Grundkörper

Gelenke	geometrische Merkmale	geometrischer Grundkörper
Schraubgelenk	Abstand schräger Wände sowie radialer Abstand runder Wände	horizontale und vertikale Zylinder
Drehgelenk	Abstand gerader Wände sowie axialer und radialer Abstand runder Wände	horizontale und vertikale Quader und Zylinder
Schubgelenk	Abstand gerader Wände	horizontale und vertikale Quader
Drehschubgelenk	radialer Abstand runder Wände	horizontale und vertikale Zylinder
Kardangelenke	axialer und radialer Abstand runder Wände	horizontale und vertikale Zylinder
Kugelgelenk	radialer Abstand von sphärischen Wänden	horizontale und vertikale Kugelschalen
ebenes Gelenk	Abstand gerader Wände	horizontale und vertikale Zylinder

Nachdem die geometrischen Merkmale auf Grundkörper übertragen sind, können entsprechende Probekörper entwickelt werden, die einerseits das Merkmal repräsentieren und sich andererseits in bestimmten Parametern, wie zum Beispiel dem Abstand, unterscheiden. In Bild 4 sind Beispiele für Probekörper dargestellt, wobei in Bild 4 (a)-(b) Probekörper zur Untersuchung von Strukturkörpern und in Bild 4 (c)-(d) Probekörper zur Untersuchung des Abstands zwischen den Grundkörpern dargestellt sind. Diese werden mit den 3D-Druckern gefertigt und analysiert. Aus den Erkenntnissen, die aus dem Druck der Grundkörper gewonnen werden können, werden anschließend Konstruktionsrichtlinien entwickelt, welche in Abschnitt 4 zusammengefasst sind.

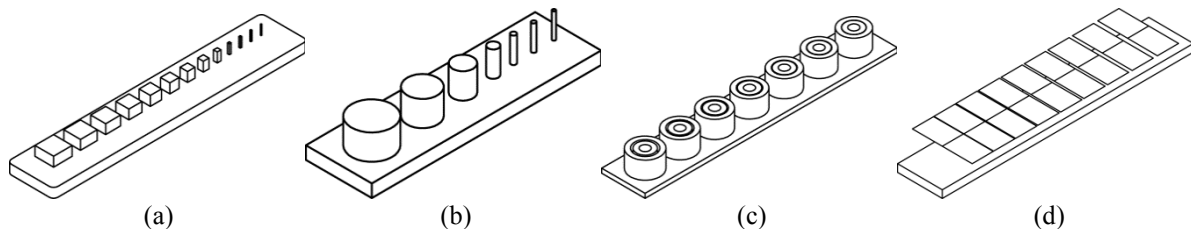


Bild 4: Auswahl an Probekörpern zur Untersuchung der geometrischen Merkmale: (a) Probekörper zur Untersuchung der minimalen Kantenlänge eines Quaders, (b) Probekörper zur Untersuchung des minimalen Zylinderdurchmessers, (c) Probekörper zur Untersuchung des minimalen Abstands vertikal orientierter Zylinder, (d) Probekörper zur Untersuchung des minimalen Abstands schräger Wände

4 Konstruktionsrichtlinien für Grundkörper

In Bild 5 sind ausgewählte Druckergebnisse der Probekörper dargestellt. Bild 5 (a)-(c) zeigt Ergebnisse der FDM-Drucker, Bild 5 (d) Ergebnisse des SLA-Druckers. Die gedruckten Probekörper weisen unterschiedliche Fehler und Fertigungsrestriktionen auf, die zur Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien verwendet werden. Beispielsweise zeigen sich beim Probekörper zur Untersuchung des minimalen Abstands horizontal orientierter Zylinder Ablagefehler und Einfallstellen, die auf einen zu großen Überhang während des Druckens hinweisen. Ein weiteres Ergebnis ist, dass benachbarte Wände unterhalb eines Mindestabstands verschmelzen, da beispielsweise beim FDM-Verfahren eine hohe Drucktemperatur notwendig ist, die zu einer Teilverflüssigung abgelegter Filamente führt.

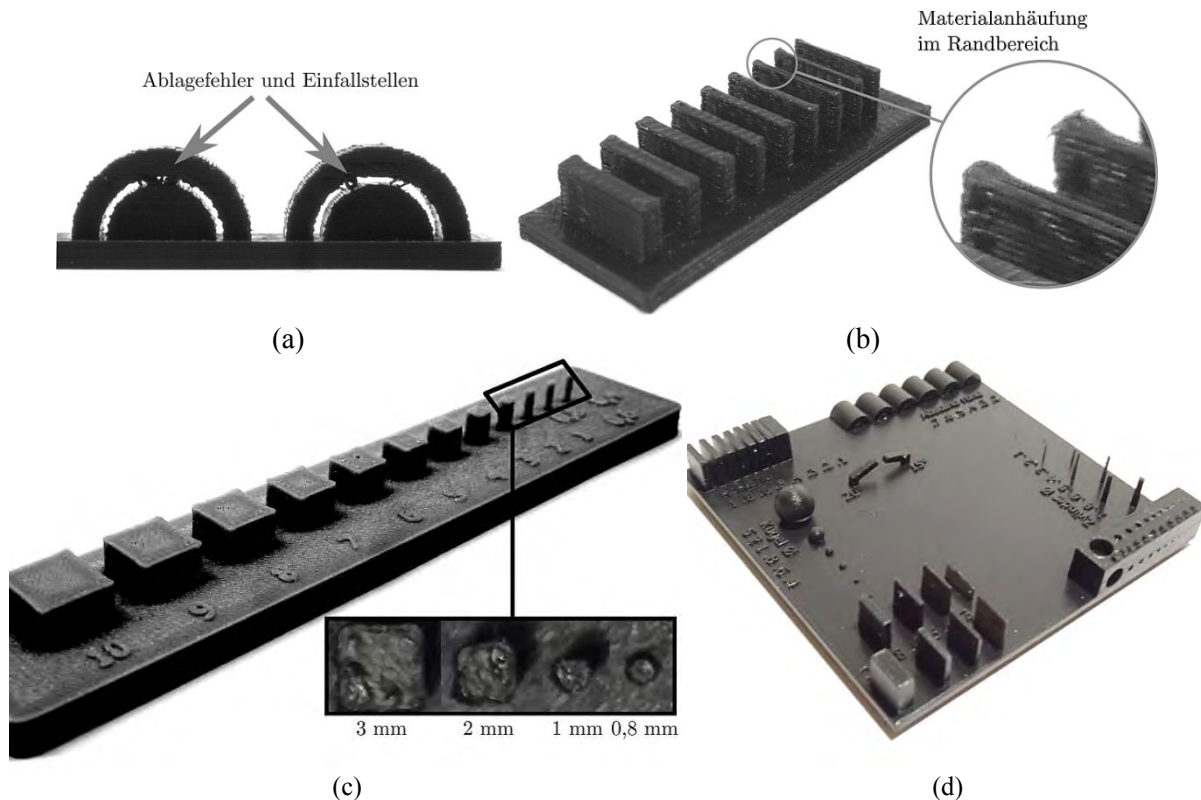


Bild 5: Auswahl an Druckergebnissen der Probekörper: (a) Probekörper zur Untersuchung des minimalen Abstands horizontal orientierter Zylinder, (b) Probekörper zur Untersuchung der minimalen Wandstärke, (c) Probekörper zur Untersuchung der minimalen Kantenlänge eines Quaders, (d) Probekörper zur Untersuchung der geometrischen Merkmale am SLA-Drucker

Anhand dieser Ergebnisse lassen sich allgemeine, verfahrensunabhängige Konstruktionsrichtlinien ableiten. Eine Zusammenfassung aller erarbeiteten Konstruktionsrichtlinien für Grundkörper ist im Anhang I zu finden. Am Beispiel der minimalen Wandstärke soll die Entwicklung der Konstruktionsrichtlinien erläutert werden. Die im Test gedruckten Wandstärken zwischen 0,4 mm und 2 mm werden unter den Aspekten Maßhaltigkeit, Form und Stabilität bewertet. Die gedruckten Wände weisen dabei durchweg ein Übermaß auf, wobei die Druckergebnisse der FDM-Drucker eine fünf- bis zehnfach stärkere Abweichung aufweisen als die des SLA-Druckers. Bei den FDM-Verfahren ergeben sich Materialanhäufungen im Randbereich, sodass die Abweichung für sehr dünne Wände stark ansteigt. Beim SLA-Verfahren hingegen werden sehr gleichmäßige Formen und Abweichungen erreicht, unter einer Stärke von 0,2 mm jedoch verbiegen sich die Wände bereits beim Druck. Zusammenfassend lässt sich für die minimale Wandstärke festhalten, dass freistehende Wände eine minimale Wandstärke s aufweisen müssen, da kleinere Wandstärken entweder zu instabil sind oder bereits in der Druckvorbereitung vom Slicer nicht mehr abgebildet werden können. Ähnliches gilt für quaderförmige Körper, die sich unterhalb einer minimalen Kantenlänge k aufgrund fehlenden Materials nicht mehr formgetreu wiedergeben lassen, sodass Quader zu Zylinder verschwimmen.

5 Konstruktionsrichtlinien für Gelenke

Anhand der erarbeiteten Konstruktionsrichtlinien für Grundkörper werden im nächsten Schritt funktionsgerechte Gelenke entwickelt, die in integrierter Bauweise gedruckt werden. Konkret bedeutet dies, dass die Gelenke bereits funktionsfähig aus dem Drucker entnommen werden. Für die Gelenke gelten folgende Anforderungen:

1. Realisierung eines möglichst großen Bewegungsspielraums in den Freiheitsgraden des Gelenks, das heißt, dass ein maximaler Schwenkwinkel, beziehungsweise eine maximale Verschiebung, zu ermöglichen ist.
2. Realisierung einer möglichst kleinen Beweglichkeit in den Unfreiheitsgraden des Gelenks, das heißt, dass zum einen enge Toleranzen eingestellt werden, sodass ein minimales Spiel erreicht wird, und zum anderen, dass möglichst eine große Reaktionskraft der Bewegung in den Unfreiheitsgraden gegenübergestellt wird.
3. Erzeugung einer möglichst hohen Oberflächenqualität, da die Oberflächengüte Einfluss auf die Reibung und den Verschleiß zwischen den bewegten Teilen des Gelenks hat.
4. Minimierung der Supportstruktur, sodass die Nachbearbeitung minimiert und die Oberflächenqualität optimiert werden kann.

Im Folgenden wird am Beispiel des Drehgelenks die Überführung eines klassisch gefertigten Gelenks hin zur konstruktiven Ausführung unter Anwendung der Konstruktionsrichtlinien für additiv gefertigte Grundkörper demonstriert. Bild 6 zeigt den Entwicklungsprozess vom klassisch gefertigtem Drehgelenk (a) über den ersten Prototypen (b) bis hin zum finalen Prototypen eines additiv gefertigten Gelenks (c). Das klassisch gefertigte Drehgelenk besitzt Überhänge an den Funktionsflächen und weist keine günstige Druckausrichtung auf. Beim ersten Prototypen in Bild 6 (b) wird die radiale Führung durch gerade Wände übernommen, das heißt durch den Abstand zwischen dem Innen- und dem Außenteil. Die axiale Führung des Gelenks erfolgt über schräge Wände im mittleren Teil des Bauteils. Dieser Prototyp weist jedoch eine sehr große Berührfläche auf, wodurch das Risiko des Verschmelzens erhöht wird und größere Abstände zwischen den Flächen notwendig werden. Der Prototyp in Bild 6 (c) besitzt im Vergleich dazu eine sehr geringe Berührfläche, da diese, aufgrund der bauchigen Ausführung des Mittelteiles, nur auf dem oberen und unteren Teil des Gelenks verteilt sind. Die radiale und axiale Führung wird von schrägen Flächen unter einem Winkel von 45° ausgeführt. Der erlaubte Drehfreiheitsgrad lässt sich noch erweitern, indem der Drehzahl- und Drehmomentabgriff beispielsweise wie im klassischen Drehgelenk statt in der Mitte an den äußeren Seiten erfolgt.

Demnach lässt sich für die funktionsgerechte Gestaltung von additiv gefertigten Drehgelenken Folgendes festhalten. Zum einen sollte die axiale und radiale Führung möglichst durch schräge Wände erfolgen, die einem Winkel von mindestens 45° zur Bauplattform aufweisen sollte. Zum anderen sollte die funktionserfüllende Wirkfläche möglichst klein gestaltet werden, um das Risiko der Verschmelzung benachbarter Wände zu reduzieren. Der Abstand zwischen den schrägen Wänden ist maschinenspezifisch und liegt in diesem Fall bei 0,4 mm.

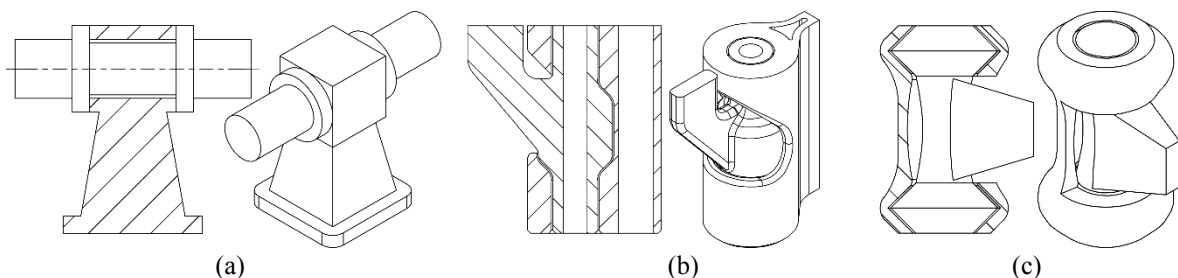


Bild 6: Vergleich zwischen einem klassisch gefertigten Drehgelenk (a) mit den Entwürfen eines additiv gefertigten Gelenks unter Berücksichtigung der Konstruktionsrichtlinien für additiv gefertigte Grundkörper (b) - (c).

Genau wie das entwickelte Drehgelenk, lassen sich alle weiteren Standardgelenke für die additive Fertigung optimieren und Richtlinien für deren funktionsgerechte Gestaltung ableiten. Die Konstruktionsrichtlinien für Gelenke sind im Anhang II zusammengefasst. Bild 7 zeigt eine Auswahl an additiv gefertigten Standardgelenken.

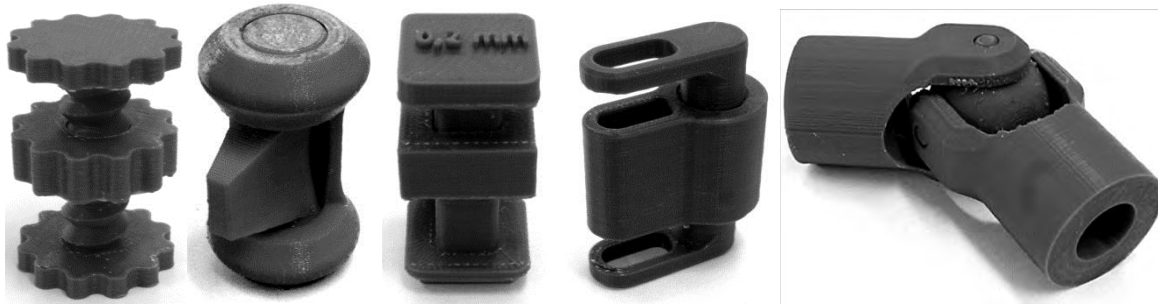


Bild 7: Auswahl an additiv gefertigten Standardgelenken

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Analyse von Standardgelenken hinsichtlich ihrer geometrischen Grundkörper, wurden in diesem Beitrag Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke präsentiert, die in integrierter Bauweise und mit minimalen Einsatz von Supportmaterial gefertigt sind. Dabei wurde die Funktionalität der Gelenke auf die Qualität der Berührflächen zurückgeführt, wobei die Aspekte Materialwahl, Oberflächengüte und Druckauflösung vernachlässigt wurden.

Insgesamt ist festzustellen, dass Größe und Komplexität der Berührflächen einen Einfluss auf deren notwendigen Abstand haben. Gelenke mit geringer Fläche und geringer Komplexität, wie zum Beispiel das Schubgelenk, benötigen für ihre Funktionalität einen geringeren Abstand zwischen den Berührflächen als Gelenke mit großer Berührfläche und hoher Komplexität, wie zum Beispiel das Drehgelenk.

Literatur

- Bleser und Schürmann 2013 BLESER, Wolfgang; SCHÜRMAN, Helmut: *Zur konstruktiven Gestaltung von Kardangelenken aus Faser-Kunststoff-Verbunden*. In: *Konstruktion* 7/8 (2013), S. 70–74.
- Campanile 2013 CAMPANILE, Flavio: *Gelenke einmal anders*. In: *Konstruktion* 9 (2013), S. 70–73.
- Gebhardt 2007 GEBHARDT, Andreas: *Generative Fertigungsverfahren - Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing*. 3. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2007
- Grübler 1917 Grübler, Martin: *Getriebelehre: Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebenen Mechanismen*. 1. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 1917.
- Klahn et al. 2014 KLAHN, Christoph; LEUTENECKER, Bastian; MEBOLDT, Mikro: Design for Additive Manufacturing – Supporting the Substitution of Components in Series Products. In: *Procedia CIRP* 21 (2014), S. 138–143.
- Kranz et al. 2015 KRANZ, Jannis; HERZOG, Dirk; EMMELMANN, Claus: *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4*. In: *Journal of Laser Applications* 27 (2015), S14001-1–16.
- Pahl et al. 2007 PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- Pröbsting und Günther 2014 PRÖBSTING, Johannes; GÜNTHER, Norbert: *Generative Fertigungsverfahren in der Orthopädie-Technik*. In: *Orthopädie Technik* 1 (2014), S. 1–4.
- Raatz 2006 RAATZ, Annika: *Stoffschlüssige Gelenke aus pseudo-elastischen Formgedächtnislegierungen in Parallelrobotern*. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Dissertation, 2006.

Reuleaux 1875 REULEAUX, Franz: *Theoretische Kinematik: Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens, Band 1*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1875

Schäfer 2008 SCHÄFER, Robert: *Design Guidelines for Rapid Prototyping*. Hochschule Bremen, Masterarbeit, 2008.

Thomas 2009 THOMAS, Daniel: *The development of design rules for selective laser melting*, University of Wales, Dissertation, 2009.

VDI 3405 2014 VDI 3405 Dezember 2014. Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen.

Wegner und Witt 2012 WEGNER, Andreas; WITT, Gerd: *Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern*. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik* 8 (2012), Nr. 3, S. 253–277.

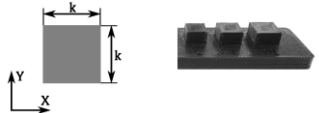
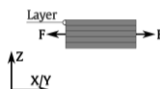

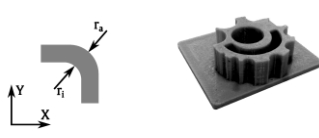
Woernle 2011 WOERNLE, Christoph: *Mehrkörpersysteme: Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper*. 1. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 2011.

Yang et al. 2002 YANG, Shoufeng; LEONG, Kah-Fai; DU, Zhaohui; CHUA, Chee-Kai: *The Design of Scaffolds for Use in Tissue Engineering. Part II. Rapid Prototyping Techniques*. In: *Tissue Engineering* 8 (2002), Nr. 1, S. 1–11

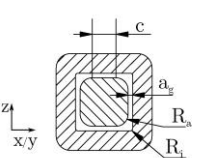

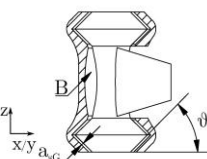

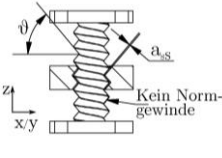

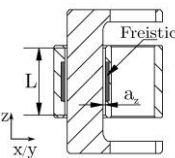

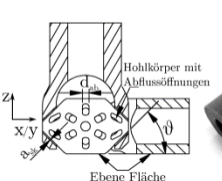

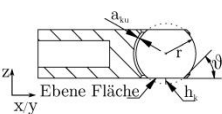

Zimmer und Adam 2013 ZIMMER, Detmar; ADAM, Guido A. O.: *Konstruktionsregeln für Additive Fertigungsverfahren*. In: *Konstruktion* 7/8 (2013), S. 77–82.

Anhang I - Konstruktionsrichtlinien für Grundkörper

Name	Erklärung	Abbildung
Wandstärke	Freistehende Wände müssen eine minimale Dicke s aufweisen. Kleinere Dicken sind entweder zu instabil oder werden vom Slicer nicht mehr abgebildet. Xeed: $s \geq 0,4$ mm, CubePro: $s \geq 0,8$ mm, Form2: $s \geq 0,3$ mm	
Abstand gerader Wände	Um ein Verschmelzen benachbarter Wände zu vermeiden, muss ein minimaler Abstand a eingehalten werden. Xeed: $a \geq 0,4$ mm (ABS), $a \geq 0,2$ mm (PLA), CubePro: $a \geq 0,2$ mm, Form2: $a \geq 0,2$ mm	
Abstand schräger Wände	Schräge Wände unter einem Winkel von 45° zur Fertigungsebene müssen zueinander einen Mindestabstand von a_s haben, um nicht zu verschmelzen. Xeed: $a_s \geq 0,5$ mm, CubePro: $a_s \geq 0,8$ mm, Form2: $a_s \geq 0,3$ mm	
Abstand horizontal ausgerichteter Zylinder	Horizontal orientierte Zylinder müssen einen Mindestabstand von a_{zh} zueinander haben, um Relativbewegungen zu ermöglichen. Auf der Unterseite ist Supportmaterial erforderlich. Xeed: $a_{zh} \geq 0,6$ mm, CubePro: $a_{zh} \geq 1$ mm, Form2: $a_{zh} \geq 0,5$ mm	
Abstand vertikal ausgerichteter Zylinder	Vertikal orientierte Zylinder müssen einen Mindestabstand von a_{zv} haben, um eine Relativbewegung zu ermöglichen. Xeed: $a_{zv} \geq 0,3$ mm, CubePro: $a_{zv} \geq 0,4$ mm, Form2: $a_{zv} \geq 0,5$ mm	
Zylinderdurchmesser	Der Mindestdurchmesser von Zylindern parallel zur z-Achse beträgt d_a . Xeed: $d_a \geq 0,6$ mm, CubePro: $d_a \geq 1$ mm, Form2: $d_a \geq 0,6$ mm	
Zylinderinnendurchmesser	Zylinderförmige Öffnungen senkrecht zur Fertigungsebene müssen einen Mindestdurchmesser d_i aufweisen. Kleinere Durchmesser verschließen sich. Genaue Öffnungen sollten angedeutet und aufgebohrt werden. Beim SLA-Verfahren spielt die Orientierung keine Rolle. Xeed: $d_a \geq 2$ mm, CubePro: $d_a \geq 2$ mm, Form2: $d_a \geq 0,3$ mm	

<p>Kantenlänge eines Quaders</p>	<p>Die minimale Kantenlänge von Objekten beträgt k. Unterhalb einer Kantenlänge k verlieren die Quader ihre Form und verschwimmen zu Zylindern. Xeed: $d_a \geq 2$ mm, CubePro: $d_a \geq 3$ mm, Form2: $d_a \geq 0,3$ mm</p>	
<p>Fertigungsrichtung</p>	<p>Die Fertigungsrichtung sollte so gewählt werden, dass auftretende Kräfte quer zur Fertigungsrichtung, also in Spurablagerichtung, angreifen.</p>	
<p>Überhangwinkel</p>	<p>Ungestützte Überhänge dürfen einen Winkel von α nicht unterschreiten. Kleinere Winkel müssen mit einer Supportstruktur versehen werden. Xeed: $\alpha \geq 45^\circ$, CubePro: $\alpha \geq 40^\circ$, Form2: $\alpha \geq 19^\circ$</p>	
<p>Ecken</p>	<p>Spitze Ecken sind zu vermeiden und mit einem Radius R_a bzw. R_i zu versehen. Dies gilt für außen- und innenliegende Ecken. Xeed: $R_a = R_i \geq 1$ mm, CubePro: $R_a = R_i \geq 1$ mm, Form2: $R_a = R_i \geq 1$ mm</p>	

Anhang II - Konstruktionsrichtlinien für Gelenke

Name	Erklärung	Abbildung
<p>Schubgelenk</p>	<p>Außenliegende Ecken sind mit großem Radius, innenliegende Ecken mit minimalem Radius zu versehen, d.h. $R_a > R_i$. Eine Rotation ist durch die Berührflächen auszuschließen, die möglichst orthogonal zur Bauplattform orientiert sein und einen Abstand von mindestens a_g aufweisen sollten.</p>	 
<p>Drehgelenk</p>	<p>Die axiale Verschiebung sollte durch schräge Wände unter einem Winkel ϑ sowie einem Mindestabstand von a_{sG} blockiert werden. Die Berührfläche ist möglichst klein zu entwerfen. Bei nicht funktionskritischen Flächen können große Abstände vorsehen werden.</p>	 
<p>Schraubgelenk</p>	<p>Normgewinde sind integriert nicht zu fertigen. Eigene Gewinde sollten einen Flankenwinkel von $2 \cdot \vartheta$ haben. Der Abstand zwischen Schraube und Mutter sollte a_{sS} betragen. Beim FDM-Verfahren sollte die Schraubachse in z-Richtung orientiert sein.</p>	 
<p>Drehschubgelenk</p>	<p>Der Abstand der Zylinderwände sollte a_z betragen. Die Berührfläche L sollte möglichst klein gehalten werden, dazu kann zusätzlich ein Freistich erzeugt werden, sodass nur an den Enden eine Berührung erfolgt. Eine Fertigung sollte so erfolgen, dass die Zylinderachsen in Richtung der z-Achse zeigen.</p>	 
<p>Kardangeln</p>	<p>Das Kardangeln sollte im zusammengeklappten Zustand gefertigt werden. Ein Kontakt aller Gelenkpartner mit der Druckplattform ist anzustreben. Der Abstand der Gelenkflächen sollte mindestens a_{sk} betragen und konisch unter einem Winkel ϑ erfolgen. Beim SLA-Verfahren sollte das Kardankreuz als Hohlkörper mit Öffnungen d_{ab} ausgeführt sein.</p>	 
<p>Kugelgelenk</p>	<p>Kugelpfanne als auch Kugelkopf sollten auf der Druckplattform aufliegen. Vom Kugelkopf sollte eine Kugelkappe mit der Höhe $h_k = 0,3 \cdot r$ abgeschnitten werden.</p>	 

Kundenorientierte Entwicklung von intelligenten technischen Systemen im Maschinenbau

Andre Lipsmeier, Harald Anacker, Roman Dumitrescu, Arno Kühn

¹Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Paderborn, Deutschland
Andre.lipsmeier@iem.fraunhofer.de

Abstract:

Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus werden durch den **rasanten Wandel von Märkten und Technologien** vor Herausforderungen gestellt. Neben **verkürzten Entwicklungszeiten** und einer **geringen Investitionsbereitschaft** der Kunden steigt die **Wettbewerbsintensität** in der Maschinenbaubranche stetig. Um sich im internationalen Wettbewerb zukünftig behaupten zu können, gilt es den **Wandel** von bislang rein **mechatronischen Systemen** hin zu **intelligenten technischen Systemen (ITS)** erfolgreich zu vollziehen. Für die gewinnbringende Platzierung einer Marktleistung im Wettbewerb der Maschinenbaubranche reicht es nicht mehr aus, die klassischen Differenzierungsmerkmale zu verfolgen. Es gilt den **individuellen Kundennutzen** in den Mittelpunkt der Wertschöpfung zu stellen. Kern des Beitrags ist die **kundenorientierte Entwicklung von intelligenten technischen Systemen im Maschinenbau**. Es wird ein **5-stufiges Vorgehensmodell** zur schrittweisen und methodengestützten Konzeption von ITS vorgestellt. Hierbei werden Konzepte von ITS unter Einbeziehung des Kunden entlang des Produktentwicklungsprozesses sowie unter Berücksichtigung bestehender Unternehmensstrukturen erarbeitet.

Keywords: Kundenorientierte Produktentwicklung, Intelligente technische Systeme, Produktkonzipierung

1 Einleitung

Produkte des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus behaupten sich seit jeher erfolgreich im internationalen Wettbewerb. Die Differenzierungsmerkmale sind dabei die Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte sowie die erfolgreiche Erschließung neuer Bearbeitungsverfahren. Um die Spitzenposition im internationalen Wettbewerb auch zukünftig besetzen zu können, müssen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus die Chancen der steigenden Leistungsfähigkeit von Informations- und Kommunikationstechniken (IKT) für das eigene Produkt- und Serviceportfolio nutzen. Die Durchdringung der IKT in dem Maschinen- und Anlagenbau sowie in verwandten Branchen eröffnet dabei faszinierende Perspektiven, die weit über die heutigen Standards hinausgehen. Perspektivische Ziele sind fortgeschrittene mechatronische Systeme, sogenannte Intelligente Technische Systeme (ITS), die z.T. global untereinander vernetzt sind, eigenständig agieren und ihr Systemverhalten situationsspezifisch optimieren können (Dumitrescu, 2010). Intelligente Technische Systeme zeichnen sich demnach durch vier zentrale Eigenschaften aus. Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzerfreundlich (Dumitrescu, 2010). Das technologische Konzept der ITS basiert auf der Grundstruktur eines mechatronischen Systems: Sie bestehen aus einem Grundsystem, Sensorik, Aktorik sowie der Informationsverarbeitung. Entsprechende Bestandteile interagieren in einem Regelkreis (VDI2206). Den „Schlüssel zur Intelligenz“ von ITS und damit das wesentliche Differenzierungsmerkmal zu rein mechatronischen Systemen stellt die Informationsverarbeitung dar. (Gausemeier et al., 2013). Vor diesem Hintergrund wird das „Internet der Dinge“ die wichtigste Plattform zur Kommunikation. Der letztgenannte Aspekt lässt die steigende Komplexität sowie die Bedeutung der Interdisziplinarität durch die notwendige Involvierung unterschiedlichster Stakeholder innerhalb der Entwicklung von ITS erkennen. Eine besondere Relevanz wird hierbei der Einbeziehung des Kunden entlang des Produktentstehungszyklus von ITS beigemessen. Im Zuge zunehmender Individualisierung von Massenprodukten, steigenden Kundenanforderungen und volatilen Nachfrageverhalten greift die bloße Erarbeitung von Qualitäts- und Technologievorsprüngen durch die reine

Adaption von IKT zu kurz. Es gilt nicht die technisch möglichen Lösungen zu realisieren. Vielmehr sind spezifische Lösungen für den kundenindividuellen Anwendungsfall zu entwickeln. Dazu sind die individuellen Belange der Kunden und Endkunden durch den kontinuierlichen Abgleich von Kundenanforderungen und Produktfunktionen entlang der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Diesem Verständnis folgend gilt es das zu entwickelnde ITS in seiner Gesamtheit in den Mittelpunkt der Entwicklung zu stellen. Hierzu wird eine durchgängige modellbasierte Systementwicklung erforderlich. Unter Verwendung eines interdisziplinären Systemmodells wird ein einheitliches Verständnis über das zu entwickelnde System erzeugt. Dabei repräsentiert das Systemmodell alle relevanten Eigenschaften des Systems und wird über den gesamten Lebenszyklus verwendet. Vielversprechende Ansätze für die interdisziplinäre Beschreibung technischer Systeme sind Systems Engineering (SE) und Model Based Systems Engineering (MBSE). SE ist ein interdisziplinärer Ansatz für die erfolgreiche Realisierung von mehr oder weniger komplexen Systemen (INCOSE 2007). Dabei wird die Komplexität technischer Systeme durch die Erzeugung von Transparenz in Form eines interdisziplinären Systemansatzes reduziert. MBSE basiert auf einem Systemmodell, das eine ganzheitliche Sicht auf das System ermöglicht. Die Abstraktion des realen Systems auf ein abstraktes Systemmodell hilft, ein gemeinsames Verständnis des Systems zu schaffen. Darüber hinaus bildet das Systemmodell eine Plattform um Anforderungen im gesamten Produktlebenszyklus zu kommunizieren und zu verfolgen (INCOSE 2007).

Neben der erforderlichen Interdisziplinarität und Kundenorientierung besteht eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung von ITS in der Wettbewerbsorientierung. Neue, global aufgestellte Player induzieren starke, oftmals disruptive Veränderungen in dem engen Korsett bestehender Märkte. Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus müssen die Zielmärkte neuer ITS daher unter Berücksichtigung vorhandener Unternehmensressourcen sorgfältig sondieren, um neue ITS mit nachhaltigem Erfolg im Markt platzieren zu können.

In Summe sind bei der Entwicklung von ITS die Handlungsfelder der Interdisziplinarität, Kundenorientierung und Wettbewerbsorientierung zu erschließen. Im Folgenden wird ein interdisziplinärer Ansatz vorgestellt, welcher die kunden- sowie wettbewerbsorientierte Entwicklung von ITS adressiert. In Kapitel 2 erfolgt einleitend das Präzisieren der Problematik der kundenorientierten Produktentwicklung. Kapitel 3 liefert den Stand der Technik, wo Ansätze und Vorgehensmodelle zur kundenorientierten Produktplanung und Entwicklung sowie das Systems Engineering und Model-Based-Systems-Engineering diskutiert werden. Gegenstand von Kapitel 4 ist ein Vorgehensmodell zur kundenorientierten Entwicklung Intelligenter Technischer Systeme. Die Validierung des Modells erfolgt phasenweise am Beispiel einer Werkzeugmaschine. Die Zusammenfassung des Beitrags erfolgt in Kapitel 5.

2 Ausgangssituation und Handlungsfeld

Unternehmen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus müssen durch den „Market Pull“ ihrer Zielmärkte zunehmend individuellere Produkte bei kürzer werdenden Produktlebenszyklen entwickeln und vermarkten. Der simultane „Technology Push“ hingegen wird durch die stetige Leistungssteigerung sowie Durchdringung der IKT in dem Maschinen- und Anlagenbau repräsentiert. In der Vergangenheit zeichneten sich die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus vor allem durch mechanische Komponenten aus. Heutzutage basieren diese Produkte jedoch auf einem engen Zusammenspiel verschiedener Disziplinen, wodurch eine zunehmende Komplexität der technischen Systeme und deren Entwicklung induziert wird. ITS ermöglichen eine Reihe neuer Dienste und Funktionen. Der wesentliche Befähiger für die Möglichkeiten der Funktionserweiterung ist die Integration von Software (Kagermann et al., 2013). Aufgrund der Schwerpunktverlagerung von mechatronischen Komponenten auf Softwarekomponenten greifen domänenspezifische Ansätze zur Produktentwicklung zu kurz.

Die Entwicklung von ITS muss den Fokus auf das enge Zusammenspiel von mechanischen und elektronischen Komponenten und insbesondere auf die Software legen. In diesem Zusammenhang kann die Verwendung einer ganzheitlichen Sicht auf das System die Entwicklung von ITS unterstützen. Ein geeigneter Ansatz für eine ganzheitliche Betrachtung eines Systems ist Systems Engineering (SE) (Haberfellner et al., 2012). Das Konzept des SE umfasst eine ganzheitliche Betrachtung eines Systems, um das Systemverständnis zu stärken und eine komplexe Entwicklungsaufgabe effizient lösen zu können. Ein modellbasierter Systementwurf (MBSE) adressiert die ganzheitliche Beschreibung und

Analyse eines Systems auf Basis von Modellen. Diese werden bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung erstellt und über den gesamten Produktlebenszyklus verwendet. Unter Verwendung von Modellierungssprachen wie SysML oder CONSENS kann der Einsatz von MBSE und SE die interdisziplinäre Entwicklung von ITS flankieren. Neben der Interdisziplinarität verlangt die Entwicklung von ITS effiziente sowie systematische Ansätze entlang des Produktentstehungsprozesses. Bei der Umsetzung einer strukturierten und effizienten Produktplanung und -entwicklung sind in vielen deutschen Maschinenbauunternehmen jedoch Defizite vorhanden. Häufig mangelt es an einer systematischen und zielgerichteten Vorgehensweise zur Planung und Entwicklung neuer Produkte. TRISCHLER/ ROMBERG sehen bei der Produkt- und Technologieentwicklung in den deutschen Maschinenbauunternehmen wesentliche Defizite. In Bild 1 sind die Defizite von Entwicklungsprojekten im deutschen Maschinen- und Anlagenbau ersichtlich.

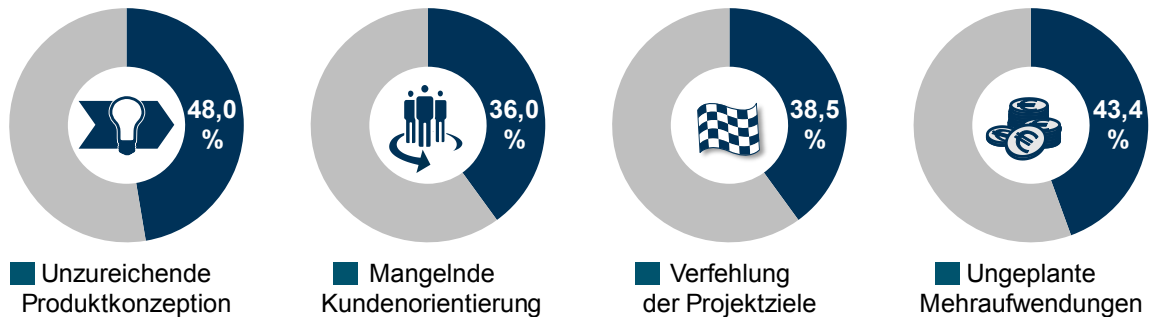


Bild 1: Defizite von Projekten im deutschen Maschinen- und Anlagenbau (Trischler und Romberg, 2015)

ROMBERG führt diese Unzulänglichkeiten auf isolierte, technologieinduzierte sowie subjektive Arbeitsweisen in den Forschungs-, Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen zurück (Romberg, 2010). Vor diesem Hintergrund wird die Relevanz einer systematischen Marktorientierung deutlich (Slater und Naver, 1998) (Steinhoff, 2006). Als substantieller Kern der **Marktorientierung** werden in dem Ansatz nach NAVER/ SLATER u.a. die Elemente der Kundenorientierung und Wettbewerbsorientierung verstanden (Slater und Naver, 1998).

Als umfassende **Kundenorientierung** wird nach HAMEL UND PRAHALD die Nutzung von unartikulierten Bedürfnissen bedienter und nicht bedienter Kunden definiert (Hamel und Prahalad, 1995). WECHT unterteilt die Kundenorientierung in 3 verschiedenartige Elemente mit unterschiedlichem Aktivitätsgrad des Kunden innerhalb der Produktentstehung: Kundenbeobachtung, Kundenbeteiligung und Kundenintegration (Wecht, 2006). Nach Studien von SPÄTH UND ZAHN besitzt die Kundenorientierung eine hohe Relevanz am Unternehmenserfolg (Späth und Zahn, 2003). Infolgedessen muss der Fokus nicht auf den Nachweis der Notwendigkeit einer Kundenorientierung gelegt werden. Vielmehr gilt es eine adäquate Umsetzung der Kundenorientierung auszuführen. Der Nutzen für die Unternehmen hängt in vielen Fällen direkt von der Umsetzung der Kundenorientierung ab (Späth und Zahn, 2003). ENKEL verweist auf diverse Risiken, mit denen eine enge Kundenorientierung verbunden ist (Enkel, 2006). Neben der Gefahr des Wissensverlustes und -übermittlung an Wettbewerber sind Missverständnisse, Abhängigkeiten vom integrierten Kunden und die Entwicklung von Nischenprodukten als Risiken einer zu eng verstandenen Kundenorientierung zu nennen (Enkel, 2006).

Neben der Kundenorientierung bildet die **Wettbewerbsorientierung** nach dem Ansatz von NAVER/ SLATER ein weiteres Handlungsfeld der Marktorientierung. Hierzu sehen die Autoren Wettbewerbsvorteile als Grundlage für ein erfolgreiches unternehmerisches Handeln (Slater und Naver, 1998). Wettbewerbsvorteile werden von PLINKE als Fähigkeit eines Anbieters gesehen, nachhaltig effektiver und/ oder effizienter als seine aktuellen oder potentiellen Konkurrenten zu sein (Plinke, 1995). In Abhängigkeit von den verfügbaren Ressourcen sind für das zu betrachtende Unternehmen geeignete Stoßrichtungen zur Positionierung in der Wettbewerbsarena zu wählen. Dabei ist die unternehmensspezifische Begrenztheit der Ressourcen zu berücksichtigen (Daum et al., 2010). Die Wettbewerbsorientierung liefert Handlungsoptionen, wie sich ein Unternehmen in einer Wettbewerbsarena positionieren kann, um das gewählte Zielkundensegment zu erreichen. Als Ausgangspunkt zur Ableitung dieser Handlungsoptionen gelten sowohl die heutigen Geschäftsaktivitäten des Unternehmens als auch die Charakteristika der Wettbewerbsarena. Ferner ist zu analysieren, welche Möglichkeiten dem Unternehmen mit der gegenwärtigen Struktur zur Verfügung stehen. Bezugnehmend auf die Entwicklung von ITS ist den folgenden Herausforderungen zu begegnen: **Interdisziplinäre, modellbasierte**

Konzeptentwicklung sowie die **systematische Kunden- und Wettbewerbsorientierung** unter Berücksichtigung der **unternehmens-spezifischen Ressourcen**. Die Entwicklung kunden- und wettbewerbsorientierter ITS-Konzepte mit Hilfe des Systems Engineering Ansatzes ist Gegenstand des nachstehenden Kapitels.

3 Stand der Technik

Eine erfolgreiche Transformation von reinen mechatronischen Systemen hin zu ITS erfordert ein interdisziplinäres Systemverständnis von allen an der Entwicklung beteiligten Personen sowie eine Orientierung an den Einflussgrößen der Kunden und des Wettbewerbs. Für die Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme wie ITS bildet das interdisziplinäre Systemverständnis dabei das wesentliche Fundament für alle erforderlichen Entwicklungsschritte.

Ein fachdisziplinübergreifendes Vorgehensmodell zur Entwicklung mechatronischer Systeme ist das V-Modell nach der VDI-Richtlinie 2206 (VDI2206). Unter Verwendung eines flexiblen Leitfadens beschreibt das V-Modell die logische Abfolge der wesentlichen Teilschritte zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Dargestellt wird der Entwicklungsprozess als generisches Vorgehen, welches fallspezifisch auszuprägen, d.h. an die jeweilige Entwicklungsaufgabe anzupassen ist (VDI2206). Weitere Ansätze zur Erzeugung eines interdisziplinären Systemverständnisses für alle beteiligten Stakeholder sind das Systems Engineering (SE) und Model-Based Systems Engineering (MBSE). Der Einsatz von Model-Based Systems Engineering ermöglicht durch die Fokussierung auf ein Systemmodell eine ganzheitliche, domänenübergreifende Sicht auf das System. Dabei bildet das Systemmodell die Basis für Kommunikation und Kooperation verschiedener Stakeholder in einem multidisziplinären Projektumfeld. Mit einer Beschreibung der Systemaspekte durch die Verwendung geeigneter Diagramme wird die Gesamttransparenz gesteigert. Eine Kombination aus einer Modellierungsmethode wie z.B. SysMod mit einer Modellersprache (z.B. SysML (Alt, 2012)) definiert, welche Aspekte im Systemmodell zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus legt die jeweilige Kombination fest, welche Diagramme für die Beschreibung des Systems zu verwenden sind. Die Wirkstruktur ist dabei einer der Hauptaspekte fast aller MBSE-Ansätze. Sie beschreibt alle Systemelemente (Software und Hardware) sowie deren Beziehungen (z.B. Energie- oder Informationsfluss) und Wechselwirkungen untereinander. In der Literatur existieren diverse **Ansätze für Modellierungssprachen**. OPM nach DORI ist bspw. eine Modellierungssprache, welche sowohl aus graphischen als auch textbasierten Bausteinen besteht (Dori, 2002). Weitere Sprachen sind bspw. die UML, die SysML oder auch die CONSENS-Sprache (Weilkiens, 2006). Bezugnehmend auf die Modellierungsmethode sind bspw. die FAS-Methode, SYSMOS oder auch OOSEM zu nennen (Lamm und Weilkiens, 2010) (Weilkiens, 2006). METUS und CONSENS sind in diesem Kontext als Spezifikationstechniken anzuführen, d.h. dass zu einer Vorgehensweise eine eigene Sprache definiert wurde. Das interdisziplinäre Systemmodell kann dabei sowohl als Basis zur Kommunikation zwischen den verschiedenen Fachabteilungen eines Unternehmens als auch zur Verständigung mit dem Kunden genutzt werden.

Für die **Kundenorientierung** in der Produktplanung und -entwicklung existieren diverse Ansätze in der Literatur; ein Auszug ausgewählter Methoden wird nachstehend aufgeführt. Ein intuitives Prognoseverfahren auf der Grundlage von Expertenbefragungen ist die Delphi-Methode. Hierbei wird ein Expertenkollektiv über ein mehrstufiges Befragungsverfahren zu einem Thema befragt (Vorgriessler und Wübben, 2003). VON HIPPEL hat mit der Lead User-Methode einen qualitativen Marktforschungsansatz entwickelt, dessen Grundlage die Expertise von besonders innovativen Anwendern bildet. Lead User werden in die frühen Phasen des Innovationsprozesses eingebunden und tragen demzufolge wesentlich zur Entwicklung innovativer Lösungskonzepte bei (Hinterhuber et al., 2006). Eine weitere Methode der Marktforschung zur Erfassung von Kundenpräferenzen ist die Conjoint-Analyse. Hierzu steht die empirische Erhebung von Präferenzaussagen im Vordergrund der Methodenentwicklung (Gausemeier et al., 2001). Zur kundenintegrierten Planung und Entwicklung von neuen Produkten ist die Verwendung von Toolkits for Open Innovation möglich; diese generieren als virtuelle Designwerkzeuge einen direkten Kommunikationskanal zwischen dem Kunden und dem Unternehmen (Gelbrich und Souren, 2009) (Büttgen, 2012). Ein weit verbreiteter Ansatz zur Einflussermittlung von Produktmerkmalen auf die Kundenzufriedenheit ist das KANO-Modell. Unter der Verwendung des KANO-Modells werden die an Produktmerkmale gestellten Anforderungen in

Beziehung zu der Kundenzufriedenheit gesetzt (Partsch, 2010). Das Quality Function Deployment gilt als Methode zur gezielten Transformation der Kundenanforderungen in technische Produktspezifikationen. Das Kernelement der QFD-Methode, die Beziehungsmatrix, stellt die Relation zwischen dem kundenseitigen Verlangen und dem produktspezifischen Erfüllungsgrad dar (Brüggemann und Bremer, 2012).

Neben der Einbeziehung der Kunden in die Produktentstehung sind die unternehmensspezifischen Ressourcen zur Definition von adäquaten Zielkundensegmenten im Rahmen einer **Wettbewerbsorientierung** zu strukturieren und zu analysieren. Dazu können verschiedene Ansätze verfolgt werden. Zur Strukturierung der gegenwärtigen Geschäftstätigkeit eines Unternehmens gilt es die Schwerpunkte bzw. Hauptgeschäftsfelder zu identifizieren. Diese Identifikation der Hauptgeschäftsfelder kann mittels Marktleistungs-Marktsegmente-Matrizen erfolgen (Gausemeier und Plass, 2014). Um sowohl die markt- als auch technologieorientierte Bewertung einer Geschäftseinheit durchzuführen, kann das integrierte Markt-Technologie-Portfolio nach MCKINSEY angewendet werden (Gausemeier und Plass, 2014). Die Anwendung einer SWOT-Analyse basiert auf einer tabellarischen Verknüpfung zwischen der internen Betrachtungsweise der Stärken und Schwächen des betrachteten Unternehmens und der externen Sicht auf Chancen und Risiken des Unternehmensumfeldes (Daum et al. 2010).

In Summe existieren verschiedene Ansätze für die Entwicklung von ITS, der Erstellung von interdisziplinären Systemmodellen sowie zur Einbeziehung des Kunden und der unternehmensspezifischen Ressourcen in die Produktentwicklung. Diese Ansätze liefern wichtige Bausteine zur Entwicklung von ITS, jedoch mangelt es an einer geeigneten Verzahnung von etablierten Vorgehensweisen wie bspw. der VDI2206 oder dem MBSE mit der systematischen Einbeziehung des Kunden in den Produktentstehungsprozess. Aus der dargelegten Problematik ergibt sich der Bedarf für ein Vorgehensmodell zur interdisziplinären, kunden- und wettbewerbsorientierten Entwicklung von ITS-Konzepten. Hieraus ergibt sich die folgende Zielsetzung: Ein Vorgehensmodell zur Verzahnung von etablierten Ansätzen und Methoden zur Analyse der unternehmensspezifischen Ausgangssituation und des Wettbewerbsumfelds mit der interdisziplinären Systembeschreibung sowie mit der kontinuierlichen Einbeziehung des Kunden. Dabei wird auf erprobte sowie etablierte Ansätze und Methoden wie bspw. CONSENS und die SWOT-Analyse zurückgegriffen, um die Praxistauglichkeit des Vorgehensmodells zu gewährleisten.

4 Vorgehensmodell

Im Folgenden wird ein Vorgehensmodell für kundenorientierte Entwicklung von ITS vorgestellt. Es besteht aus fünf aufeinander aufbauenden Phasen (Bild 2). Grundlage bildet die Strukturierung der gegenwärtigen Geschäftssituation (Phase 1), gefolgt von der Definition der zukünftigen Situation (Phase 2). In der dritten Phase werden Anforderungen an das zukünftige Produkt erhoben, welche darauffolgend in ITS-Konzepte überführt werden (Phase 4). Das Vorgehensmodell schließt mit der systematischen Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Konzepte (Phase 5). Validiert wird das Vorgehensmodell an dem Beispiel einer Werkzeugmaschine. Im Zuge dessen wird gezeigt, wie ein bislang rein mechatronisches System – eine Werkzeugmaschine – durch eine interdisziplinäre sowie kunden- und wettbewerbsorientierte Entwicklung zu einem ITS transformiert werden kann.

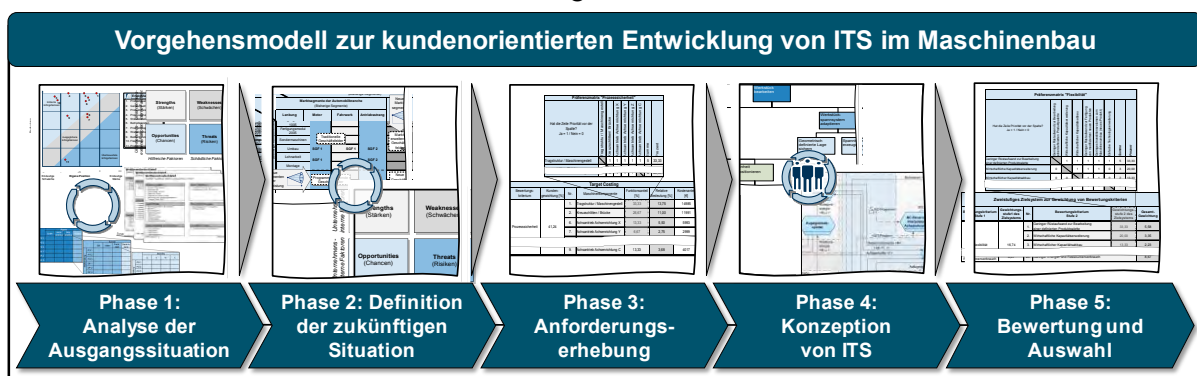


Bild 2: Phasen des Vorgehensmodells zur kundenorientierten Entwicklung von ITS im Maschinenbau

Phase 1 – Analyse der Ausgangssituation: In der ersten Phase erfolgt die Strukturierung der gegenwärtigen Unternehmensposition im Markt sowie in der Wettbewerbsarena. Initial sind die gegenwärtigen Geschäftsaktivitäten mittels Marktleistungs-Marktsegmente-Matrizen zu strukturieren. Darauf folgend gilt es die Wettbewerbsunternehmen und deren Produktportfolio zu analysieren. Auf der Unternehmensebene werden hierzu Wettbewerbssteckbriefe erstellt.

Um das zu betrachtende Produktportfolio im Wettbewerb zu positionieren, erfolgt eine Erfolgsfaktorenanalyse. Zur Bewertung der Erfolgsfaktoren sind Kunden mittels standardisierter Fragebögen bezüglich der einzelnen Erfolgsfaktoren und deren Gewichtung zu befragen. Unter Zuhilfenahme einer SWOT-Analyse werden sowohl unternehmensinterne als auch unternehmensexterne Einflussfaktoren auf die Geschäftsaktivitäten aufgeführt sowie verortet. Das Vorgehen ist in Bild 3 exemplarisch dargestellt.

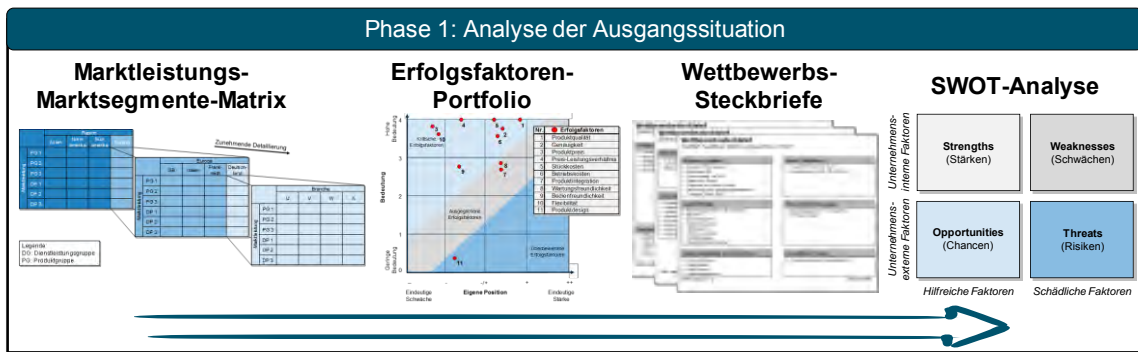


Bild 3: Vorgehen zur Analyse der Ausgangssituation

Bei der Erstellung der Marktleistungs-Marktsegmente-Matrizen werden im Validierungsbeispiel die Geschäftsfelder durch den generierten Jahresumsatz, den Umsatzwachstum zum Vorjahr und dem Anteil am Gesamtumsatz charakterisiert. Unterschiedliche Segmentierungssichten differenzieren die erwirtschafteten Umsätze angesichts verschiedener Marktsegmente bzw. -regionen. Die Erstellung von Wettbewerbssteckbriefen zu den 12 wesentlichen Marktbegleitern ermöglicht ein Benchmarking innerhalb der Wettbewerbsarena. Hieraus wird abgeleitet, dass 8 Marktbegleiter dem Kunden ein umfangreicheres Service-Portfolio insbesondere für die After-Sales-Phase anbieten. Aus der Anwendung der Erfolgsfaktorenanalyse geht die Erkenntnis hervor, dass die gegenwärtigen Marktleistungen partielle Schwächen aufzeigen. Es mangelt vornehmlich an Funktionen, anhand derer ereignisbasierte Fehlzustände der angebotenen Werkzeugmaschinen diagnostiziert sowie prognostiziert werden können. Die Ergebnisse der Erfolgsfaktorenanalyse werden unter anderem bei der Primärdatenerhebung und der Anforderungsanalyse weiterverwendet. Aus der SOWT-Analyse resultiert die Erkenntnis, dass der Ausbau des Service-Geschäfts Chancen für das Unternehmen darstellt. Gleichwohl wird die Begrenztheit personeller Ressourcen innerhalb der Serviceabteilung als Schwäche des Unternehmens verstanden.

Phase 2 – Definition der zukünftigen Situation: Aufbauend auf den Ergebnissen der Geschäftsstrukturanalyse in Phase 1 erfolgt die Definition der zukünftigen Situation. Ziel ist eine strategische Entwicklungsstoßrichtung für das zu betrachtende Unternehmen. Die Auswahl einer Zielkundengruppe bildet die Grundlage dieser Phase. Zur Auswahl der Zielkundengruppe sind vorrangig die Ergebnisse der Marktleistungs-Marktsegmente-Matrizen zu analysieren (Phase 1): identifizierte Hauptgeschäftsfelder gilt es auf zukünftige Potentiale zu untersuchen. Abgeleitet wird die strategische Entwicklungsstoßrichtung unter Zuhilfenahme einer erweiterten Marktleistungs-Marktsegmente-Matrix (Bild 4). Diese liefert Erkenntnisse über mögliche Produktstrategien, welche zur Erschließung der ausgewählten Zielkundengruppe erforderlich sind.

Zur Definition der zukünftigen Situation wird im Validierungsbeispiel auf die Erkenntnisse der Analyse der Ausgangssituation zurückgegriffen. Eine horizontale Diversifikation liefert eine adäquate strategische Stoßrichtung für das Unternehmen, um die adressatengerechte Modifizierung der angebotenen Werkzeugmaschinen für einen bekannten Markt (Automobilbranche) zu forcieren. Zur Analyse der zukünftigen „Passgenauigkeit“ dieses Zielkundensegments für das Unternehmen wird eine weitere SWOT-Analyse erstellt. Im Validierungsbeispiel können somit die Stärken und Schwächen des Unternehmens mit Chancen und Risiken des Zielsegments der Automobilbranche gegenübergestellt werden.

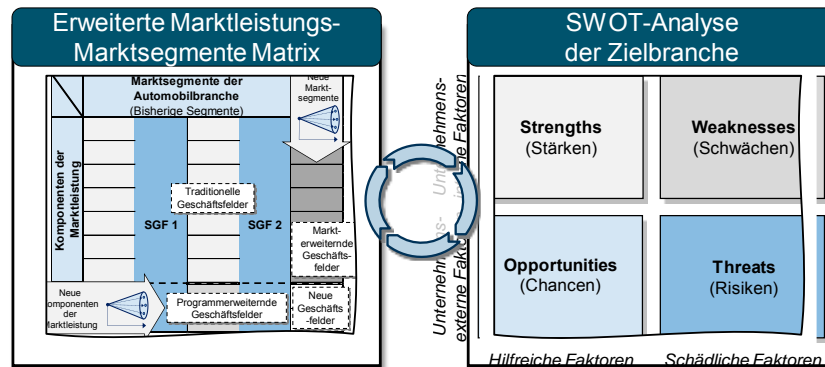


Bild 4: Vorgehen zur Definition der zukünftigen Situation

Phase 3 – Anforderungserhebung: Im Rahmen der Anforderungserhebung sind konkrete Anforderungen der Zielkundengruppe an das zukünftige Produkt zu erheben. Realisiert wird die Anforderungserhebung mittels qualitativer Primärdatenerhebungen in Form von Interviews sowie einer quantitativen Primärdatenerhebung mittels standardisierter Fragebögen. Erhobene Produkthanforderungen sind durch die Anwendung eines KANO-Modells zu strukturieren, um daraus eine Anforderungsliste abzuleiten. Durch eine bipolare Befragung des Kunden kann der Zusammenhang zwischen gestellten Produkthanforderungen und der Kundenzufriedenheit ermittelt werden. Daran anschließend sind mit der Methodenanwendung des Target-Costings wettbewerbsorientierte Zielkosten für das ITS zu ermitteln. Besonders die Zuordnung der gespaltenen Zielkosten zu Baugruppen und Komponenten stellt einen geeigneten Ansatz dar, um Kostensenkungspotentiale bereits frühzeitig zu nutzen.

Die Primärdatenerhebung im Validierungsbeispiel liefert grundlegende Anforderungen sowie Probleme der Automobilhersteller, welche einen Einfluss auf die Auswahl von Werkzeugmaschinen haben. Die Erhebungsgrundlage sind dabei leitfadengestützte Interviews mit sechs Experten aus mittelgroßen sowie großen Unternehmen. Eine Weiterverwendung der erhobenen Anforderungen erfolgt in einer quantitativen Primärdatenerhebung durch die schriftliche Befragung einer breiten Masse an Automobilherstellern mittels standardisierter Fragebögen. Hierdurch wird den bislang qualitativ vorliegenden Anforderungen eine quantitative Gewichtung zugeordnet. Als Anforderung mit höchster Präferenz gilt die Prozesssicherheit einer Werkzeugmaschine.

Bezugnehmend auf das Target Costing liefert die Subtraktionsmethode nach dem Out-of-Competitor-Prinzip einen geeigneten Ansatz. Vorliegende Angebote von Wettbewerbsprodukten werden als Ausgangspunkt der Zielkostenbestimmung verwendet. Zur Spaltung der Zielkosten wird auf die Ergebnisse der quantitativen Primärdatenerhebung zurückgegriffen (Bild 5) Abschließend werden die Ergebnisse in einer vorläufigen Anforderungsliste dokumentiert.

Target-Costing – Zielkostenspaltung						
Ergebnis der quantitativen Primärdatenerhebung			Produkt aus Funktionsanteil und Kundengewichtung			
Bewertungskriterium	Kundengewichtung [%]	Nr.	Maschinenkomponente	Funktionsanteil [%]	Relative Bedeutung [%]	Kostenanteil [€]
Prozesssicherheit	41,24	1.	Tragstruktur / Maschinengestell	33,33	13,75	14985
		2.	Kreuzschlitten / Brücke	26,67	11,00	11991
		6.	Achsantrieb Achsenrichtung X	13,33	5,50	5993

Bild 5: Stufen des Target Costings

Phase 4 – Konzeption von ITS: Im Rahmen von interdisziplinären Workshops wird auf Basis der Anforderungen eine domänenübergreifende Beschreibung des Systems erstellt. Dabei ist eine interdisziplinäre Systementwicklung von Fachleuten verschiedener Abteilungen in den Vordergrund zu stellen. CONSENS ermöglicht eine interdisziplinäre Systembeschreibung, die alle Systemelemente, Umgebungselemente und deren Zusammenhänge berücksichtigt. Die Diskussion zwischen Entwicklern

verschiedener Disziplinen führt zu einem gemeinsamen Verständnis des Systems und einer mechatronischen Sicht in Form einer Wirkstruktur. Die Wirkstruktur ist dabei als zentrales Element zur Kommunikation und Koordination zu verstehen. Zur kundenorientierten Absicherung der entwickelten Systemarchitektur und –eigenschaften gilt es die Wirkstruktur mit ausgewählten Kunden zu besprechen. In diesem Kontext sind wesentliche sowie gänzlich neue Elemente und Funktionen anhand der Wirkstruktur mit den Kunden zu diskutieren. Flankierend wird während der Systemmodellierungsphase eine Funktionshierarchie geschaffen. Die darauf aufbauende Erstellung eines morphologischen Kastens bedarf der Suche und Zuordnung von Teillösungen zu den Teilfunktionen der Funktionshierarchie. Eine Kombination konsistenter Teillösungen im morphologischen Kasten schafft dabei die Basis zur Ausarbeitung der Wirkstrukturen. Für die domänenübergreifende Beschreibung der Werkzeugmaschine wird im Validierungsbeispiel die Methode und Modellierungssprache CONSENS verwendet. Die erstellte domänenübergreifende Beschreibung umfasst Elemente von Hardware und Software, Umgebungselemente sowie deren Zusammenhänge. Bild 6 zeigt die Aktivitäten der vierten Phase.



Bild 6: Konzeption von ITS

Aus interdisziplinären Workshops (Mechanik, Software-, Elektro- und Prozesstechnik) resultieren die Funktionshierarchie sowie Wirkstrukturen von Werkzeugmaschinen, erweitert mit „intelligenter“ Hard- und Software (ITS). Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung des Projektteams kann bereits in dieser frühen Phase der Produktentwicklung abgestimmt werden, welche bislang mechanisch realisierten Funktionen zukünftig durch Softwarefunktionen substituiert bzw. erweitert werden. Eine Integration von 24 zusätzlicher Sensoren sowie die Erweiterung der Software-Funktionen stellt die Grundlage für eine Intelligenz der bislang rein mechatronischen Werkzeugmaschinen dar. Durch eine kontinuierliche Erfassung physischer Größen wie bspw. Schwingungen, Kräfte, Drücke etc. können mithilfe von musterbasierten Analysen mehrdimensionale Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern bzw. Zuständen erfasst werden. Da die Integration der Sensorik in das System der Werkzeugmaschine eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Fachabteilungen bedarf, liefert die Wirkstruktur eine Grundlage zur Kommunikation, Kooperation und Dokumentation entlang der Entwicklung. Modellierte Störgrößen, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Hard- und Softwarekomponenten geben Aufschluss, an welcher Stelle die Sensorik zu integrieren ist. Weiterhin kann festgelegt werden, welche mechanischen bzw. mechatronischen Komponenten mit einer dezentralen „Intelligenz“ zu Modulen gebündelt werden können. Zur Kombination und Auswahl unterschiedlicher Sensorik liefert der morphologische Kasten einen adäquaten Ansatz. Die erforderlichen Softwarefunktionen können parallel dazu in der Funktionshierarchie verortet und zu Modulen geclustert werden, wodurch die Funktionshierarchie zur groben Strukturierung der Softwarearchitektur verwendet werden kann. Das Zusammenspiel der zusätzlichen Sensorik mit der Erweiterung der Softwarefunktionen eröffnet dem Unternehmen neue Formen von Geschäftsmodellen.

Als Phasenergebnis resultieren mehrere ITS-Konzepte in Form von prinzipiellen Lösungsvarianten. Eine turnusmäßige Diskussion der Ergebnisse mit ausgewählten Experten des Zielkundensegments liefert wichtige und wesentliche Ansatzpunkte zur Gestaltung der Konzepte. Im Rahmen dieser Iterationsschleifen werden die Systemmodelle zur Kommunikation verwendet und Dokumentation verwendet. Als wichtige Hinweise gelten dabei die Einschätzungen des Kunden, wie die Bearbeitung seines Produktes durch die Integration der „Intelligenz“ weiter gesteigert werden kann.

Phase 5 – Bewertung und Auswahl: Zur Bewertung und Auswahl einer Prinziplösung sind in einem ersten Schritt die Bewertungskriterien auszuwählen und zu bewerten. Für die Gewichtung von Anforderungen bietet die Verwendung einer Präferenzmatrix einen adäquaten Ansatz. Darauf aufbauend gilt es die prinzipiellen Lösungsvarianten mittels einer Nutzwertanalyse zu bewerten. Eine Orientierung hierzu liefert die Konstruktionssystematik nach PAHL/BEITZ. Im Validierungsbeispiel wird für die Auswahl von Bewertungskriterien auf die Ergebnisse der Kundenbefragung im Rahmen der Primärdatenerhebung zurückgegriffen, dessen Resultat die Gewichtungsfaktoren für die Produkthanforderungen sind. Verwendet werden die Gewichtungsfaktoren als erste Gewichtungsstufe eines zweistufigen Zielwertsystems. In der zweiten Gewichtungsstufe werden die Gewichtungsfaktoren der ersten Gewichtungsstufen in feingranularere Anforderungen untergliedert. So wird die Anforderung „Hohe Flexibilität“ der ersten Gewichtungsstufe in die Teilflexibilitäten nach REFA (bspw. Mengenflexibilität) in der zweiten Gewichtungsstufe segmentiert. Die Bewertung der prinzipiellen Lösungsvarianten erfolgt anhand von 23 Bewertungskriterien. Entnommen werden die Bewertungskriterien und deren Gewichtungsfaktoren aus dem zweistufigen Zielwertsystem; die Bewertung wird sowohl nach technischen als auch wirtschaftlichen Kriterien durchgeführt.

5 Zusammenfassung

Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus müssen sich dem Wandel von mechatronischen Systemen hin zu Intelligenten Technischen Systemen (ITS) stellen. Einhergehend mit diesem technologischen Wandel der Systeme sind bestehende Entwicklungsprozesse anzupassen. Die wichtigsten Herausforderungen des Entwicklungsprozesses von intelligenten technischen Systemen sind: **Interdisziplinäre, modellbasierte Konzeptentwicklung** sowie die **systematische Kunden- und Wettbewerbsorientierung** unter **Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Ressourcen**. Vor diesem Hintergrund wurde ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von intelligenten technischen Systemen entwickelt, welches etablierte Methoden und Ansätze zu Kunden- und Wettbewerbsorientierung mit dem modellbasierten Systemansatz verzahnt. Eine exemplarische Validierung des Vorgehensmodells erfolgt am Beispiel einer Werkzeugmaschine. Die Ergebnisse entsprechen den genannten Herausforderungen wie folgt: Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Ressourcen (Phase 1, Phase 2) systematische Kunden- und Wettbewerbsorientierung (Phase 3), Erstellen von interdisziplinären, modellbasierten Konzepten (Phase 4). Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse die Vorteile einer Verzahnung einer Kunden- und Wettbewerbsorientierung mit MBSE zur Verbesserung der Entwicklungsprozesse im Maschinenbau.

Literatur

- Brüggemann und Bremer 2012 BRÜGGEMANN, H.; BREMER, P.: *Grundlagen Qualitätsmanagement - Von Werkzeugen über Methoden zum TQM*. Wiesbaden: Verlag Springer, 2012.
- Büttgen 2012 BÜTTGEN, M.: *Information Systems & Services- Web 2.0 – Anwendungen zur Informationsgewinnung von Unternehmen*. Berlin: Logos Verlag, 2009.
- Daum et al. 2010 DAUM, A.; GREIFE, W.; PRZYWARA, R.: *BWL für Ingenieure und Ingenieurinnen – Was man über Betriebswirtschaft wissen sollte*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- Dennig 2009 DENNIG, Hans-Jörg: *Entwicklung einer schnell schaltenden Bremse und Kupplung für Linearbewegungen zum Überlastschutz in Werkzeugmaschinen*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2009.
- Dori 2002 DORI, D.: *Object-process methodology – A holistics systems paradigm*. Berlin: Springer Verlag, 2002.
- Dumitrescu 2010 Dumitrescu, R.: *Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme*. Universität Paderborn, Dissertation, 2010.
- Enkel 2006 ENKEL, E.: *Chancen und Risiken der Kundenintegration*. In: Gassmann, O.; Kobe, C. (Hrsg.): *Management von Innovation und Risiko – Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.

- Gausemeier et al. 2001 GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: *Produktinnovation*. München: Carl Hanser Verlag, 2001
- Gausemeier et al. 2013 GAUSEMEIER, J.; TSCHIRNER, C.; DUMITRESCU, R.: Der Weg zu Intelligenten Technischen Systemen - Spitzencluster it's OWL - Mit Intelligenten Technischen Systemen an die Spitze. In: *Industrie Management 1/2013*, GITO Verlag, Berlin, 2013
- Gausemeier und Plass 2014 GAUSEMEIER, J.; PLASS, C. (Hrsg.): *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. Carl Hanser Verlag, München 2014
- Gelbrich und Souren 2009 GELBRICH, K.; SOUREN, R. (Hrsg.): *Kundenintegration und Kundenbindung-Wie Unternehmen von ihren Kunden profitieren*. Wiesbaden: Gabler Edition Wissenschaft Verlag, 2009.
- Haberfellner et al. 2012 HABERFELLNER, R.; WECK, O.; FRICKE, E.; VOESSNER, S.: *Systems Engineering - Grundlagen und Anwendung*. Zürich: Orell Fuesli, 2012.
- Hinterhuber et al. 2006 HINTERHUBER, H.; MATZLER, K. (Hrsg.): *Kundenorientierte Unternehmensführung, Kundenorientierung-Kundenzufriedenheit-Kundenbindung*. 5.Auflage Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006.
- Hamel und Prahalad 1995 HAMEL, G.; PRAHALD, C.: *Wettkampf um die Zukunft: Wie Sie mit bahnbrechenden Strategien die Kontrolle über Ihre Branche gewinnen und die Märkte von morgen schaffen*. Wien: Wirtschaftsverlag Ueberreuter, 1995.
- INCOSE 2007 INCOSE 2007 International Council On Systems Engineering Systems Engineering Vision 2020. INCOSE-TP-2004-004-02, Version/Revision 2.03.
- Kagermann et al. 2013 KAGERMANN, H., WAHLSTER, W., HELBIG J.: *Deutschland als Produktionsstandort sichern – Umsetzungs-empfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin: acatech, 2013.
- Lamm und Weilkiens 2010 LAMM, J. G.; WEILKIENS, T.: *Funktionale Architekturen in SysML*. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München: Carl Hanser Verlag, 2010.
- Partsch 2010 PARTSCH, H.: *Requirement –Engineering systematisch*. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- Plinke 1995 PLINKE, W.: *Grundkonzeption des Marketings*. Berlin, Heidelberg: Technischer Vertrieb, 1995.
- Romberg 2010 ROMBERG, A.: *Schlank entwickeln, schnell am Markt: Wettbewerbsvorteile durch Lean Development*. Log-X Verlag, Stuttgart, 2010
- Slater und Narver 1998 SLATER, S.; NARVER, J.: *Additional Thoughts on the Measurement of Market orientation: A Comment on Deshpandé and Farley*. In: *Journal of Market-Focused Management*, Jg. 3 (2), S. 233-236, 1998.
- Steinhoff 2006 STEINHOFF, F.: *Kundenorientierung bei hochgradigen Innovationen: Konzeptualisierung, empirische Bestandsaufnahme und Erfolgsbetrachtung*. Berlin: Deutscher Universitätsverlag, 2006.
- Späth und Zahn 2003 SPÄTH, D.; ZAHN, E.: *Kundenorientierte Dienstleistungsentwicklung in deutschen Unternehmen*. Heidelberg: Springer Verlag Berlin, 2003.
- Trischler und Romberg 2015 TRISCHLER, J.; ROMBERG, A.: *Lean Development im deutschen Maschinenbau 2015-Eine Studie der Staufen AG und des Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.* Frankfurt a.M.: VDMA Verlag, 2015.
- Vorgrimler und Wübben 2003 VORGRIMLER, D.; WÜBBEN, D.: *Die Delphi-Methode und ihre Eignung als Prognoseinstrument, Gastbeitrag Auszug aus Wirtschaft und Statistik*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2003.
- Wecht 2006 WECHT, C.: *Das Management aktiver Kundenintegration in der Frühphase des Innovationsprozesses*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2006.
- Weilkiens 2006 WEILKIENS, T.: *Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design*. Heidelberg: Dpunkt-Verlag, 2006.

Modellbasierte Entwicklung cybertronischer Systeme in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses – Ein Vergleich mit der klassischen Produktentwicklung

Marcel Cadet¹, Tim Schulte², Thomas Dickopf³, Nicole Stephan¹, Martin Eigner³

¹ Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau (KIMA),
67663 Kaiserslautern, Deutschland

cadet@mv.uni-kl.de, stephan@mv.uni-kl.de

² Schaeffler AG, 91074 Herzogenaurach, Deutschland

tim.schulte@schaeffler.com

³ Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung (VPE),
67663 Kaiserslautern, Deutschland

thomas.dickopf@mv.uni-kl.de, eigner@mv.uni-kl.de

Abstract: In Zeiten zunehmender Digitalisierung im Maschinenbau und im Hinblick auf Industrie 4.0 steigt die Komplexität technischer Systeme stark an. Im Zuge dessen entwickeln sich mechatronische Systeme weiter zu cybertronischen Systemen, einem temporären Zusammenschluss cyber-fähiger Elemente, die durch Kommunikation und Kooperation ein gemeinsames Ziel erfüllen. Durch diese (R)Evolution sind die konventionellen Vorgehensweisen zur Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen herausgefordert und müssen überdacht und angepasst werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes mecPro² wurde ein modellbasierter Entwicklungsprozess für cybertronische Produkte und Produktionssysteme unter Verwendung der Systems Modeling Language (SysML) erarbeitet, der den Herausforderungen dieser neuartigen Systeme gerecht wird.

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf einem kurzen Überblick über das Konzept in der frühen Phase der modellbasierten Entwicklung cybertronischer Produkte und zeigt, inwiefern die klassischen Entwicklungsmethodiken aus dem Maschinenbau auch für die Entwicklung komplexer Systeme nützliche Ansätze bieten und in welchen Bereichen von anderen Fachdisziplinen gelernt werden kann.

Keywords:

Industrie 4.0, Cybertronische Systeme, Cyber-physische Systeme, Modellbasierte Systementwicklung (MBSE), SysML

1 Einleitung

Die Komplexität in der Produktentwicklung wird getrieben durch die zunehmende Vernetzung und Integration von Software-, Mechanik- und Elektrik-/Elektronikelementen, sowohl innerhalb eines Produktes als auch insbesondere über die Grenzen des einzelnen Produktes hinweg. Industrie 4.0, ein von der Bundesregierung 2011 verabschiedetes Zukunftsprojekt, zielt u. a. darauf ab, Konzepte zur Beherrschung der gestiegenen Komplexität bereitzustellen (BMBF 2016). Im Fokus steht die Digitalisierung der Industrie auf Grundlage von Cyber-Physical Systems im Internet der Dinge. Diese Herausforderungen betreffen Produkte und Produktionssysteme in gleichem Maße. (Schulte et al. 2016a)

Die Entwicklungsumfänge verschieben sich dabei evolutionär über mechatronische Systeme hin zu cybertronischen Elementen (CTE) und Systemen (CTS), deren Charakteristika im Verbundprojekt mecPro² als Kombination der Eigenschaften mechatronischer und cyber-physischer Systeme identifiziert wurden. Ein CTS ist ein temporärer Zusammenschluss von mindestens zwei cyber-fähigen Elementen, von denen mindestens ein Element ein CTE ist. Dabei beinhaltet das CTE mindestens ein mechatronisches System nach VDI 2206 (2004). Die cyber-fähigen Elemente schließen sich zur Erfüllung einer konkreten Aufgabe zu einem cybertronischen System zusammen und kooperieren miteinander durch die Kommunikation über offene Netze. Als Beispiel für ein CTS sei ein autonomes Parksystem, bestehend aus Fahrzeugen (CTE), Parkhaus (CTE) und Smartphones (CFE) genannt. Das autonome Einparken eines Fahrzeugs als Gesamtziel ist dabei nur gemeinsam von allen Elementen durch Kommunikation und Kooperation erreichbar. (Cadet et al. 2015)

Entscheidend für die Funktionsfähigkeit der CTE bzw. CTS ist Software, deren Bedeutung hinsichtlich Beeinflussung und Verwendung von Daten und Diensten sowie zur Vernetzung des Cyberspace und des Physical Space stark zunehmen wird. Der relative Anteil an Hardware innerhalb eines Systems wird sinken, da immer mehr Funktionalitäten durch Software anstelle von Hardware realisiert werden. Aus diesem Grund bestehen viele Gemeinsamkeiten zwischen Software und CTS (siehe Bild 1). (Schulte et al. 2016a)

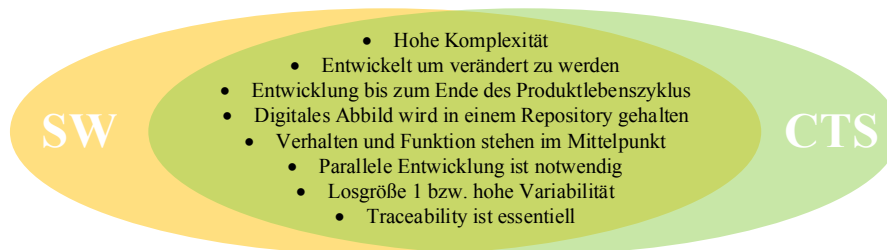


Bild 1: Gemeinsamkeiten zwischen Software und cybertronischen Systemen. Abb. in Anlehnung an Schulte et al. (2016a) und Quigley und Robertson (2015)

CTE werden physisch auch weiterhin nur einmal produziert und an den Kunden ausgeliefert, ihre enthaltenen oder verbundenen Softwareanteile können sich allerdings durch Aktualisierungen bis zum Ende des Systemlebenszyklus permanent und hochfrequent verändern. Diese Aktualisierungen werden zu einem veränderten Verhalten des Gesamtsystems führen. Gerade während der Nutzungsphase kann dieses inkrementell zu Erkenntnisgewinn und darauf hin zu Folgeinnovationen führen. Die Differenzierung im Markt wird im wachsenden Maße auf der kontinuierlichen Verbesserung des in Betrieb befindlichen Gesamtsystems, auf Konfigurierbarkeit und Adaptivität in ständiger Interaktion mit dem Kunden basieren.

Die Tatsache, dass die Funktionalitäten von CTS zu einem großen Teil durch Software realisiert werden, lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Entwicklung solch komplexer Systeme von den Kompetenzen der Softwareentwicklung profitieren und lernen kann. So wird die rechnergestützte Modellierung in der Softwareentwicklung seit Jahrzehnten eingesetzt, da diese bereits Ende der 1960er Jahre vor dem Problem stand, die rasant gestiegene Komplexität beherrschen zu müssen (Naur und Randell 1969). Werden die bestehenden Erfahrungen, Konzepte und Best Practices außer Acht gelassen, wird man bei der Beherrschung der Komplexität zukünftiger cybertronischer Elemente und Systeme schnell an die Grenzen der Wirtschaftlichkeit oder technischen Beherrschbarkeit stoßen. Die Herausforderungen bestehen darin, die auf Software ausgelegten Konzepte und Ansätze auf CTS zu übertragen und mit den bewährten Praktiken des Systems Engineering, des Maschinenbaus und der anderen Disziplinen zu integrieren. (Schulte et al. 2016a)

Ein Wandel der zu entwickelnden, herzustellenden und zu betreibenden Produkte sollte auch zu einem Überdenken des gesamten Produktentstehungsprozesses führen. Es steigt der Bedarf, die dokumentenbasierte Entwicklung in möglichst vielen Bereichen durch eine durchgängige modellbasierte Entwicklung abzulösen, um mangelhaften Austausch und Medienbrüche zwischen den beteiligten Fachdisziplinen zu vermeiden. Dies betrifft insbesondere auch die integrierte Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, deren Prozesse immer weiter parallelisiert werden müssen.

In diesem Beitrag wird der integrierte Ansatz des Forschungsprojektes mecPro² vorgestellt. Dabei wird aufgezeigt, welche bewährten Praktiken aus dem Maschinenbau auch in der Industrie 4.0 ihre Bedeutung behalten, wie sie in die modellbasierte Arbeitsweise überführt und durch Ansätze aus anderen Disziplinen ergänzt werden können.

2 Entwicklung technischer Systeme im Maschinenbau bzw. in der Mechanik

In der Produktentwicklung im Maschinenbau sind in den letzten Dekaden zahlreiche Vorgehensweisen entstanden, die die Entwicklung neuer Produkte oder die Weiterentwicklung vorhandener Produkte methodisch unterstützen.

Eine der bekanntesten Methoden ist die Vorgehensweise nach VDI 2221 (1993), die u. a. auf dem Vorgehen nach Pahl und Beitz (1977), Hubka und Eder (1988) und Rodenacker (1991) basiert. Dabei

lässt sich die Entwicklung technischer Produkte grundlegend in die vier Phasen (I) Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung, (II) Konzeptentwicklung, (III) Gestaltung und (IV) Ausarbeitung aufteilen. Von der grundsätzlichen Struktur ist die Methodik wasserfallartig bzw. sequenziell ausgelegt, lässt aber auch Vor- oder Rücksprünge zu. (VDI 2221 1993, Feldhusen und Grote 2013)

Daneben haben sich weitere Methoden entwickelt, die entweder spezifische Anwendungsgebiete aus der methodischen Produktentwicklung, wie z. B. den Problemlösungszyklus oder die Bewertung und Auswahl betrachten, oder alternative bzw. weiterentwickelte Konzepte beschreiben. Beispiele hierfür sind der Produktentwicklungsprozess nach Ulrich und Eppinger (2012), das Total Design nach Pugh (1990) oder das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) nach Ponn und Lindemann (2011). Auf letzteres soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Das MKM umfasst eine stufenweise Lösungskonkretisierung und besteht aus den beiden Hauptbestandteilen Anforderungs- und Lösungsraum. Der Lösungsraum unterteilt sich in die Konkretisierungsebenen Funktions-, Wirk- und Bauebene, der Anforderungsraum erstreckt sich parallel dazu. Im Vergleich zum Modellraum nach Rude (1998) kommt den Anforderungen somit eine höhere Bedeutung zu, da sie nicht nur zu Beginn des Prozesses definiert werden, sondern fortwährend detailliert und konkretisiert werden. Das MKM beschreibt dabei drei Paare grundlegender Aktivitäten: Konkretisieren und Abstrahieren, Zerlegen und Zusammenfügen, Variieren und Einschränken. Diese Aktivitäten orientieren sich an den drei Dimensionen des Modells. (Ponn und Lindemann 2011)

Die meisten Vorgehen sind stark von der Mechanik geprägt bzw. betrachten technische Systeme mit einem hohen Anteil an mechanischen Bauteilen. Somit liegt der Fokus häufig auf der funktionalen Betrachtung des Produktes und der Realisierung der (meist mechanischen) Funktionen durch Wirkprinzipien. Je nach Konkretisierungsgrad der Methoden sind sie aber nicht auf die Mechanik beschränkt, sondern lassen sich auch auf andere Disziplinen übertragen. Die Umsetzung der Arbeitsschritte als auch die Dokumentation und Weitergabe der Ergebnisse erfolgt oftmals dokumentenbasiert. Nicht selten werden diese Schritte in der Praxis überhaupt nicht oder nur unzureichend durchgeführt und dokumentiert. Die Erstellung einer nicht-geometrischen Beschreibung des Produktes bspw. in Form einer Funktionshierarchie und -struktur wird in der Industrie in den wenigsten Produktentwicklungsprozessen verbindlich vom Konstrukteur gefordert. Dies zeigt sich auch in einer Lücke in der CAE-Werkzeugkette. Erst ab der Gestaltungsphase wird der Produktentwicklungsprozess wieder durch Modelle wie z. B. CAD- oder Simulationsmodelle, und den entsprechenden Software-Werkzeugen unterstützt. Dadurch entsteht eine Prozess- und Informationslücke, die zu einer Verschlechterung hinsichtlich Effektivität und Effizienz im Entwicklungsprozess führt. Es werden nicht die besten Lösungen gewählt, Kundenwünsche nicht optimal erfüllt, Produktkosten überhöht, Entwicklungszeiten verlängert, Transparenz verhindert oder die Kommunikation sowie Änderungen erschwert. Aus diesem Grund liegt ein wichtiger Beitrag des mecPro²-Ansatzes in der durchgängigen Unterstützung des gesamten Lösungsfindungsprozesses einschließlich der Abbildung der Variabilität und der Entscheidungen in digitalen Modellen. Dies birgt nicht nur für die Entwicklung von CTS ein hohes Potential, sondern auch für die Entwicklung von Mechanik und Mechatronik. Die VDI 2206 (2004) beschreibt einen so genannten Mikrozyklus, welcher generisch den Lösungsfindungsprozess darstellt. So werden während des gesamten Systementwurfs wiederkehrend, ausgehend von der Situationsanalyse und Zielformulierung, Lösungsvarianten entwickelt, analysiert und bewertet sowie Entscheidungen getroffen. Alle hierbei genutzten und erzeugten Informationen sollen im mecPro²-Ansatz in einem formalisierten, digitalen Modell abgebildet werden. Der beschriebene Mikrozyklus ist dabei in der VDI 2206 (2004) in einen Makrozyklus eingebettet, welcher auf dem aus der Software-Entwicklung bekannten V-Modell aufbaut. Bei der Abbildung von Informationen in Modellen sind in diesem Kontext ausdrücklich keine geometrischen Modelle gemeint. Die hierfür notwendige Ausgestaltung und Konkretisierung würde einer breiten Betrachtung des möglichen Lösungsraums entgegenwirken und diesen zu früh zu stark einschränken bzw. mechanische Lösungsansätze bevorzugen. Aus diesem Grund werden Modelle in diesem Kontext im Sinne des Model-Based Systems Engineerings verstanden (MBSE), das die Sammlung und Darstellung der relevanten Systeminformationen durch eine zentrale Modellspezifikation ermöglicht. Ziel dessen ist es, die Systeminformationen konsistent abzubilden und zu speichern. Im MBSE arbeiten alle erforderlichen Disziplinen zur Problemlösung an einem Modell und nutzen dabei zur Kollaboration eine gemeinsame Sprache, bspw. die Systems Modeling Language (SysML). Aus diesem Grund wird in dem im folgenden Kapitel dargestellten mecPro²-Ansatz die Sprache SysML zur Formalisierung der Entwicklungsinformationen auf der Systemebene verwendet.

Dies erfolgt im Prozess solange, bis eine Lösungsvariante eindeutig und „sortenrein“ einer Fachdisziplin zugeordnet werden kann. Hier erfolgt dann der Übergang in die disziplinspezifischen Sprachen bzw. Notationen.

3 Entwicklung cybertronischer Systeme

Der mecPro²-Ansatz besteht aus einem Prozessrahmenwerk und einer Beschreibungssystematik zur Entwicklung cybertronischer Elemente und Systeme.

Das Prozessrahmenwerk definiert mit Hilfe von Prozessaktivitäten und Prozessrollen wer wann und zu welchem Zweck Informationen generiert und nutzt (vgl. auch Cadet et al. 2017). Eine logisch zusammengehörige Menge von Aktivitäten ist in Prozessmodulen zusammengefasst. Das Prozessrahmenwerk ist dabei in den gleichen drei Dimensionen beschrieben wie das im Folgenden dargestellte Modellrahmenwerk: Detaillierung, Konkretisierung und Variabilität. Die Detaillierung stellt die Informationsanreicherung des Prozessmodells vom Entwicklungsprozess über die Prozessmodule bis zu den Prozessaktivitäten dar. Die Konkretisierung umfasst die Informationsanreicherung/-anpassung des Prozessmodells für die Entwicklung im Rahmen eines typischen Geschäftsvorfalles (Customizing) und/oder eines konkreten Entwicklungsprojektes (Tailoring). Die Detaillierung führt stets auch zu einer Konkretisierung des Prozessmodells. Hierbei tritt zwangsläufig Variabilität auf. Auch das Prozessrahmenwerk selbst muss daher fähig sein, Variabilität bzgl. der Prozesse abzubilden. (Schulte et al. 2016b)

Die Beschreibungssystematik definiert hingegen die oben genannten Informationen, ihre Zusammenhänge und ihre Darstellung. Daher sind Prozessrahmenwerk und Beschreibungssystematik im mecPro²-Ansatz untrennbar miteinander verbunden und werden gemeinsam dargestellt. Die Beschreibungssystematik besteht im Wesentlichen aus den drei Bestandteilen: Modellrahmenwerk, Ontologie & Profil sowie Views & Viewpoints. Die Ontologie identifiziert und beschreibt die Konzepte, Begriffe und Beziehungen, welche im Entwicklungsprozess verwendet werden und ist die Basis für die Erstellung eines SysML-Profiles. So werden über die Profilierung die Fachausdrücke einer Domäne in das Modell eingeführt. Die Views definieren die Darstellungen der Elemente aus der Ontologie und stellen somit einen Ontologieausschnitt dar. In einem View werden der Diagrammtyp, die dargestellten Elemente und Relationen definiert. Die Views sind dabei konform zu so genannten Viewpoints. Die Summe aller Views & Viewpoints stellt die gesamte Ontologie dar. (Schulte et al. 2016b)

Im Folgenden wird näher auf das Entwicklungsvorgehen anhand des Modellrahmenwerks eingegangen. Dabei wird zwischen dem Systementwurf und dem disziplinspezifischen Entwurf unterschieden.

3.1 Systementwurf

Das Modellrahmenwerk ist das Grundgerüst, entlang dessen das zu entwickelnde technische System beschrieben wird. Das entstehende Systemmodell bildet den Kern der Beschreibung des technischen Systems und dient als Verbindung zwischen den disziplinspezifischen Partialmodellen. Die Beschreibung des technischen Systems erfolgt über mehrere Ebenen mit zunehmender Lösungskonkretisierung. Bild 2 verdeutlicht den Aufbau des Modellrahmenwerks. (Schulte et al. 2016b)

Die Dimension Detaillierung umfasst die Informationsanreicherung ohne Einschränkung des Lösungsraums. Ab einem gewissen Punkt ist eine weitergehende Detaillierung ohne Lösungskonkretisierung nicht mehr möglich. Es erfolgt der Übergang auf eine tiefere Ebene. Bei diesem Übergang tritt auch zwangsläufig Variabilität auf, da die Lösungskonkretisierung im Regelfall nicht ohne Alternativen und deren Betrachtung erfolgt (Ponn und Lindemann 2011). In jeder der vier Ebenen des Modellrahmenwerks werden Struktur und Verhalten beschrieben.

Auf der ersten Ebene, der Kontextebene, wird das System als Black-Box mit dem von außen erwarteten Verhalten des Systems und den Schnittstellen zu verbundenen Elementen in seiner Umgebung beschrieben. Hier erfolgt der Übersetzungs- bzw. Synchronisationsprozess zwischen natürlichsprachlichen und modellbasierten Anforderungen. Über den gesamten Lebenszyklus wird ein System in zahlreichen, variierenden Kontexten eingesetzt. Ausgehend von der Beschreibung des Systemverhaltens auf der Kontextebene, findet auf der zweiten Ebene des Modellrahmenwerks, der Funktionsebene, die Identifizierung von möglichst lösungsneutralen sowie redundanzfreien Funktionsblöcken statt. Die Funktionsebene stellt somit die erste Stufe der Konkretisierung dar. Ergebnis ist eine Funktionsstruktur,

deren Funktionsblöcke über Stoff-, Energie- und Signalflüsse miteinander verknüpft sind. Die Variabilität der Kontextebene führt meist auch zu Variabilität in der Funktionsebene.

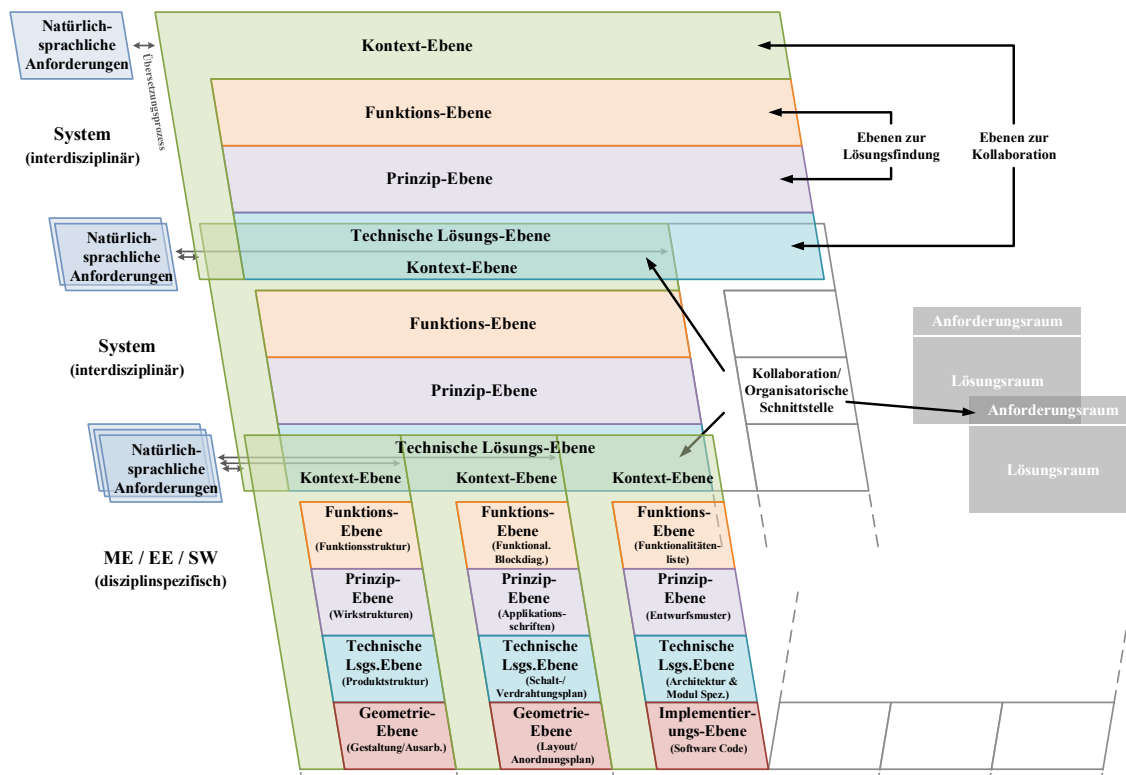


Bild 2: mecPro² V-Modell (linker, oberer Ast). Abb. in Anlehnung an Eigner et al. 2015

Auf der folgenden Ebene, der Prinzipenebene, werden die technischen Zusammenhänge beschrieben, welche eine gewünschte Funktion durch verschiedene Lösungsprinzipien realisieren. Für jede Funktion gibt es in der Regel mehrere Lösungsmöglichkeiten, welche hier als Prinzipvarianten beschrieben werden. Bei Prinzipvarianten handelt es sich um eine Grundidee zur Lösung eines Problems. Diese Grundideen unterscheiden sich deutlich voneinander (vgl. Haberfellner et al. 2015). Abschließend erfolgen eine systematische Bewertung und die Auswahl einer Prinzipvariante, für die eine technische Lösung beschrieben werden soll. Auf der untersten Ebene, der Technischen Lösungsebene, ist die maximale Lösungskonkretisierung erreicht, die eine Organisationseinheit verantwortet. Die Lösungselemente sollten so detailliert beschrieben sein, dass eine Integration auf der rechten Seite im V-Modell möglich ist. Die Verantwortlichkeit für diese Elemente kann eindeutig und überlappungsfrei einer anderen organisatorischen Einheit zugeordnet werden. Somit ist die technische Schnittstelle zugleich auch eine organisatorische Schnittstelle. Ein Sonderfall tritt auf, wenn die Elemente disziplinspezifisch, d. h. als Software, Elektrik/Elektronik oder Mechanik klassifiziert werden können. In diesem Fall befindet sich an der organisatorischen Schnittstelle auch der Übergang der Verantwortung von einer Systementwicklung an die disziplinspezifische Entwicklung (siehe Kapitel 3.2). Hierbei wird nicht nur von Lösungskonkretisierung, sondern auch von Partitionierung gesprochen. Da Ausschnitte dieser Ebene an die verantwortlichen Organisationseinheiten übergeben werden, findet auf dieser Ebene zwingend Kollaboration statt. Der Lösungsraum des betrachteten Systems und der Anforderungsraum der Elemente überschneiden sich. Die Informationen der Technischen Lösungsebene stellen die Summe der Informationen der Kontextebenen aller Lösungselemente dar. Auch beim Übergang in diese Ebene tritt Variabilität auf. Hier wird von Detailvarianten gesprochen. Diese beruhen auf der gleichen Grundidee und unterscheiden sich nur in wenigen Details. Sie verfeinern die Prinzipvarianten (Haberfellner et al. 2015). (Eigner et al. 2015; Schulte et al. 2016b)

Aufgrund der großen Bedeutung von Variabilität im mecPro²-Ansatz wird im Folgenden näher darauf eingegangen. Lauenroth und Pohl beschreiben, dass alle während der Produktentstehung erarbeiteten Entwicklungsartefakte Variabilität enthalten können. Dies reicht von den Anforderungen bis hin zur Verifikation (Lauenroth und Pohl 2005). Varianten, die auf einer Konkretisierungsstufe auftreten,

führen zu weiteren Varianten auf den darunterliegenden Ebenen (Haberfellner et al. 2015). Variabilität hat allerdings auf allen Ebenen eines gemeinsam, ihre Betrachtungsweise. Ebenenübergreifend und interdisziplinär wird immer betrachtet, „was“ variiert und „wie“ es variiert (Lauenroth und Pohl 2005). Somit ist eine einheitliche Abbildung der Variabilität über alle Entwicklungsebenen hinweg möglich und sinnvoll. Bis dato findet Variantenmanagement fast ausschließlich auf Ebene der Bill-Of-Material (BOM) statt, also auf Basis der konkreten Lösung. Die modellbasierte Beschreibung von Variabilität ermöglicht es zusätzlich, die während der Lösungsfindung entstehende Variabilität systematisch zu dokumentieren. Auf diese Weise ist es möglich, bei geänderten Rahmenbedingungen zügig die zuvor verworfenen Lösungsvarianten zu identifizieren und zu prüfen, ob sie unter den neuen Bedingungen ggf. eine bessere Lösung darstellen. Zur Abbildung der Variabilität nutzt der mecPro²-Ansatz die Konzepte des Orthogonal Variability Models (OVM). Entscheidungen sind immer dann notwendig, wenn verschiedene Varianten zur Auswahl stehen (Haberfellner et al. 2015). Jeder Variationspunkt benötigt zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Entscheidung, welche der ihm zugeordneten Varianten gewählt werden soll. Aus diesem Grund ist es naheliegend, das Konzept um die Abbildung von Entscheidungen zu erweitern. Der Fokus soll hierbei auf der Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Entscheidungen liegen. Es stehen unterschiedliche Verfahren zum Treffen dieser Entscheidungen, wie bspw. die Argumentenbilanz, die Bewertungsmatrix oder die Nutzwertanalyse, zur Verfügung. Um eine Entscheidung zwischen mehreren Varianten treffen zu können, sind Bewertungskriterien notwendig, anhand derer die Eignung der Varianten beurteilt werden kann (Haberfellner et al. 2015). Diese Bewertungskriterien werden aus den Anforderungen abgeleitet (CMMI 2010). Die Bewertung der Varianten erfolgt durch den Abgleich der Eigenschaften der einzelnen Varianten gegen die zu erfüllenden Kriterien. (Schulte et al. 2016b)

3.2 Disziplinspezifischer Entwurf

Die Prozessmodule der System-Ebene werden so lange rekursiv ausgeführt, bis die Elemente auf der Technischen Lösungsebene eindeutig einer der drei Fachdisziplinen Maschinenbau bzw. Mechanik, Elektrik/Elektronik oder Software zuzuordnen sind. Die disziplinspezifische Entwicklung ist dabei aber nicht explizit Bestandteil des Forschungsprojekts mecPro². In diesem Kapitel wird daher ein Ausblick gegeben, wie eine Anbindung an die Disziplinen erfolgen kann.

Um die Vorteile der modellbasierten Entwicklung auszunutzen und Medienbrüche zu vermeiden, muss eine modellbasierte Übergabe der Entwicklungsinformation aus dem Systementwurf in die jeweiligen Fachdisziplinen und eine darauf aufbauende und fortgesetzte modellbasierte Entwicklung gewährleistet sein. Dabei sollen insbesondere die modellbasierte Lösungsfindung und eine lösungsabstrakte Beschreibung in den Disziplinen umgesetzt werden. Generell können dabei zwei Möglichkeiten verfolgt werden, die nachfolgend anhand der Disziplin Maschinenbau bzw. Mechanik vorgestellt werden.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, entstammen einige Konzepte, die im Systementwurf Anwendung finden, dem Bereich des Maschinenbaus bzw. der Mechanik. Dies gilt insbesondere für die funktionsorientierte Denkweise, das Aufspannen eines Lösungsraums mit hoher Variabilität sowie deren Auflösung durch Bewertung und Auswahl. Aus diesem Grund kann das Vorgehen aus mecPro² generell auch im Rahmen der Disziplin Maschinenbau bzw. Mechanik angewendet werden (siehe Bild 2, links unten). Dabei muss allerdings nach der Technischen Lösungsebene ein Übergang von der Produktstruktur im Systemmodell (SysML) zur Geometrie im CAD-Modell sowie disziplinspezifischen Simulationen (CAE) stattfinden (siehe Geometrie-Ebene in Bild 2).

Die Stärken der modellbasierten Systementwicklung wirken sich auch auf die Fachdisziplin Maschinenbau bzw. Mechanik aus. Die Aufteilung monolithischer In- und Output-Informationen in kleine Informationspakete, welche miteinander in Beziehung stehen, führen evolutionär zur Entstehung eines Systemmodells. Dies führt zu einer besseren Zusammenarbeit, insbesondere in großen Entwicklerteams oder mit externen Partnern. Es entstehen weniger Medienbrüche, weniger Fehler und die Effizienz erhöht sich. Des Weiteren können durch eine durchgängige Nachverfolgbarkeit der voneinander abhängigen Modellelemente (Traceability) die Auswirkungen von Änderungen über alle Ebenen der Entwicklung hinweg besser abgeschätzt werden. Durch die bessere Möglichkeit der Wiederverwendung von Entwicklungsinformationen steigt die Effizienz bei Anpassungskonstruktionen stark an. Um die Vorteile ausnutzen zu können, muss die Vorgehensweise in die industrielle Praxis überführt und dort etabliert werden.

Daneben bringt der mecPro²-Ansatz für den Maschinenbau bzw. die Mechanik allerdings auch Einschränkungen mit sich. Durch die Vorgabe detaillierter Methoden, z. B. zur Bewertung, entfallen viele Freiheiten der VDI 2221 (1993) oder vergleichbarer Vorgehen. Die kreative Freiheit des Konstrukteurs ist davon aber nicht betroffen. Allerdings fehlen dem Konstrukteur im Modell Möglichkeiten erster geometrischer Abschätzungen z. B. in Form von Skizzen. Die Methoden der Lösungsfindung sind für einen hohen Abstraktionsgrad ausgelegt und bilden mechanische Prinzipien und Eigenschaften daher nicht umfänglich ab. Weiterhin sind das Wissen und die Akzeptanz im Maschinenbau bzw. der Mechanik bzgl. modellbasierter Methoden aus der Software-Entwicklung aktuell noch eher gering. Deshalb ist eine Anpassung für den disziplinspezifischen Sprachraum dringend erforderlich. Daneben steigt bei der Einführung des modellbasierten Ansatzes, insbesondere bei Neuentwicklungen mit geringerer Komplexität, der Aufwand des einzelnen Konstrukteurs aufgrund vieler expliziter Vorbereitungsschritte zur Modellerstellung, stark an. Die Vorteile zeigen sich erst in der Zusammenarbeit mit vielen Beteiligten, bei Anpassungskonstruktionen und komplexen Systemstrukturen. Der ansteigende Umfang des Systemmodells erfordert außerdem weitere Maßnahmen zur Rationalisierung, wie z. B. die Automatisierung von Prozessschritten durch die verwendeten Werkzeuge.

Alternativ zur Anwendung des mecPro²-Ansatzes für den Systementwurf in der Fachdisziplin Maschinenbau bzw. Mechanik ist die Erarbeitung eines spezifischen modellbasierten Vorgehens, welches auf die speziellen Eigenschaften technischer Systeme im Maschinenbau zugeschnitten ist und gängige Konstruktionsmethoden unterstützt. An dieser Stelle sei auf das Forschungsprojekt FAS4M verwiesen, welches hierzu interessante Ansätze liefert. Im Rahmen von FAS4M wurden eine Modellierungsmethodik und -sprache (MechML) entwickelt, die die konzeptionelle Erarbeitung des Produktes und die Ankopplung des MechML-Modells an die CAD-Konstruktion unterstützen (Moeser et al. 2016). Viele Arbeitsschritte sind vom Grundgedanken kompatibel zum mecPro²-Ansatz, werden aber auf eine andere Art und Weise umgesetzt. Bild 3 zeigt einen Vergleich des mecPro²-Modellrahmenwerks (linke Seite) mit der FAS4M-Methodik (rechte Seite), wobei inhaltliche Überschneidungen farblich gekennzeichnet sind.

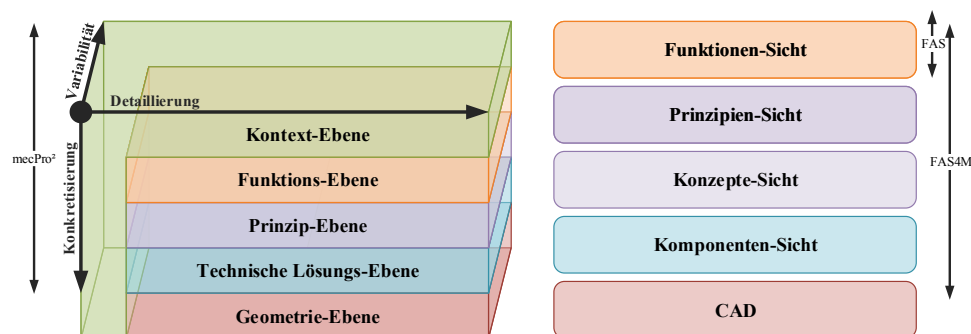


Bild 3: Vergleich zwischen der Anwendung des mecPro²-Modellrahmenwerks auf die Disziplin Mechanik (links) und dem FAS4M-Vorgehen (rechts). Abb. in Anlehnung an Eigner et al. (2015) und Moeser et al. (2016)

Eine Besonderheit der FAS4M-Methodik, im Vergleich zu anderen Methoden des Systems Engineering, ist die Verwendung von Skizzen, die mit semi-formalen Informationen angereichert werden, um als Zwischenschritt erste geometrische Festlegungen treffen zu können (Grundel et al. 2015).

3.3 Vergleich mit bestehenden Entwicklungsansätzen

Der Systementwurf erfolgt zuerst in der frühen Phase der Produktentwicklung und hat das Ziel, für spezifische Problemstellungen die bestmöglichen Lösungen zu finden. Das Ergebnis ist ein disziplinenübergreifendes Lösungskonzept, welches auf der wesentlichen Beschreibung der physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beruht. Generell wird dazu die gewünschte Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen zerlegt, für welche dann geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zur Funktionserfüllung gesucht werden. (VDI 2206 2004)

Der in mecPro² entwickelte Ansatz berücksichtigt diesen Anspruch. Der Systementwurf wird durch mehrere Prozessmodule beschrieben und führt das in der VDI 2206 (2004) beschriebene Konzept der Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte konsequent weiter. Diese sind abgestimmt mit den

Ebenen des Modellrahmenwerks der Beschreibungssystematik. Auf diese Weise wird der in der VDI-Richtlinie beschriebene begleitende Prozess der Modellbildung und -analyse zum integrativen Bestandteil des eigentlichen Kernprozesses im V-Modell. Der mecPro²-Ansatz evolutioniert so den Grundgedanken des W-Modells von Anderl et al. (2012). Das Modellrahmenwerk bildet das Grundgerüst für eine modellbasierte Beschreibung der zu entwickelnden technischen Systeme und bildet somit den eigentlichen Problemlösungsprozess ab. Die Beschreibung der Systeme sowie die inbegriffene Problemlösung erfolgt dabei über mehrere Ebenen mit zunehmender Lösungskonkretisierung. Wie der Problemlösungszyklus der VDI 2206 (2004) basiert auch das Modellrahmenwerk auf den von Haberfellner et al. (2015) genannten Grundideen des Systems Engineering. Dabei werden alle benötigten Informationen des Mikrozyklus mittels der Beschreibungssystematik im Modell abgebildet. Neben einer konsequenten Evolution der VDI 2206 (2004) lässt sich auch ein Bezug zur VDI 2221¹ (1993) herstellen. In Bild 4 ist auf der linken Seite das Modellrahmenwerk aus mecPro² dargestellt. Die rechte Seite der Abbildung zeigt zum Vergleich das methodische Vorgehen zur Entwicklung technischer Systeme nach VDI 2221 (1993). Inhaltliche Überschneidungen sind farblich gekennzeichnet.

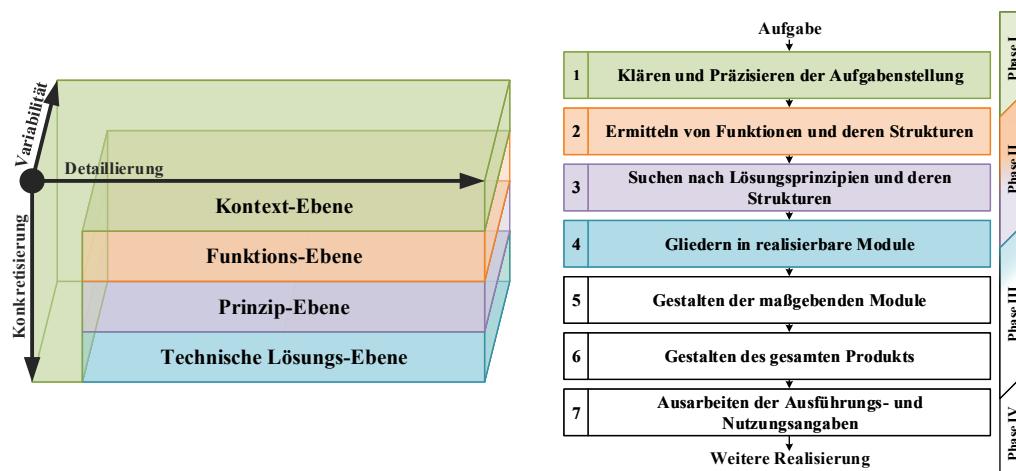


Bild 4: Vergleich zwischen mecPro²-Modellrahmenwerk (links) und dem Vorgehen nach VDI 2221 (rechts).
Abb. in Anlehnung an Eigner et al. (2015) und VDI 2221 (1993)

Im Vergleich mit der klassischen Vorgehensweise im Maschinenbau bzw. der Mechanik entspricht die Kontextebene vom Grundgedanken her der Spezifikationsphase. Im Detail unterscheiden sich beide allerdings deutlich, da in der Kontextebene ein Übersetzungsprozess von natürlichsprachlichen zu modellbasierten Anforderungen stattfindet, in dem die Anforderungen z. B. durch Anwendungsfälle, Zustandsautomaten oder Aktivitäten in SysML beschrieben werden. Die Funktions- und die Prinzipiebene entsprechen grob der zweiten Phase der VDI 2221 (1993). Die Aufteilung der Lösungselemente auf andere Organisationseinheiten entspricht vom Grundgedanken her der Gliederung in realisierbare Module in der Gestaltungsphase der klassischen Konstruktionsmethodik. Allerdings sind im mecPro²-Modellrahmenwerk weitere Zyklen der Problemlösung für die Lösungselemente vorgesehen. Im Gegensatz dazu sieht die dritte Phase nach VDI 2221 (1993) nach der Modularisierung die geometrische Ausgestaltung vor, die nicht Bestandteil von mecPro² ist und somit auch nicht im Modellrahmenwerk verankert wurde.

Ein entscheidender Unterschied zur VDI 2221 (1993) ist das inkrementell-iterative Vorgehen. So werden die einzelnen Prozessmodule und Konkretisierungsebenen nicht einmalig durchlaufen, sondern so oft wie nötig. Dabei wird das zu entwickelnde Produkt in Inkrementen realisiert. Diese Inkremente können nach verschiedenen Heuristiken bestimmt werden und erlauben so bspw. ein risikogetriebenes Priorisieren (vgl. Spiralmodell), ein agiles Vorgehen mittels Scrum oder Kanban oder die Berücksichtigung von Konzepten wie dem Minimum Viable Product (MVP). Hier löst das kontinuierliche Entwickeln von lösungsabstrakt zu lösungskonkret das Denken in frühen und späten

¹ Die VDI Richtlinie 2221 befindet sich aktuell in Überarbeitung. Da die neue Version zum Stand der Erstellung des Papers noch nicht offiziell erschienen ist, basiert der Vergleich auf der Version von 1993.

Phasen im Entwicklungsprozess ab. Ein solcher Paradigmenwechsel kann jedoch bei einem zu produzierenden Produkt nur realisiert werden, wenn dieser auch in der Produktionssystementwicklung umgesetzt wird. Auch das Produktionssystem ist inkrementell-iterativ zu entwickeln und nicht mehr einem phasenorientierten Wasserfallmodell folgend. Auch wenn dieses Vorgehen in der VDI 2206 (2004) bereits mittels eines Darstellungskniffs suggeriert wird (vgl. Bild 3-7 in VDI 2206 2004), so wird aus Sicht der Autoren ein solches Vorgehen erstmals durch den mecPro²-Ansatz konkreter beschrieben.

4 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vierten industriellen Revolution entwickeln sich technische Systeme zu cyberphysischen bzw. cybertronischen Systemen weiter. Die Veränderung der Produkte macht auch ein Überdenken der Entwicklungsprozesse und -methoden erforderlich. Bei der Entwicklung des mecPro²-Ansatzes wuchs die Erkenntnis, dass es für einen modellbasierten Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme mehr erfordert als ein Modellierungswerkzeug, methodische Beschreibungen und der Sprache SysML. Vielmehr müssen alle Prozessgebiete bzw. Fachdisziplinen konsequent in die modellbasierte Entwicklungswelt transformiert werden. Hierbei gilt es nicht, das Rad neu zu erfinden, sondern sich auf das bekannte Ingenieurwissen zu besinnen und dieses nach und nach im Prozessrahmenwerk und in der Beschreibungssystematik zu verankern. Dabei sollte der Fokus auf den Lösungsfindungsprozess gelegt werden. Hier werden die Beziehungen zwischen lösungsabstrakter und lösungskonkreter Information definiert, hier wird die Beschreibung vom Groben ins Feine sichtbar – und vor allem nutzbar. So hat die Beschreibung bspw. einen Nutzen für die Interoperabilität und Austauschbarkeit von Produkten bei einem Einsatz in cybertronischen Systemen. Die detaillierte Abbildung des Anforderungsraums ist die Basis für ein tiefes Kundenverständnis und die optimale Gestaltung des Lösungsraums. Dieser dient als Wissenssammlung und zur Kompetenzsteigerung in der Lösungsfindung. Die Lösungsfindung sollte dabei von keiner Fachdisziplin dominiert werden. Eine zu frühe, zu starke Nutzung der Geometrie zur Beschreibung des Lösungsraums schränkt diesen unnötig ein. Innovationen entstehen in einer beschleunigten Dynamik durch die synergetische Kombination der Lösungsangebote aller Fachdisziplinen. Hierfür sind disziplinenübergreifende Sprachen bzw. Notationen zur Kollaboration notwendig. In einem disruptiven Umfeld sind Schnelligkeit und Flexibilität gefragt. Dies macht eine Abkehr von wasserfall-orientierten Phasenmodellen notwendig. Produkt und Produktionssystem müssen inkrementell-iterativ entwickelt werden. Funktionsorientierung und Kundenverständnis helfen dabei, mit den kleinsten lebensfähigen Produkten schnell auf neuen Märkten präsent zu sein, anschließend aus der Nutzung der Produkte zu lernen und diese kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Der mecPro²-Ansatz kombiniert insbesondere die Stärken der bewährten Entwicklungsmethodiken des Maschinenbaus bzw. der Mechanik und des Systems Engineerings um diese unter Nutzung einer disziplinenübergreifenden Sprache im modellbasierten Entwicklungsprozess zu integrieren und möglichst nahtlos an die disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse und -methoden anzubinden.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PJ2573) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- Anderl et al. 2012 ANDERL, Reiner ; NATTERMANN, Roland ; ROLLMANN, Thomas: *Das W-Modell : Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme*. In: *PLM Portal* (2012).
- BMBF 2016 BMBF: *Industrie 4.0*. <https://www.bmbf.de/de/zukunftprojekt-industrie-4-0-848.html>, abgerufen am 27.07.16.

- Cadet et al. 2015 CADET, Marcel et al.: Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme. In: Binz, Hansgeorg et al. (Hrsg.): *Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP2015)*. 2015.
- Cadet et al. 2017 CADET, Marcel et al.: Referenzentwicklungsprozess für cybertronische Produkte und Produktionssysteme. In: Eigner, Martin et al. (Hrsg.): *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Berlin u. a. : Springer, 2017. (to appear)
- CMMI 2010 CMMI: *CMMI for Development, Version 1.3*. Software Engineering Institut, 2010.
- Eigner et al. 2015 EIGNER, Martin et al.: mecPro² : Entwurf einer Beschreibungssystematik zur Entwicklung cybertronischer Systeme mit SysML. In: Schulze, Sven-Olaf et al. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München : Carl Hanser, 2015, S. 163-172.
- Feldhusen und Grote 2013 FELDHUSEN, Jörg ; GROTE, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin u. a. : Springer, 2013.
- Grundel et al. 2015 GRUNDEL, Martin ; ABULAWI, Jutta ; LOEWNER, Joscha: Skizzen mit formalisierten Informationen anreichern. In: Schulze, Sven-Olaf et al. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München : Carl Hanser, 2015, S. 99-108.
- Haberfellner et al. 2015 HABERFELLNER, Reinhard et al.: *Systems Engineering*. Zürich : Orell Füssli, 2015.
- Hubka und Eder 1988 HUBKA, Vladimir ; EDER, W. Ernst: *Theory of Technical Systems*. Berlin u. a. : Springer, 1988.
- Lauenroth und Pohl 2005 LAUENROTH, Kim ; POHL, Klaus.: Principles of Variability. In: Pohl, Klaus et al. (Hrsg.): *Software Product Line Engineering*. Berlin : Springer, 2005, S. 57-88.
- Moeser et al. 2016 MOESER, Georg ; GRUNDEL, Martin ; WEILKIENS, Tim et al.: Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf. In: Schulze, Sven-Olaf et al. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München : Carl Hanser, 2016, S. 419-428.
- Naur und Randell 1969 NAUR, Peter ; RANDELL, Brian: *Software Engineering*. NATO Software Engineering Conference, 1969.
- Pahl und Beitz 1977 PAHL, Gerhard ; BEITZ, Wolfgang: *Konstruktionslehre*. Berlin u. a. : Springer, 1977.
- Ponn und Lindemann 2011 PONN, Josef ; LINDEMANN, Udo: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin u. a. : Springer, 2011.
- Pugh 1990 PUGH, Stuart: *Total design*. Harlow : Addison-Wesley, 1990.
- Quigley und Robertson 2015 QUIGLEY, John M. ; ROBERTSON, Kim L.: *Configuration Management*. CRC, 2015.
- Rodenacker 1991 RODENACKER, Wolf G.: *Methodisches Konstruieren*. Berlin u. a. : Springer, 1991.
- Rude 1998 RUDE, Stefan: *Wissensbasiertes Konstruieren*. Aachen : Shaker, 1998.
- Schulte et al. 2016a SCHULTE, Tim et al.: Systemmodelle verwalten mit ConfigML. In: Schulze, Sven-Olaf et al. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München : Carl Hanser, 2016, S. 323-332.
- Schulte et al. 2016b SCHULTE, Tim et al.: Erweiterung des integrierten Konzeptes aus Prozessrahmenwerk und Beschreibungssystematik von mecPro² um ein modellbasiertes Variantenmanagement. In: Schulze, Sven-Olaf et al. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München : Carl Hanser, 2016, S. 259-268.
- Ulrich und Eppinger 2012 ULRICH, Karl T. ; EPPINGER, Steven D.: *Product Design and Development*. New York : McGraw-Hill, 2012.
- VDI 2206 2004 Richtlinie VDI 2206 Juni 2004. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.
- VDI 2221 1993 Richtlinie VDI 2221 Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

Smarte Leichtbaulagerung durch innovative Sensorintegration und intelligente Auswertelgorithmen

Manuel Bauer, Markus Kley, Marco Thomisch

Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik und Abwärmenutzung, Aalen, Deutschland
Manuel.Bauer@hs-aalen.de

Abstract: Durch die zunehmende Relevanz des Themas *Industrie 4.0* wird die Vernetzung von Komponenten immer bedeutender. Hierbei ist es wichtig die Komplexität so gering wie möglich zu halten, d. h. die Funktion durch möglichst wenige Elemente bereitzustellen. Eine Drehverbindung ist aufgrund ihrer zentralen Position bedeutend für die Vernetzung. Aufgrund des Gewichtsvorteils kommen hier Drahtwälzlager zum Einsatz. Über das Condition Monitoring hinaus werden im Rahmen dieses Projekts weitere, für die Lagerung und für das Gesamtsystem wichtige Werte erfasst. Zur Detektion der Daten werden Piezobeschleunigungssensoren verwendet. Anschließend werden die Messreihen aufbereitet, verarbeitet und ausgewertet. Aufgrund gewollter und gegebener Unregelmäßigkeiten bei einem Drahtwälzlager ist das Grundsignal berechenbar. Abweichungen von diesen Amplituden müssen erfasst und bewertet werden, damit an diesen Größen die Belastung oder die Überlast festgemacht werden können. Es ändert sich die Frequenz der Amplituden bei Drehzahländerung, bei Belastungen oder anderen Krafteinflüssen ändert sich die Form. Hier müssen jedoch auftretende Streuungen und Überlagerungen bei den Algorithmen berücksichtigt werden.

Keywords: Intelligente Auswertelgorithmen, Drahtwälzlager, Sensorintegration, Condition Monitoring, smarte Leichtbaulagerung

1 Einleitung

Die Integration von intelligenten Maschinenelementen, auch smarte Maschinenelemente genannt, wird im Wandel hin zur vierten industriellen Revolution immer bedeutender. Aufgrund der prominenten Stelle einer Drehverbindung im Gesamtsystem können bei der Weiterentwicklung dieser Elemente signifikante Vorteile erzielt werden. In diesem Kontext wird am Beispiel eines Leichtbaulagers mittels innovativer Integration von Sensorik in erster Linie und durch intelligente Schnittstellen und Auswertelgorithmen in zweiter Linie die Funktionalität umfassend erweitert.

Das Condition Monitoring von Lagern ist ein großes Forschungsgebiet mit vielen Innovationen (Kolerus et al. 2014). Im Fokus stehen die Schadensvorhersage und sich daraus ergebende Wartung mit rechtzeitigem Tausch schadhafter Komponenten vor Eintritt eines Schadens mit hohen Folgekosten. Im Unterschied dazu sollen im Rahmen dieses Projekts weitere, für die Einzelkomponente und auch für das Gesamtsystem bedeutungsvolle Kenngrößen erfasst werden.

Um die Drehverbindung besonders leicht zu bauen werden Drahtwälzlager verwendet. Durch ihre kompakte und hochbelastbare Vier-Punkt-Geometrie ist eine maximale Konstruktionsfreiheit gegeben. Das Ziel ist es, möglichst wenige Sensoren an der Leichtbaulagerung zu positionieren und die generierten Daten so aufzubereiten und zu sortieren, dass eine Weiterverarbeitung möglich ist. Hierbei sollen den gegebenen Unregelmäßigkeiten (abweichende Kugelteilung, Drahtspalte) im Drahtwälzlager besonders große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Anhand dieser Daten können Drehzahl, Beschleunigung, Drehrichtung und die Vibrationen des Systems bestimmt werden. Das Bestreben liegt jedoch in der Erfassung des Belastungsbetrags und der -richtung sowie der Überlast. Dies ist die klare Differenzierung vom herkömmlichen Condition Monitoring.

Bei der Auswertung der durch die Sensorik generierten Daten muss für die Algorithmen die Streuung berücksichtigt werden. Hierbei muss durch eine Korrelationsanalyse die Strenge der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen ermittelt werden. Durch die Integration von Sensorik zur Zustands- und Positionserfassung und einem Antrieb kann das Maschinenelement als ein intelligentes,

systembestimmendes Bauteil im Gesamtsystem genutzt werden. Die smarten Lagerungen werden das System zum einen überwachen und zum anderen direkt in das System eingreifen. Das Lager wird somit zentrales Element für cyber-physical-systems wie z. B. Produktionsanlagen oder MRK-Roboter, Roboter die in einer Kollaboration mit Menschen arbeiten (Hermann et al. 2007). Die Arbeit läuft in Kooperation mit einem Unternehmen im Rahmen eines geförderten Projekts (Förderkennzeichen: ZF4113804PO6).

2 Stand der Technik

Die Kombination aus miniaturisierten Leichtbaulagerungen und hochintegrierten intelligenten Lagerungen ist auf dem aktuellen Stand der Technik nicht verfügbar. Es wurden von den großen Wälzlagerherstellern bereits viele Lösungen zum Condition Monitoring erarbeitet. So wurde von SKF z. B. ein drahtloses System entwickelt, welches die Energie für die Sensoren selbst erzeugt (Seidel et al. 2013). Ein System der Schäffler Gruppe hat den Vorteil des ständigen Datenaustauschs zwischen Sensoren und der Steuerung. Diese vergleicht Ist- und Soll-Werte und leitet bei Fehlmeldungen entsprechende Wartungsaktionen ein, z. B. einen Impuls an den Schmierstoffgeber (Adelhardt et al. 2015). Drahtwälzlager wurden seither weder im Bereich Condition Monitoring noch in weiter fortgeschrittenen Bereichen betrachtet.

2.1 Drahtwälzlager

Drahtwälzlager unterscheiden sich von normalen Wälzlagern in der Eigenschaft, dass bei ihnen die massiven Außen- und Innenringe durch je zwei Drähte ersetzt werden (siehe Bild 1). In der Anordnung sind es zwei Drahtringe außen und zwei Drahtringe innen, die jeweils in eine passende Aussparung der Applikation gelegt sind. Die gebogenen Drahtringe mit einem kleinen Spalt an den Drahtenden können unterschiedliche Querschnitte haben und sind üblicherweise an der Lauffläche geschliffen. Durch geschickte Wahl der Parameter beim Umformprozess können sowohl der Eigenspannungsverlauf als auch die Rückfederungseigenschaften auf die Applikation optimal gewählt werden (Thomisch et al. 2015). Die Lager werden u. a. in den Bereichen Leichtbau, Robotik und Medizintechnik eingesetzt. Drahtwälzlager bieten bzgl. Steifigkeit und Leichtbau herausragende Vorteile gegenüber Dünnringlagern.

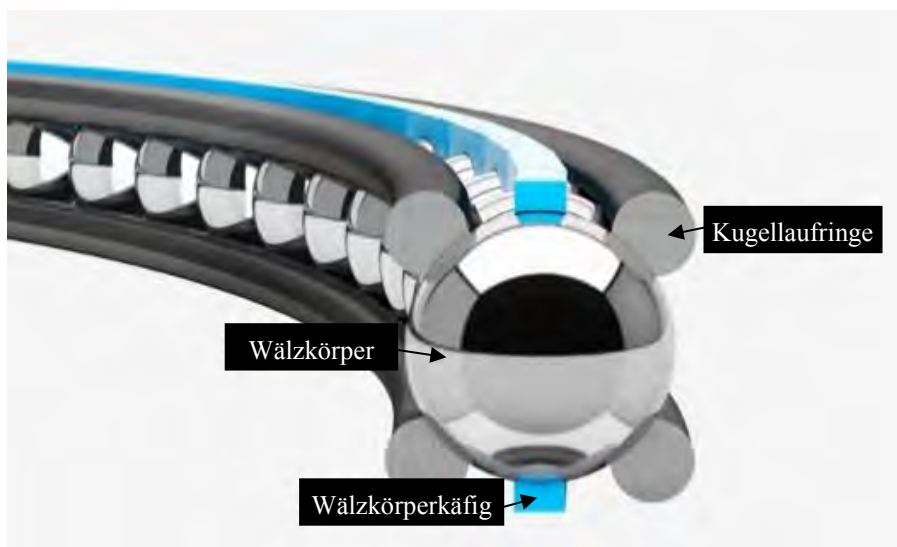


Bild 1: Drahtwälzlager (Franke GmbH 2016)

2.2 Condition Monitoring

Zumal Wälzlager sehr zuverlässig sind und die Produktlebensdauer des Gesamtsystems oft überstehen, ist es in den meisten Fällen ausreichend, wenn die Anwendung von einem Mitarbeiter oder dem

Bediener überwacht wird. Zum Teil wird jedoch eine permanente Überwachung, welche auch Condition Monitoring genannt wird, angebracht. Dies ist z. B. sinnvoll, wenn durch den Ausfall des Wälzlagers Mensch oder Umwelt gefährdet werden oder ein unerwarteter Lagerausfall einen hohen Produktionsausfall verursacht. (Wünsch 1996; Kolerus et al. 2014)

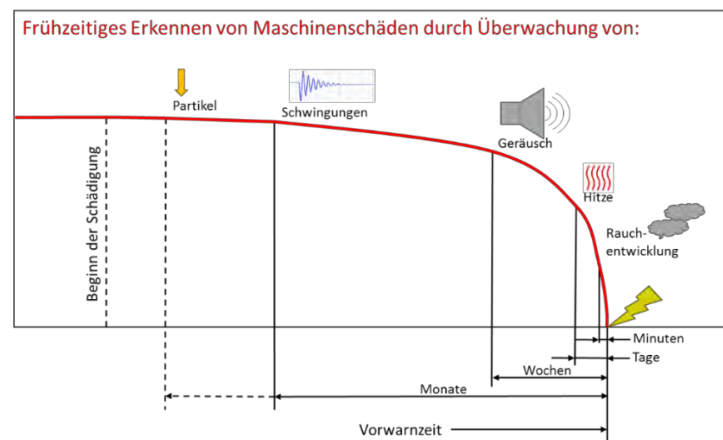


Bild 2: Schadensverlauf und Detektierbarkeit in Abhängigkeit der Zeit (vgl. Schaeffler 2015)

Im Rahmen dieser Überwachung ist ein Lagerschaden durch unterschiedliche Sensoren zu erkennen. Wie in Bild 2 dargestellt, ist das Detektieren von Partikeln im Schmierstoff die früheste Möglichkeit Auffälligkeiten zu entdecken. Nur kurze Zeit später, mit unwesentlicher Änderung des Maschinenverhaltens, kann ein Schaden durch Schwingungsmessung erkannt werden. Hört sich ein Wälzlager bereits abnormal an, dauert es nicht mehr lange bis zum vollständigen Defekt. Dazwischen kann nur noch Hitze- oder daran anschließende Rauchentwicklung wahrgenommen werden. Weil nur durch die Betrachtung von Partikeln im Schmierstoff oder durch die Schwingungsüberwachung eine frühzeitige Erkennung möglich ist, sollte eines dieser Verfahren eingesetzt werden. Hier hat die Schwingungsmessung wegen der, im Vergleich zur Schmierstoffanalyse, geringen Komplexität und der aussagekräftigeren Signale deutliche Vorteile.

Die beschriebene Methode der Detektion von Schwingungen ist nur möglich, wenn das Produkt aus dem mittleren Lagerdurchmesser d_m und der relativen Drehzahl n den Vergleichswert von $30.000 \frac{mm}{min}$ überschreitet und die Schwingung dadurch genügend energiereich wird. Die Energie E der Schwingung ist proportional zur Umfangsgeschwindigkeit v . Weil das Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Radius r die Umfangsgeschwindigkeit v ergibt, hängen diese Werte direkt mit der Energie E zusammen. (Schaeffler 2015)

$$E \sim v^2 \text{ und } v = \omega \cdot r, \text{ somit } E \sim (\omega \cdot r)^2$$

Je größer das Lager ist, desto geringer kann die Drehzahl sein bei der ein Schaden detektiert werden kann. Außerdem ist das Schwingungsverhalten zusätzlich von der schwingenden Masse, von den Dämpfungseigenschaften des Materials, den Schmierverhältnissen und der Last auf das Lager abhängig. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass durch das Überrollen von Schadstellen ein Körperschall bzw. Vibrationen entstehen können, welche dann von Beschleunigungssensoren in elektrische Signale umgewandelt werden. Die Signale liegen im Wesentlichen in einem Frequenzbereich unter 100 kHz. (Schaeffler 2015)

2.3 Sensoren

2.3.1 Vibrationsüberwachung

Es gibt unterschiedliche Arten von Beschleunigungssensoren die nach verschiedenen Wirkprinzipien funktionieren. Zur Überwachung von Gesamtsystemen und Einheiten werden standardmäßig

piezoelektrische Beschleunigungssensoren eingesetzt. Ein Vorteil dieser Sensoren ist, dass in einem gewissen Frequenzbereich die Übertragungsfunktion annähernd konstant ist und dadurch eine genaue, lineare Messung von Absolutwerten möglich ist. Ein Nachteil ist, dass diese piezoelektrischen Sensoren einen oder mehrere Resonanzbereiche aufweisen in denen die Signalamplituden unvorhersehbar groß werden können. Deshalb ist eine Messung von Absolutwerten in diesem Bereich nicht möglich. (Schaeffler 2015)

2.3.2 Temperaturüberwachung

Im konstanten Betriebsfall stellt sich in den Wälzlager eine annähernd gleichbleibende Temperatur ein. Diese wird über Temperatursensoren, welche am zu überwachenden Bauteil angebracht sind, erfasst. Stellt sich bei gleichbleibender Belastung, Drehzahl und Umgebungstemperatur eine Abweichung zur Referenztemperatur ein, so ist dies möglicherweise der Hinweis auf einen gestörten Schmierzustand. Daraus resultierende Lagerausfälle können durch eine schnelle Behebung der Störungsursache vermieden werden. (Schaeffler 2015)

2.4 Signalaufbereitung

Bevor die generierten Messdaten der Beschleunigungssensoren in Form eines elektrischen Signals ausgewertet werden können, müssen sie konditioniert werden. Für diese Konditionierung werden Hoch- und Tiefpassfilter sowie Demodulation zur Hüllkurvenbildung eingesetzt. Die analogen Signale werden für die Weiterbearbeitung digitalisiert, relevante Signalanteile hervorgehoben und Störsignale unterdrückt. (Schaeffler 2015)

Um unerwünschte Prozesssignale aus einem Zeitsignal beispielsweise mit einem Bandpassfilter zu entfernen, müssen diese identifiziert und das zu erwartende Frequenzband dieser Störsignale festgelegt werden. Diese unerwünschten Signale resultieren aus der Bewegung anderer Teile und werden oft als Prozessgeräusche wahrgenommen. (Schaeffler 2015)

Die Konditionierung kann analog oder digital durchgeführt werden. Es ist jedoch ein analoger Tiefpassfilter vor der digitalen Abtastung notwendig um Spiegelfrequenzen zu vermeiden. Alle Frequenzanteile die über der halben Abtastfrequenz der digitalen Signalverarbeitung liegen, werden deshalb entsprechend dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem herausgefiltert. (Schaeffler 2015; Shannon 1984)

Dass die Signalamplituden im Resonanzbereich unvorhersehbar groß werden können, wird in der Signalaufbereitung gezielt genutzt. Wenn der Sensor allerdings eine geringe mechanische Dämpfung aufweist kann der Signalverstärker im Resonanzfall übersteuert werden. Dies führt zu einem fehlerhaften Ausgangssignal. (Schaeffler 2015)

Mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) können die Daten übersichtlich dargestellt werden. (Kley et al. 1999)

3 Theoretische Signalgenerierung

Wie im Stand der Technik dargestellt, gibt es im Bereich des Condition Monitoring bereits ausgereifte Systeme die Defekte detektieren. Hierbei ist es mit Hilfe von Beschleunigungssensoren auch möglich anhand der Amplitudenfrequenz die Lokalität des Schadens zu ermitteln. In den weiteren Schritten wird die theoretische Signalgenerierung beschrieben. Diese theoretischen Signale werden verwendet um die Plausibilität der Annahmen zu überprüfen und um einen Vergleich mit den realen Messergebnissen zu bilden.

3.1 Überrollen des Drahtspalts

Wie bereits in 2.1 Drahtwälzlager beschrieben, verbleibt nach dem Biegen der Drähte an der Kontaktstelle der beiden Enden ein kleiner Spalt, Bild 3. Ist das Drahtwälzlager in Bewegung wird der

Spalt von jeder Kugel überrollt. Beim Überrollen des Spalts entsteht an den Kugeln jeweils ein Stoß, der sich über Körperschall ausbreitet.

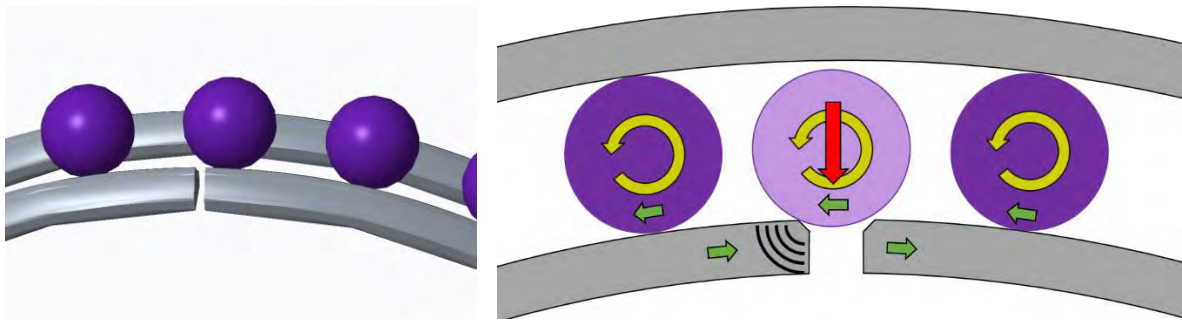


Bild 3: Darstellung des Drahtspalts und der Vibrationserzeugung in Zusammenhang mit den Kugeln

3.2 Theoretische Signalberechnung

Für die erste mathematische Betrachtung wird der Impuls vereinfacht als Dirac-Stoß, also als idealer Impuls angenommen. Bei dieser Vereinfachung verstreicht während des Impulses keine Zeit, das heißt, graphisch sind parallel zur Ordinate in bestimmten Zeitabständen auf der Abszisse gerade Linien nach oben. Diese Dirac-Stoßfolge stellt jeden einzelnen Überrollimpuls der Kugeln dar.

Die Überrollfrequenzen f_a und f_i für die Drahtspalte an den Außen- und Innenringen des Drahtwälzlagers lassen sich mit den Formeln (1) und (2) berechnen:

$$f_a = \frac{1}{2} \cdot f_n \cdot Z \cdot \left(1 - \frac{D_w}{D_{pw}} \cdot \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$f_i = \frac{1}{2} \cdot f_n \cdot Z \cdot \left(1 + \frac{D_w}{D_{pw}} \cdot \cos \alpha \right) \quad (2)$$

In den Gleichungen bezeichnet f_n die Relativfrequenz von Innen- und Außenring. Diese ist im Regelfall mit der Wellenfrequenz identisch. Weiterhin bedeuten Z die Anzahl der Wälzkörper, D_w den Wälzkörperdurchmesser und D_{pw} den Teilkreisdurchmesser der Wälzkörper in mm und α den Druckwinkel in Grad. (Schlecht 2010)

In Summe ergeben sich bei einem Drahtwälzlager vier Signalanteile. Diese resultieren aus den zwei Außenringen und den zwei Innenringen und sind überlagert. Aufgrund der Überlagerung ist die Positionierung der Drahtspalte für eine sinnvolle Datengenerierung entscheidend. An dieser Stelle haben die Anzahl und der Abstand der Kugeln einen großen Einfluss. Wie in Bild 4 dargestellt wird der Käfig an einer Stelle zusammengeführt und hat dort eine von der Lagergröße abhängige, abweichende Kugelteilung. Diese Abweichung ergibt sich durch die Verwendung eines endlosen Käfigbandes welches für die entsprechende Kugelanzahl abgeschnitten wird. Dadurch ergibt sich für jede Lagergröße eine andere abweichende Kugelteilung p_a welche mit der Formel (3) berechnet werden kann, wobei die normale Kugelteilung p_n im Datenblatt angegeben ist.

$$p_a = D_{pw} \cdot \pi - \left(\left\lfloor \frac{D_{pw} \cdot \pi}{p_n} \right\rfloor - 1 \right) \cdot p_n \quad (3)$$

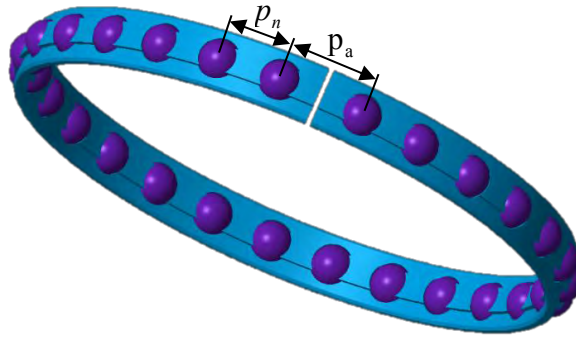


Bild 4: Käfig mit abweichender Kugelteilung

Durch die Abweichung der Kugelteilung ergibt sich jeweils ein differierender Drehwinkel φ_n und φ_a für die normale und für die abweichende Kugelteilung zwischen den überrollenden Kugeln (Formel (4) und (5)):

$$\varphi_n = \frac{p_n \cdot 2}{D_{pw}} \quad (4)$$

$$\varphi_a = \frac{p_a \cdot 2}{D_{pw}} \quad (5)$$

Wenn die Drehfrequenz konstant bleibt, die Kugelteilung aber an einer Stelle abweicht, ergibt sich durch die unterschiedlichen Drehwinkel ein anderes Zeitintervall zwischen den Signalen. Diese ist in Bild 5 und Bild 6 an dem abweichenden Signalabstand erkennbar.

Mit Hilfe der unterschiedlichen Winkel lässt sich ein Zeitintervall zwischen den Signalen in Abhängigkeit der Drehfrequenz bzw. der Überrollfrequenz für die inneren und für die äußeren Drahtreife berechnen. Hierbei stehen das t für das Zeitintervall, der erste Buchstabe im Index für normale oder abweichende Teilung und der zweite Buchstabe für Innen- oder Außenring:

$$t_{na} = \frac{\varphi_n \cdot \pi}{f_a} \quad (6)$$

$$t_{aa} = \frac{\varphi_a \cdot \pi}{f_a} \quad (7)$$

$$t_{ni} = \frac{\varphi_n \cdot \pi}{f_i} \quad (8)$$

$$t_{ai} = \frac{\varphi_a \cdot \pi}{f_i} \quad (9)$$

Die Signale werden durch die Berechnung für die Innenringe und die Außenringe einzeln dargestellt.

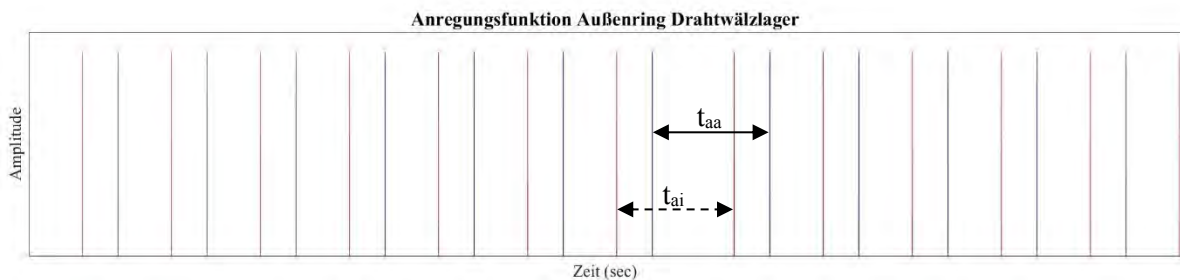


Bild 5: Signale der beiden äußeren Drähte in Form einer Dirac-Stoßfolge

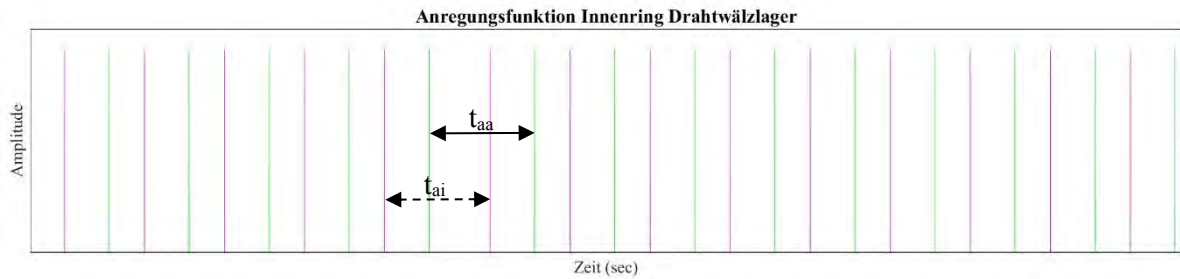


Bild 6: Signale der beiden inneren Drähte in Form einer Dirac-Stoßfolge

Um mehr Informationen zu gewinnen werden die zwei äußeren und die zwei inneren Drahtspalte jeweils zueinander verdreht. Der Wert für die Verdrehung wird in Prozent angegeben und muss durch die Auswertung von Versuchsergebnissen angepasst werden. Weil auch in dem vorgespannten Drahtwälzlager ein leichter Schlupf nicht zu verhindern ist, ist die Position der Innenringspalte zu den Außenringsspalten nicht definierbar und wird sich im Betrieb kontinuierlich leicht verschieben. Die Auswirkung ist durch praktische Versuche zu bewerten. Für die Berechnung der Verdrehung γ_a und γ_i wird der Drehwinkel φ_n angenommen und mit einem Verdrehfaktor j_a bzw. j_i multipliziert.

$$\gamma_a = \varphi_n \cdot j_a \quad (10)$$

$$\gamma_i = \varphi_n \cdot j_i \quad (11)$$



Bild 7: Signale der äußeren und inneren Drähte in Form einer Dirac-Stoßfolge

Diese Dirac-Stoßfolge (Bild 7) ist nur eine theoretische Darstellung und wird in den folgenden Schritten näher an die Realität geführt. Vor allem das Abklingen der Schwingung nach der Anregung muss betrachtet werden. Abhängig von der Dämpfungskonstante, der Masse, der Amplitude und der Kreisfrequenz des Systems klingt die Schwingung ab. Je schneller dies geschieht, desto klarer werden die Signale bei der Messung. Wird über jeden Diracstoß eine derartige gedämpfte Schwingung gelegt, ergibt sich annähernd der in Bild 8 dargestellte Verlauf. (Schlecht 2010)

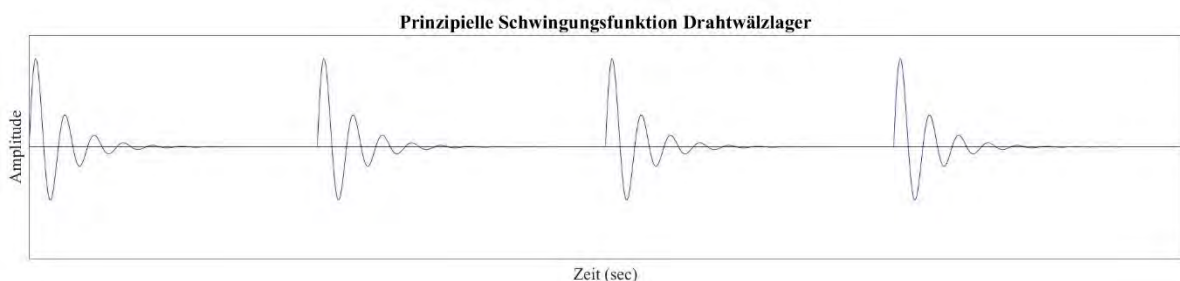


Bild 8: Abklingende Schwingung

Als weitere Verfeinerung des theoretischen Signals ist zu beachten, dass sich die Amplitude der Schwingungsanregung am Innenringspalt von der vom Außerringspalt unterscheidet. Weil der Abstand zwischen dem Sensor und dem Innenring größer ist und die Schwingung bis zum Sensor Energie verliert,

ist die Amplitude bereits gedämpft. Durch diese Anpassung lässt sich ein Signal des Innenrings von dem des Außenrings unterscheiden. In Bild 9 sind alle vier Signale in unterschiedlichen Farben dargestellt.

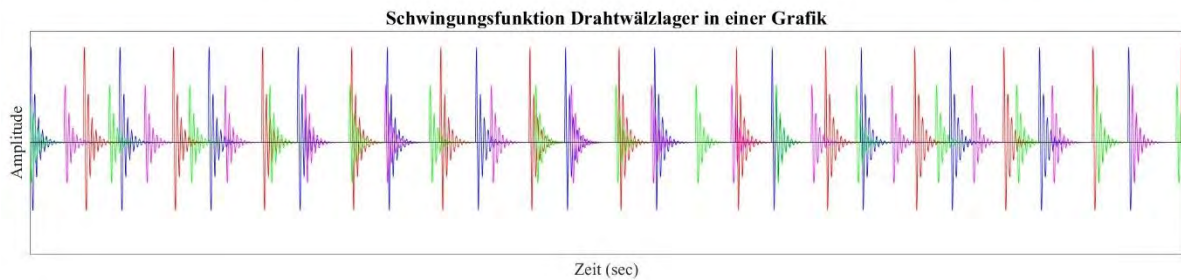


Bild 9: Alle durch die Drahtspalte erzeugten Signale

In Bild 10 sind die Schwingungen aus Bild 9 überlagert und dadurch realitätsgetreu. Durch die Überlagerung lässt es sich teilweise nicht mehr bestimmen welches Signal an welcher Stelle vorliegt.

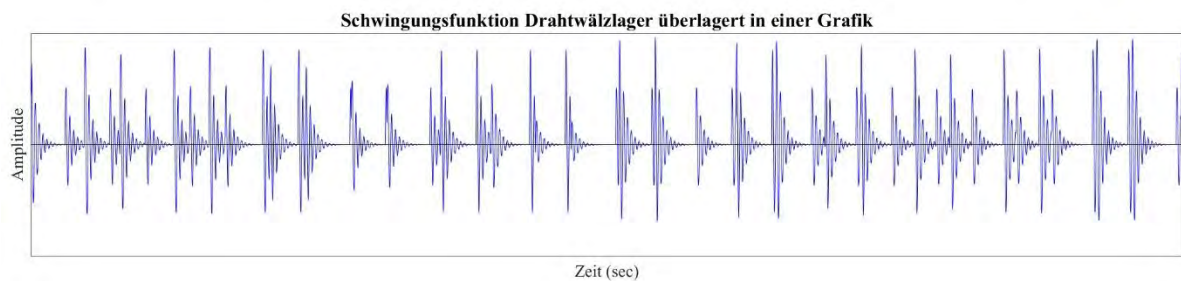


Bild 10: Alle durch die Drahtspalte erzeugten Signale in einer überlagerten Form

Nachdem die Signale wie in Bild 10 dargestellt realistisch vorliegen, müssen diese nun aufbereitet werden. Für die weitere Signalaufbereitung können z. B. folgende Verfahren eingesetzt werden:

- Spektralanalyse
- Stochastische Verfahren
- Autokorrelation
- Cepstrumanalyse
- Hüllkurvenanalyse

Es ist zu beachten, dass normale Wälzlagerschäden zu periodisch, stoßförmig angeregten Schwingungen führen. Dieser Fall tritt bei einem Drahtwälzlager durch die unterschiedliche Teilung nur bedingt auf. Nur mit dem Hüllkurvensignal kann eine exakte Erkennung und Bestimmung der Stoßfolgenfrequenz selbst bei schwachen bzw. gestörten Signalen erfolgen. (Geropp 1995)

In den weiteren Schritten werden anhand der generierten und aufbereiteten Signale folgende Erkenntnisse abgeleitet:

- **Drehzahl:** Für die Umrechnung in die Drehzahl ist die Überrollfrequenz am stehenden Ring ausreichend. Diese muss erkannt werden und kann dann mit Hilfe eines Umrechnungsfaktors berechnet werden.
- **Beschleunigung:** Die Beschleunigung ist eine Erweiterung der Drehzahldetektion. Die Änderung der Drehzahl wird in kleine Schritte aufgeteilt. Anhand der Drehzahländerung kann die Beschleunigung berechnet werden.
- **Drehrichtung:** Um die Drehrichtung bestimmen zu können muss ein Spalt asymmetrisch verschoben werden. Werden die zwei Spalte außen betrachtet, weil das Signal dort stärker ist, müssen diese zueinander verdreht sein um aussagekräftige Signale zu erhalten. Zwischen dem

Überrollen des Spalts einer Kugel bis zur nächsten Kugel vergeht eine Zeit t . Um eine Asymmetrie zu erreichen muss der andere Spalt so verdreht werden, dass dessen Signal nicht genau bei $t/2$ erscheint. Dadurch kann die Drehrichtung unterschieden werden.

- **Belastungsbetrag und Richtung:** Wird das Wälzlager belastet, wird die Vorspannung in den einen Bereichen verstärkt und in anderen reduziert. Dadurch ändert sich die lokale Energiedissipation und damit die Dämpfungskonstante des Systems welche Auswirkung auf das Abklingen der Schwingungen hat. Somit kann zwischen einem Kippmoment, einer radialen Kraft oder einer axialen Kraft anhand der Amplitudenform unterschieden werden. Wenn dieser Prozess validiert wurde, kann außerdem durch die Schwingungsform ein Wert der Belastung abgeleitet werden. Dies erfolgt durch den Betrieb in unterschiedlichen Belastungsfällen. (Sturm et al. 1986)
- **Überlast:** Ist der Belastungsbetrag und seine Richtung aufgrund der Form bestimmt, kann daraus direkt eine auftretende Überlast erkannt werden.
- **Vibrationen des Systems:** Die Vibrationen können direkt von den Beschleunigungssensoren übernommen werden, wenn die Signale vom Wälzlager von der Überlagerung subtrahiert werden. Dadurch liegt nur noch das Grundrauschen des Systems vor.

4 Versuche

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung wurden bereits Versuche zur Erkennung des Drahtwälzlagerzustands durchgeführt. Hierfür wurden zum einen der Luftschall mit einem Mikrofon und zum anderen der Körperschall mit einem piezoelektrischen Beschleunigungssensor aufgenommen. Das gemessene Beschleunigungssignal wurde in Abhängigkeit der Zeit mittels FFT in ein Beschleunigungssignal über die Zeit sowohl für den Luft- als auch für den Körperschall aufgetragen. Die berechneten lagertypischen Frequenzen sind deutlich im Sinne von hohen Amplituden erkennbar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt die Grundlagen für die Integration von piezoelektrischen Beschleunigungssensoren in ein Drahtwälzlager dar. Das Ziel ist es eine smarte Leichtbaulagerung durch innovative Sensorintegration zu schaffen. Dabei werden vorerst die theoretischen Betrachtungen dargestellt und möglichst nah an realistische Messungen herangeführt. Nachdem ein theoretischer Verlauf der Beschleunigungsamplitude über der Zeit vorliegt wird dieser anhand von bereits erfolgten Messungen auf die Plausibilität geprüft und in Zukunft auf einem speziellen Prüfstand abgeglichen. Dadurch können die Ursachen für eventuelle Abweichungen erkannt und entweder im theoretischen Signalverlauf oder in der Anordnung des Versuchsaufbaus geglättet werden. Des Weiteren soll die Signalaufbereitung und die Signalverarbeitung weiter verbessert werden, damit relevante Daten gefiltert und unwichtige verworfen werden.

Der Fokus wird jedoch auf der Erkennung der anliegenden Kraft und Belastung liegen. Hier sind klare und gut aufbereitete Signale äußerst wichtig, damit die Algorithmen zuverlässig fungieren. Arbeiten das Drahtwälzlager, die Sensoren und die Auswerteeinheiten im Prüffeld zuverlässig zusammen, kann die Lagerung unter Berücksichtigung von Interaktionen in Form von Koppelschwingungen oder erzwungenen Schwingungen in ein Gesamtsystem übernommen werden und dort als multifunktionales Element agieren.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen, welche vom Institut für Antriebstechnik und Abwärmenutzung der Hochschule Aalen durchgeführt wurden, werden im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) vertretenen AiF Projekt GmbH als Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen: ZF4113804PO6 gefördert. Die Autoren danken hierfür. Weiterhin danken sie der kooperierenden Fa. Franke GmbH und allen Beteiligten, die an diesem Projekt mitwirken.

Literatur

- Adelhardt et al. 2015 ADELHARDT M. (HRSG.); KATZENBERGER J.: „*Smart Sensoring*“: *Mit intelligenten Wälzlagerlösungen vom Produkt zur Dienstleistung*. Schaeffler Gruppe 2015.
- Franke GmbH 2017 FRANKE GMBH 2017:
<http://www.franke-gmbh.de/drahtwaelzlager/grundlagen/#slide-2>;
abgerufen 2017-03-28.
- Geropp 1995 GEROPP, B.: *Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse*. Verlag der Augustinus Buchhandlung 1995.
- Hauptmann 2011 HAUPTMANN P.: *Sensorsysteme – Wälzlagerdiagnose mit Beschleunigungssensoren*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 2011.
- Herrmann et al. 2007 HERRMANN, T.; BINZ, H.; ROTH, D.: *Methodeneinsatz im Innovationsprozess*. In: Deutsches Institut für Betriebswirtschaft (Hrsg.): *Ideen- und Innovationsmanagement* 42 (2016), Nr. 4, S. 133-140. - ISSN 2198-3143.
- Kolerus et al. 2014 KOLERUS, J.; WASSERMANN, J.: *Zustandsüberwachung von Maschinen*. Expert verlag 2014.
- Kley et al. 1999 KLEY M.; VALLE C.; JACOBS L.; QU J.; JARZYNSKI J.: *Development of dispersion curves for two-layered cylinders using laser ultrasonics*. Acoustical Society of America, Vol. 106, No. 2, August 1999.
- Schaeffler 2015 SCHAEFFLER, Schaeffler Technologies AG & Co. KG: *Wälzlagerpraxis*. 4. Aufl. Mainz : Vereinigte Fachverlage GmbH, 2015.
- Seidel et al. 2013 SEIDEL D. (HRSG.); SCHLEYER R.: *Intelligente Lager revolutionieren die Zustandsüberwachung von Maschinen*. SKF Insight 2013.
- Schlecht 2010 SCHLECHT, B.: *Maschinenelemente 2 Getriebe-Verzahnungen-Lagerungen*. Pearson Studium, 2010.
- Shannon 1984 SHANNON, C. E.: *Communication in the Presence of Noise*. Proceedings of the IEEE, Vol. 72, Issue: 9, Sept. 1984, 1192-1201.
- Sturm et al. 1986 STURM A.; FÖRSTER R.; HIPPMANN, N.; KINSKY D.: *Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen*. Verlag TÜV Rheinland 1986.
- Thomisch 2015 THOMISCH, M.; KLEY, M.: *Experimentelle Ermittlung von Werkstoffkenngrößen für innovative Leichtbauprodukte – Bauschinger-Kenngrößen für 54SiCr6 auf Basis von Zug-/Druckversuchen*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 46, 8, 2015, 852-859.
- Wünsch 1996 WÜNSCH, D.; KÄSLER, R.; DECKERS, J.: AKIDA 1996: *Praxisgerechtes Konzept zur Erfassung und Diagnose von Verzahnungs- und Wälzlagerzuständen*. Verlag der Augustinus Buchhandlung 1996, Seite 383-397.

Dynamische Rekonfiguration als neue Engineering-Herausforderung im Lebenszyklus Smarter Produkte

Michael Abramovici, Jens Christian Göbel, Philipp Savarino, Philip Gebus

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Bochum, Deutschland
philipp.savarino@itm.rub.de

Abstract: Gegenwärtige Innovationen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sind die maßgeblichen Treiber für die digitale Transformation traditioneller Produkte zu einer neuen Generation von Produkten, sogenannter „Smarter Produkte“. Dieser Wandel der Produkte geht einher mit dem Bedarf grundlegend veränderter Engineering-Prozesse. Aufgrund der charakteristischen Eigenschaften von Smarten Produkten darf die Produktentwicklung nicht mehr nur die frühen Phasen des Produktlebenszyklus fokussieren, sondern muss den gesamten Produktlebenszyklus, insbesondere die Produktnutzungsphase, berücksichtigen. Eine zentrale neue Herausforderung in diesem Kontext ist die Rekonfiguration bereits bestehender Smarter Produkte über verschiedene Engineering-Domänen hinweg. In diesem Beitrag wird ein Ansatz für die Rekonfiguration Smarter Produkte aufgezeigt, der basierend auf dem Konzept des virtuellen Produktzwillings die dynamischen Veränderungen der virtuellen und realen Produktinstanzen in integrierter Weise berücksichtigt. Dieser Ansatz wurde in einer Modellumgebung für smarte Fahrzeuge, die während ihrer Nutzungsphase temporär rekonfiguriert werden, prototypisch implementiert und validiert.

Keywords: Rekonfiguration, Smarte Produkte, Virtueller Zwilling, Lifecycle Engineering

1 Motivation

Gegenwärtige Innovationen in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) führen zu drastischen Veränderungen der traditionellen Produkte hin zu Smarten Produkten (SP). Smarte Produkte sind definiert als intelligente, multidisziplinäre Produkte, die in der Lage sind mit ihrer Umwelt und anderen Smarten Produkten mittels Internet-basierter Services zu kommunizieren und zu interagieren (Abramovici 2014). Weitere Charakteristika Smarter Produkte sind ihr hoher Personalisierungs- und Autonomiegrad, eine hohe Anzahl multidisziplinärer Komponenten sowie die dynamische Rekonfigurierbarkeit entlang des gesamten Lebenszyklus (Anderl u. a. 2012). Gleichsam erfordern diese Eigenschaften einen Wandel der traditionellen Engineering Prozesse und eine integrierte Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, die die produzierenden Unternehmen in den gesamten Produktlebenszyklus integrieren (z.B. Produkt-Service Systeme oder multi-sektorale Geschäftsmodelle) (Abramovici u. a. 2015; Lutters u. a. 2014). Die Internet-basierten Services ermöglichen die Anbindung von Smarten Produkten an Cloud-Plattformen und den Zugang zu einer enormen Menge an Nutzungsdaten der physischen smarten Produktinstanzen. Dies birgt wiederum enorme Potentiale für die IT-basierte Rekonfiguration von Smarten Produkten. Insbesondere der große Funktionsumfang, der auf dem Einsatz von Softwarekomponenten beruht, bietet multiple und dynamische Optionen für die Rekonfiguration Smarter Produkte während ihrer Nutzungsphase. Z.B. kann die funktionale Ausstattung eines smarten Fahrzeugs durch Internet-basierte Parkassistenzservices (temporär) während der Nutzungsphase rekonfiguriert werden (Abramovici u. a. 2016a).

2 Von der Konfiguration traditioneller zur Rekonfiguration Smarter Produkte

Eine Produkt-Rekonfiguration ist grundsätzlich als Modifikation eines bereits bestehenden Produkts zu verstehen, damit dieses veränderten Anforderungen gerecht wird (Männisto u. a. 1999). Hinsichtlich der

charakteristischen Eigenschaften von Smarten Produkten verfolgen Rekonfigurationsprozesse insbesondere die folgenden Ziele:

- Die allgemeine technische Verbesserung von Produktklassen (z.B. die Implementierung von neuen Software Releases für eine Generation von smarten Fahrzeugen) oder die
- individuelle Verbesserung von Produktinstanzen durch die Erweiterung des Funktionsumfangs (z.B. IT-basierte Parkassistenzsysteme für smarte Fahrzeuge) oder IT-Services (z.B. ein cloud-basiertes, individuell abgestimmtes Energiemanagement für ein smartes Fahrzeug).

Als Grundlage für einen methodischen Rahmen zur Rekonfiguration von Smarten Produkten können Ansätze aus dem Konfigurationsmanagement dienen. Die ISO-Norm 10007 befasst sich u.a. mit der Einteilung eines Produktes in Konfigurationseinheiten, die eine Endgebrauchsfunktion erfüllen. Diese Konfigurationseinheiten sind Bestandteil eines Konfigurationsmanagementmodells, in welchem das Lenken von Änderungen im Sinne der Rekonfiguration von Konfigurationseinheiten fester Bestandteil ist (ISO 10007). Dies setzt jedoch ein kontinuierliches Monitoring bzw. eine lebenszyklusbegleitende Erfassbarkeit der aktuellen Instanzenkonfiguration voraus. Gleiches gilt für Produktkonfiguratoren, die heute insbesondere im Rahmen der kundenindividuellen Massenproduktion Verwendung finden. Das dort integrierte Regelwerk bedarf kontinuierlicher Anpassungen für alte, bestehende Produktinstanzenkonfigurationen sowie der Erweiterung durch Regeln für neu entwickelte Varianten, um inkompatible Rekonfigurationen zu vermeiden (Zhang u. a. 2015). Im Rahmen der Norm DIN EN 61499 wurden Funktionsbausteine eingeführt, die Konfigurationszustände von Kontrolleinheiten beschreiben. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung von (agilen) industriellen Leitsystemen (DIN EN 61499). Dieser methodische Ansatz wurde in einigen Forschungsaktivitäten aufgegriffen, insbesondere im Rahmen von Rekonfigurationsfragestellungen mit Schwerpunkt auf Elektronik- und Softwarekomponenten (Lepuschitz u. a. 2011; Olsen u. a. 2005).

Im Rahmen dieses Beitrags soll ein Anwendungsfall mit einem smarten Fahrzeug als repräsentatives Beispiel für ein Smartes Produkt betrachtet werden. Besonders die enorme Komplexität hinsichtlich der Dynamik von Produktkonfigurationen sowie des Kommerzialisierungspotentials über verschiedene Smarte Systeme hinweg (beispielsweise Smarte Energiesysteme) bieten ein immenses Spektrum an potenziellen Rekonfigurationsoptionen entlang des Produktlebenszyklus. Eine Analyse des Rekonfigurationsspektrums entlang des Lebenszyklus eines smarten Fahrzeugs führte zu dem Ergebnis, dass die zuvor genannten Ansätze aus dem Konfigurationsmanagement für Smarte Produkte um folgende Anforderungen erweitert werden müssen:

- Kontinuierliche Entwicklung und Erweiterung von Produktmodellen unter Berücksichtigung der Kompatibilität zu den vorherigen Produktmodellen, die bereits Bestandteil von Produkten in der Nutzungsphase sind.
- Permanentes, individuelles Management aller Produktinstanzen über alle Engineering Domänen.
- Synchronisierung der initialen, zur Verfügung stehenden virtuellen Produktkonfigurationsmodelle und den multiplen Rekonfigurationsvarianten der Produktinstanzen.
- Kontinuierliche Entwicklung und Erweiterung von Konfigurationswissen (wie z.B. die Pflege von Regelwerken) für alle physisch existierenden Produktinstanzen.
- Integration von externen Serviceanbietern, die als Partner sinnvoll während der Betriebsphase des Smarten Produkts involviert werden können.

3 Virtuelle Zwillinge als Fundament für die Rekonfiguration Smarter Produkte

Um diese Anforderungen gerecht zu adressieren, wird nachfolgend ein methodischer Ansatz für die Rekonfiguration von Smarten Produkten eingeführt. Unter Berücksichtigung des gewählten Produktbeispiels eines smarten Fahrzeugs wird zunächst der konzeptionelle Ansatz des virtuellen Zwillings erläutert, der als Basis für den im Anschluss beschriebenen Rekonfigurationszyklus dient.

3.1 Virtueller Produktzwilling

Aufgrund der beschriebenen Dynamik der Produktkonfigurationen, werden in jeder Phase des Lebenszyklus eines Smarten Produkts veränderte, neue virtuelle Produktmodelle, basierend auf den vorherigen Versionen der Produktinstanz, generiert. Für das Management der virtuellen Produktmodelle

und Nutzungsdaten aller virtuellen und physischen Produktinstanzen entlang des gesamten Produktlebenszyklus wird das Konzept des virtuellen Produktzwillings beschrieben. Erstmals geprägt wurde der Begriff von der NASA im Rahmen einer Technologie Roadmap in dem Themenbereich „Modelling, Simulation, Information Technology & Processing“ (NASA 2010). Im Kontext Smarter Produkte kann ein virtueller Zwilling als Ansatz betrachtet werden, bei dem Daten jeder einzelnen Produktlebenszyklusphase in Informationen gewandelt werden, die den darauffolgenden Produktlebenszyklusphasen nahtlos und somit verlustfrei verfügbar gemacht werden (Rosen u. a. 2015). Das Wandeln in Informationen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich mit Hilfe der gewonnenen Daten z.B. im Rahmen von Auswertungen oder Analysen auf das vergangene oder auch das zukünftige Produktverhalten schließen lässt.

Da jedem virtuellen Zwilling auch ein physischer Zwilling zuzuordnen ist, ist auch die Unterscheidung zwischen einem virtuellen und einem physischen Lebenszyklus erforderlich. Dies ermöglicht eine differenzierte Betrachtungsweise der für die Definition des virtuellen Zwillings benötigten Lebenszyklusdaten. Der virtuelle Zwilling beinhaltet multidisziplinäre Modelle der Engineering-Domänen Mechanik, Elektronik und Informatik, die situativ mit dem dazugehörigen physischen Zwilling synchronisiert werden. Quelle für die virtuellen Produktmodelle bildet z.B. das Product Lifecycle Management (PLM), während Daten aus Sensorik-Systemen beispielsweise in einem Data Warehouse verwaltet und zur Verfügung gestellt werden können. Diese Integration erlaubt kontextspezifische Entscheidungen, wie eine Rekonfiguration bei der temporär ein IT-Service für den Kunden basierend auf den Strukturdaten, CAD-Modellen und Softwarekomponentenversionen des Produkts aktiviert wird (Abramovici u. a. 2016b). Limitiert wird der virtuelle Zwilling zum einen durch die Art und Menge der verwalteten Daten aber auch durch die infrastrukturellen Möglichkeiten zur weiteren integrierenden Bereitstellung dieser. Abbildung 1 zeigt ein konzeptionelles Grundmodell des Lebenszyklus virtueller Zwillinge im Zusammenspiel mit dem Lebenszyklus der physischen Produktzwillinge.

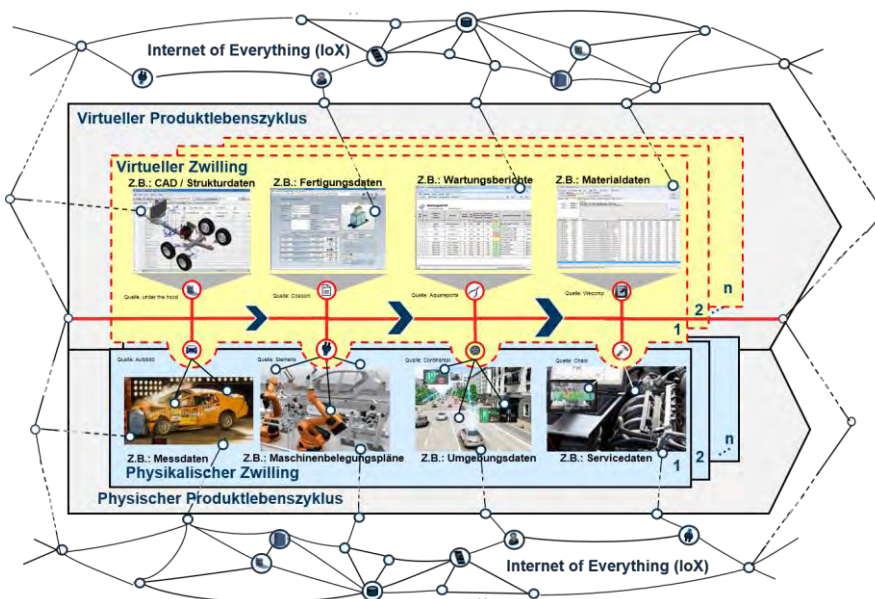


Bild 1: Konzeptionelles Modell eines virtuellen Zwillings für den Lebenszyklus eines Smarten Produkts.

Das Modell unterscheidet zwischen einem virtuellen und einem physischen Produktlebenszyklus. Entlang des virtuellen Produktlebenszyklus sind in Bild 1 exemplarisch spezifische Produktinstanzenmodelle und -daten dargestellt. Im Rahmen des virtuellen Produktlebenszyklus wird in der frühen Phase des virtuellen Produktlebenszyklus beispielsweise die Struktur des Produktes festgelegt, während in der fortgeschrittenen Phase das Management der Wartungsberichte von Relevanz ist. Dies folgt analog für den physischen Produktlebenszyklus, der maßgeblich den Lebenszyklus des physischen Zwillings beschreibt. Zu Beginn können beispielsweise produktbezogene Maschinendaten erfasst werden, während Servicedaten in einer späten Lebenszyklusphase z.B. Auskunft über die Funktionsfähigkeit von Komponenten geben, die anschließend einem alternativen Verwendungszweck

zugeführt werden können. Auch wenn diese Daten im Rahmen des physischen Produktlebenszyklus entstehen, können diese für die Erzeugung eines vollumfänglichen Abbilds des physischen Zwillings nicht vernachlässigt werden. Sie tragen beispielsweise dazu bei, den physischen Produktzustand in Form von Messdaten oder z.B. bei autonomen Produkten das für das Produktverhalten essentiell wichtige Verhältnis des Produkts zu der Umwelt in Form von Umgebungsdaten zu beschreiben. Sie sind daher ebenfalls Bestandteil des virtuellen Zwillings.

Da gemäß der Definition von Rosen u. a. die in Informationen umgewandelten Daten aus jeder einzelnen Produktlebenszyklusphase den nachfolgenden Phasen verlustfrei verfügbar gemacht werden, steigt die Menge der für den virtuellen Zwillings vorhandenen Informationen analog mit den Phasen des Produktlebenszyklus. Dies hat zur Folge, dass ein größeres Spektrum an kontext-spezifischen Entscheidungen auf Basis des virtuellen Zwillings eines Smarten Produkts ermöglicht wird.

3.2 Rekonfigurationszyklus Smarter Produkte in der Nutzungsphase

Die zuvor identifizierten Veränderungen im Engineering bei der Transformation zu Smarten Produkten erfordern einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Beziehung zwischen der generischen Variantenentwicklung in der traditionellen Produktentwicklungsphase sowie der anschließenden Produktkonfiguration. Auf dieser Basis wurde ein Engineering Lifecycle-Ansatz entwickelt, welcher unter Berücksichtigung virtueller Zwillinge die Rekonfiguration von Smarten Produkten modelliert (siehe Abbildung 2).

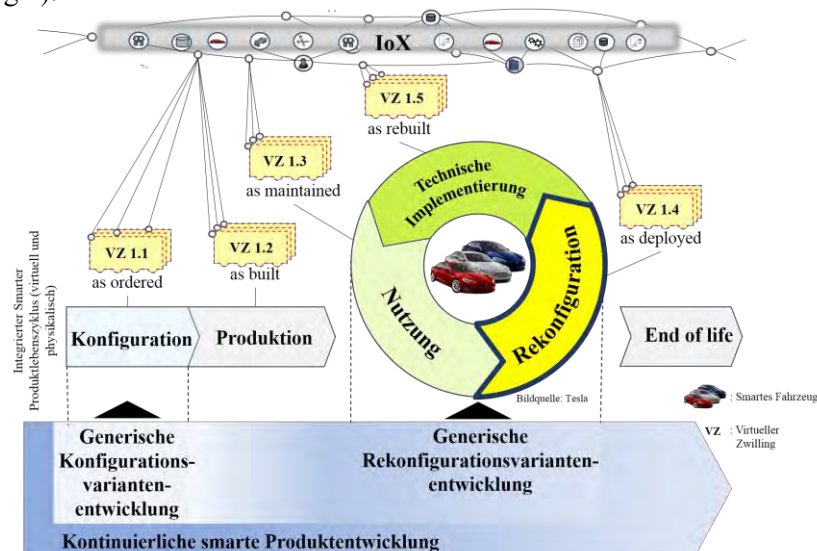


Bild 2: Rekonfigurationszyklus in der Nutzungsphase basierend auf lebenszyklusbegleitender Variantenentwicklung.

Dieser Ansatz beinhaltet insbesondere eine kontinuierliche Produktentwicklungsphase, die sich nicht länger nur auf die initiale Phase des Produktlebenszyklus beschränken lässt. Der Anbieter eines Smarten Produkts ist vielmehr in alle Lebenszyklusphasen eingebunden, die Produktentwicklung und -verbesserung zu somit zu einer lebenszyklusbegleitenden, kontinuierlichen Aufgabe für den Produkthanbieter. Die initialen, frühen Phasen der Entwicklung von Smarten Produkten führen zu generischen, modularen virtuellen Produktmodellen und -strukturen, die als Grundlage für die Konfiguration von individuellen, kundenspezifischen Produktvarianten dienen. Dabei kann es sich beispielsweise um ein mit Hilfe eines Online-Produktkonfigurators zusammengestelltes smartes Fahrzeug handeln. Die Konfiguration beschreibt jedoch das Produkt lediglich zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. in einem definierten Auslieferungszustand und kann entlang des Produktlebenszyklus unterschiedliche Ausprägungen annehmen (Eigner und Stelzer 2013). Demzufolge ist die initiale Konfiguration durch den Kunden nur ein Zustand (as ordered), der z.B. aufgrund von stochastischen Einflussgrößen oder gewünschten Anpassungen entlang des Produktlebenszyklus variieren kann. So befindet sich das Produkt nach der Produktions- und Vertriebsphase in einer as-built Konfiguration, von dem ausgehend es in einen zyklischen Prozess in der Nutzungsphase, bestehend aus Nutzung (as

maintained), Rekonfiguration (as deployed) und der technischen Umsetzung der Rekonfiguration (as rebuilt), eintritt. Die unterschiedlichen Ausprägungen der (physischen) Produktinstanz entlang des Lebenszyklus erzwingen auch eine simultane Anpassung der virtuellen Zwillinge, was in der Abbildung durch die verschiedene Versionsnummerierung der virtuellen Zwillinge exemplarische dargestellt ist. Die zur Verfügung stehenden Rekonfigurationsoptionen basieren auf der kontinuierlichen smarten Produktentwicklung und werden aus den generischen Rekonfigurationsvarianten gebildet. Der Kunde kann somit sein vorhandenes Produkt weiter individualisieren und dabei auf Varianten zurückgreifen, die zu dem Zeitpunkt der ursprünglichen Konfiguration zu Beginn des Produktlebenszyklus nicht zwangsläufig vorhanden gewesen sein müssen. Bei einem smarten Fahrzeug kann es sich dabei um eine Kombination aus Mechanik-, Elektro-, Softwarekomponenten handeln, die abhängig von der Kompatibilität der Produktinstanzenkonfiguration verändert werden. So kann beispielsweise ein IT-Service, wie ein Parkassistenzsystem, als (temporäre) Rekonfigurationsoption bei entsprechend vorhandener Sensorik angeboten werden, obwohl ein solcher Service bei der initialen Konfiguration des Fahrzeugs noch gar nicht angeboten wurde. Es ist also notwendig, die Produktentwicklung nicht als abgrenzbare Aufgabe zu Beginn des Produktlebenszyklus zu verstehen, sondern viel mehr als eine kontinuierlich produktbegleitende Phase. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass eine Synchronisation der initialen virtuellen Produktkonfigurationsmodelle, also den individuellen, kundenspezifischen Konfigurationen und den multiplen, rekonfigurierten Varianten der Produktinstanzen möglich ist. Dies betrifft bei der in Abbildung 2 thematisierten Konfiguration sowie Produktion insbesondere Produktstrukturmodelle (wie z.B. Stücklisten bzw. Strukturbäume) inklusive einer Vielzahl damit verbundener Produktmodelle (wie z.B. Metadaten der Produktkomponenten oder CAD-Modelle). Dieses Spektrum an dynamischen Instanzenkonfigurationen mit all ihren virtuellen Produktmodellen entlang des gesamten Lebenszyklus ist Teilmenge des virtuellen Produktzwillings einer spezifischen Produktinstanz, ebenso wie deren Umgebungsdaten (vgl. Kapitel 3.1).

Bezogen auf das zuvor beschriebene Beispiel des Parkassistenzsystems als (temporäre) Rekonfigurationsoption kann also der virtuelle Zwilling als Fundament für den Rekonfigurationsprozess herangezogen werden. Dabei ist zunächst die Identifikation der Produktinstanzenkonfiguration notwendig, was beispielsweise mit Hilfe von Produktstrukturmodellen durchgeführt werden kann. Diese Produktstrukturmodelle sind Teil des virtuellen Produktzwillings und müssen in einem zweiten Schritt auf ihre Kompatibilität mit der für das Parkassistenzsystem benötigten Struktur überprüft werden. Dies beinhaltet nicht mehr zwangsläufig eine reine Betrachtung der unternehmensinternen Konfigurationsbaukästen, sondern muss ggf. durch Engineeringwissen von externen Netzwerkpartnern, Unternehmen und Kunden für die einzelnen Produktinstanzen ergänzt werden. Nach der regelbasierten Prüfung kann bei vorhandener Kompatibilität die Implementierung der benötigten komponentenbezogenen Rekonfiguration initiiert werden. Die Implementierung der Rekonfiguration geht einher mit einer Veränderung der Produktinstanz und somit auch mit der Veränderung des virtuellen Zwillings, da eine neue Instanzenkonfiguration vorliegt.

4 Modellumgebung für die Rekonfiguration Smarter Produkte

In diesem Kapitel wird der zuvor beschriebene Ansatz der Rekonfiguration von Smarten Produkten mit Hilfe ihrer virtuellen Zwillinge im Rahmen einer Modellumgebung zunächst konzeptionell und anschließend experimentell umgesetzt. Die Basis dafür bildet der in Kapitel 4.1 beschriebene Anwendungsfall, der eine softwarebasierte Rekonfiguration von smarten Fahrzeugen fokussiert.

4.1 Fokussierter Anwendungsfall als Grundlage der Modellumgebung

Für den in Kapitel 3 beschriebenen Rekonfigurationszyklus wird ein Anwendungsfall eines smarten Fahrzeugs betrachtet, der als Grundlage für die Konzeption und Implementierung eines cloud-basierten Software-Prototyps dient (siehe Abbildung 3).

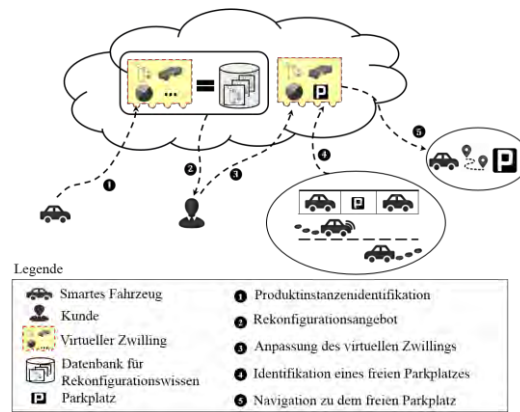


Bild 3: Anwendungsfall eines Parkplatzsuchassistenten für ein smartes Fahrzeug.

In diesem Anwendungsfall ist ein Kunde im Besitz eines smarten Fahrzeugs, das seinen Funktionsumfang mit Hilfe von Rekonfigurationsoptionen temporär oder konstant verändern kann. Dazu wird zunächst die physische Produktinstanz des betreffenden Kunden identifiziert und diese mit dem dazugehörigen virtuellen Zwilling verknüpft (1). Anschließend wird ein Kompatibilitätscheck hinsichtlich der vorhandenen Produktinstanzkonfiguration mit allen möglichen Rekonfigurationsoptionen durchgeführt. Dies beinhaltet nun nicht mehr nur die Varianten, die bei der initialen Konfiguration durch den Kunden bereits entwickelt waren und somit verfügbar waren, sondern auch die aufgrund der kontinuierlichen smarten Produktentwicklung (vgl. Kapitel 3.2) hinzugekommenen Produktvarianten. In diesem Beispiel handelt es sich bei der angebotenen Rekonfigurationsoption um ein Parkplatzsuchassistentensystem, bei dem das smarte Fahrzeug temporär zu einem freien Parkplatz in einer bestimmten Umgebung navigiert wird (2). Nachdem der Kunde sich dazu entschieden hat den Service zu aktivieren, verändert sich analog der virtuelle Zwilling mit der veränderten Konfiguration der physischen Produktinstanz (3). Als Teil des Suchassistenten melden weitere smarte Fahrzeuge ihre Positionsdaten an den virtuellen Zwilling der Produktinstanz, sobald sie einen freien Parkplatz in der von dem Kunden gewünschten Umgebung passieren (4). Anschließend kann der Kunde zu der Parklücke navigieren (5).

4.2 Konzeptioneller Aufbau der cloud-basierten Rekonfigurationsumgebung

Um die in Kapitel 4.1 beschriebene Rekonfiguration von Smarten Produkten in der Nutzungsphase mit Hilfe von virtuellen Zwillingen zu ermöglichen, wurde eine cloud-basierte Rekonfigurationsplattform entwickelt, die eine Integration der benötigten Produktinstanzdaten, Rekonfigurationsoptionen und den dazugehörigen Regeln erlaubt (Abbildung 4).

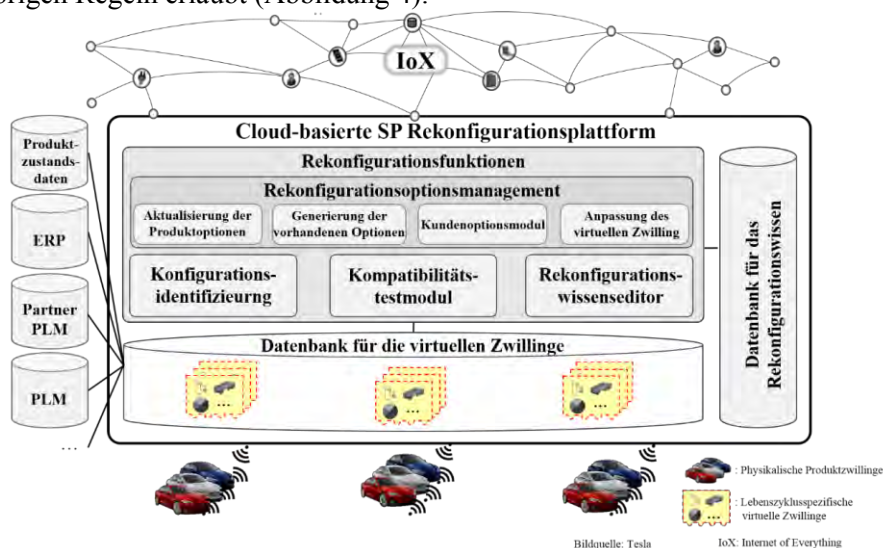


Bild 4: Aufbau und Komponenten der Rekonfigurationsplattform.

Die Plattform unterscheidet zwischen einem funktionsorientierten und einem datenbereitstellenden Bereich. Der funktionsorientierte Bereich beinhaltet Module, die für den operativen Ablauf der Rekonfiguration benötigt werden, während der datenorientierte Bereich die notwendigen Daten für den Rekonfigurationsprozess in Form von Datenbanken bereitstellt.

Den zentralen Aspekt des datenbereitstellenden Bereichs bildet die Datenbank für die virtuellen Zwillinge. Diese ermöglicht die Zuordnung von virtuellen Produktmodellen, die entlang des Produktlebenszyklus entstehen, zu den physischen Produktinstanzen (physischen Zwillingen). Dies wird mittels drahtloser Verbindung, beispielsweise mit Hilfe von Services als Teil einer Internet of Things (IoT)-Plattform, realisiert. Als Quellen für die virtuellen Produktmodelle dienen die Produktlebenszyklusmanagement- (PLM) sowie Enterprise Resource Planning- (ERP) Systeme der involvierten Unternehmen. Die hohe Komplexität bei der Entwicklung von Smarten Produkten, beispielsweise aufgrund der Interdisziplinarität der Komponenten, erfordert eine hochflexible Engineering-Kollaboration und somit eine Integration des Engineerings- und Servicepartnernetzwerks entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Es sind daher Schnittstellen erforderlich, die eine Anbindung zwischen der Datenbank für die virtuellen Zwillinge und den IT-Management Systemen der Partner ermöglichen, so dass ein Zugang zu den virtuellen Produktmodellen von den Produktkomponenten besteht, die nicht in-house entwickelt wurden. Andernfalls ist eine Abdeckung der physischen Produktinstanz durch die benötigten virtuellen Produktmodelle nicht vollständig gewährleistet, so dass ggf. nur die Teilbereiche, in denen die virtuellen Produktmodelle vorhanden sind, punktuell adressiert werden können. Darüber hinaus sind Umgebungs- bzw. Zustandsdaten, wie beispielsweise Positionsdaten oder Verbrauchswerte bestimmter Baugruppen, ebenfalls Teil der Datenbank für die virtuellen Zwillinge. Diese Daten aus dem physischen Lebenszyklus können als Auslöser von Rekonfigurationsoptionen dienen, beispielsweise bei der Über- oder Unterschreitung von zuvor identifizierten Schwellwerten. Dabei kann es sich z.B. um IT-Services wie eine automatisierte Drosselung der Höchstgeschwindigkeit bei Überschreitung von Landesgrenzen oder ein verändertes Betriebsverhalten von Produktkomponenten bei Unterschreiten einer gewissen Außentemperatur handeln.

In dem funktionsorientierten Bereich spielt das Rekonfigurationsoptionsmanagement eine zentrale Rolle. Es besteht aus vier Teilmodulen, die unterschiedliche Aspekte für den Auswahlprozess der Rekonfiguration adressieren. Das Teilmodul für die kontinuierliche Aktualisierung der Produktoptionen ist stark mit dem Gedanken der lebenszyklusbegleitenden, kontinuierlichen Produktentwicklung verbunden (vgl. Kapitel 3.2). Dabei werden bestehende Produktvarianten um neuentwickelte Varianten ergänzt bzw. nicht mehr verfügbare Varianten aus dem Rekonfigurationsportfolio eliminiert. Dies beinhaltet mögliche Varianten bezüglich softwarebasierten IT-Services, Hardware oder einer Kombination aus beiden, die sowohl für die initiale Konfiguration von neuen als auch für die Rekonfiguration von existierenden Produkten von Relevanz sind. Ein weiteres Teilmodul ist für die Generierung der tatsächlich vorhandenen Rekonfigurationsoptionen für die einzelnen Produktinstanzen verantwortlich. Dies beinhaltet also nur jene Rekonfigurationsoptionen, die bereits erfolgreich auf Kompatibilität bezüglich der Produktinstanzenkonfiguration getestet wurden. Das Kundenoptionsmodul bietet die Kommunikationsmöglichkeit zwischen der Plattform und dem Kunden. Durch ein graphisches Userinterface zur Auswahl der kompatiblen Rekonfigurationsoptionen kann der Kunde die gewünschte Rekonfiguration wählen. Das vierte Teilmodul ist für die Implementierung der Rekonfigurationsoption verantwortlich, für die sich der Kunde entschieden hat. Dies hat zur Folge, dass sich der physische Zwilling verändert, was simultan mit einer Anpassung des virtuellen Zwillinges einhergeht.

Es werden zwei Schritte der Konfigurationsidentifizierung unterschieden: zunächst wird die physische Produktinstanz allen virtuellen Produktmodellen sowie den Daten aus dem physischen Lebenszyklus aus dem gesamten Produktlebenszyklus zugeordnet (generelle Konfigurationsidentifizierung). Dies beinhaltet z.B. die Zuweisung der für die Produktinstanz zugehörigen CAD-Modelle, gegenwärtigen Strukturmodelle oder die Lokalisierung der aktuellen Position. In einem weiteren Schritt ist die Identifizierung der Produktinstanzenkonfiguration für die Auswahl der Konfigurationseinheiten verantwortlich, die im Rahmen der gewählten Rekonfigurationsoption durch den Kunden betroffen sind (spezifische Konfigurationsidentifizierung) (ISO 10007). Zum Beispiel ist die Berücksichtigung von Daten aus dem physischen Lebenszyklus, wie beispielsweise Wetterdaten, bei dem Angebot eines IT-Services wie einem Einparkassistenzsystem nicht notwendig.

Das Kompatibilitätstestmodul prüft alle möglichen Rekonfigurationsoptionen für die zu Grunde

liegende Instanzenkonfiguration hinsichtlich fehlender Konfigurationseinheiten, die bestimmte Optionen ausschließen. Vor dem Hintergrund der Rekonfigurierbarkeit ist die Entwicklung aufwärtskompatibler Smarter Produkte daher eine große Herausforderung. Dies bedeutet, dass bei jeder Produktinstanz Voraussetzungen geschaffen wurden, die beispielsweise Kompatibilität mit zukünftigen Softwareversionen in Verbindungen mit bestimmten Hardwarevoraussetzungen ermöglichen. Für die Entwicklung aufwärtskompatibler Smarter Produkte bilden z.B. die Verwendung von neutralen Datenformaten oder modularisiertes Produktdesign mit ggf. ruhenden oder inaktiven physischen Elementen Anknüpfungspunkte. Analog verhält es sich mit Rekonfigurationsoptionen, die eine hohe Abwärtskompatibilität aufweisen. Die Berücksichtigung von bereits verwendeten Formaten oder verbauten Modulen ermöglicht ein höheres Rekonfigurationspotential in den einzelnen Produktinstanzen.

Um die Kompatibilität zwischen einer Instanzenkonfiguration und einer möglichen Rekonfigurationsoption zu prüfen werden Regelwerke verwendet, welche die Eigenschaften der Optionen und die damit verbundenen Anforderungen hinsichtlich der benötigten Konfigurationseinheiten eines Smarten Produkts beschreiben. Diese regelbasierten Anforderungen können ebenfalls in Regeln genereller Art (beispielsweise das Vorhandensein von Konfigurationseinheiten) sowie spezifischer Art (beispielsweise die Verträglichkeit unterschiedlicher Versionen von Konfigurationseinheiten) unterteilt werden. Konkret könnte sich dies auf die Prüfung von notwendiger Sensorik in der Instanzenkonfiguration für einen IT-Service, wie beispielsweise einem Einparkassistenzsystem, beziehen. Diese Regeln werden in einer Datenbank für das Rekonfigurationswissen verwaltet. Sie basieren auf dem Regelwerk für die initiale Konfiguration zu Beginn des Produktlebenszyklus und werden im Rahmen der kontinuierlichen Produktentwicklung permanent angepasst und erweitert. Das Ziel ist die Vermeidung von inkompatiblen Kombinationen von Konfigurationseinheiten. Im Rahmen der Plattformlösung ist diese Datenbank Quelle für den Rekonfigurationswissenseditor. Dieser ist für die Anpassung des gesamten Regelwerks mit allen vorhandenen Produktvarianten auf das bestehende Regelwerk der physischen Produktinstanz mit den instanzenspezifischen Konfigurationseinheiten verantwortlich.

4.3 Technische Umsetzung und Validierung der Plattform

Die in Kapitel 4.2 beschriebene cloud-basierte Rekonfigurationsplattform wurde im Rahmen einer vereinfachten Modellumgebung implementiert und validiert. Dazu wurden Komponenten von kommerziell erhältlichen Internet of Things (IoT)-Lösungen für einen darauf aufbauenden Software Prototypen angepasst. Für die Integration der für den in Kapitel 4.1 beschriebenen Anwendungsfall benötigten charakteristischen Eigenschaften der smarten Fahrzeuge, wurden mehrere Lego Mindstorm Roboter genutzt. Diese Roboter wurden jeweils um einen Raspberry Pi erweitert, wodurch eine Internetanbindung der Sensorwerte beispielsweise zur Messung von Geschwindigkeit, Position und Distanz zu weiteren Objekten ermöglicht wurde. Es wurden außerdem exemplarisch Produktstrukturen der Roboter sowie ein Regelwerk für die Rekonfigurationsoption „Parkplatzsuchassistenten“ angelegt, so dass ein Kompatibilitätstest durchgeführt werden konnte.

Den Kern der Rekonfigurationsplattform bildet die durch den Anbieter „PTC“ kommerziell verfügbare Cloud-Plattform „ThingWorx“. Die serviceorientierte Architektur dieser Plattform bietet eine Vielzahl von Schnittstellen, wie beispielsweise zu der PLM-Software „Windchill“, die ebenfalls von der Firma PTC angeboten wird. ThingWorx erlaubt es, einen Bezug zwischen virtuellen Produktmodellen aus dem virtuellen Lebenszyklus, wie beispielsweise Produktstrukturdaten aus einem PLM-System, sowie Daten aus dem physischen Produktlebenszyklus, wie beispielsweise mittels Sensorik erfasste Umgebungswerte, herzustellen. Die beiden Lego Mindstorm Roboterinstanzen wurden in ThingWorx als „things“ definiert, denen für den Anwendungsfall relevante virtuelle Produktmodelle (hier: Produktstrukturdaten) und Daten aus dem physischen Lebenszyklus (hier: Werte von Ultraschallsensoren sowie Positionsdaten) als Eigenschaften („properties“) zugeordnet wurden. Diese Properties wurden, angelehnt an zuvor definierte Abfrageintervalle, permanent aktualisiert und bildeten somit die für den Anwendungsfall kontext-spezifischen virtuellen Zwillinge der Roboter. Bei diesem Schritt wurden Latenzprobleme identifiziert, die abhängig von den Anforderungen durch den Anwendungsfall zu potenziell kritischen Verzögerungen führen können. In dem vorliegenden Anwendungsfall sind diese jedoch als unproblematisch zu bewerten, da die Verzögerungen in einem

Bereich lagen ($<1s$), die für die Funktion des Parkplatzsuchassistenten vernachlässigbar sind. Die kontinuierliche Abfrage der Sensorwerte ermöglichte eine ausreichende Aktualität bei der permanenten Überwachung der smarten Produktinstanzen, die als Input für die generelle Konfigurationsidentifizierung dient.

Der Abgleich der physischen Produktinstanzenkonfiguration mit allen möglichen Optionen in der Datenbank für Rekonfigurationswissen wurde serviceorientiert durchgeführt. Kern bildete eine Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix, die benötigte Produktkomponenten für den Parkplatzsuchassistenten mit der exemplarisch für den Roboter erstellten Produktkonfiguration abglich. Die Vorlage der benötigten Komponenten und der somit erfolgreich geprüften Kompatibilität ermöglichte anschließend die Implementierung der Rekonfiguration im Rahmen eines Softwareupdates. Dies gab dem parkplatzsuchenden Roboter die Möglichkeit einer zyklischen Abfrage der Positionsdaten des zweiten Roboters in der IoT-Plattform, die genau dann erfolgreich war, wenn die Ultraschallsensoren einen gewissen Schwellwert überschritten hatten, wodurch hier das Passieren einer freien Parklücke modelliert wurde. Diese Position wurde anschließend dem parkplatzsuchenden Roboter übermittelt (vgl. Abbildung 5).

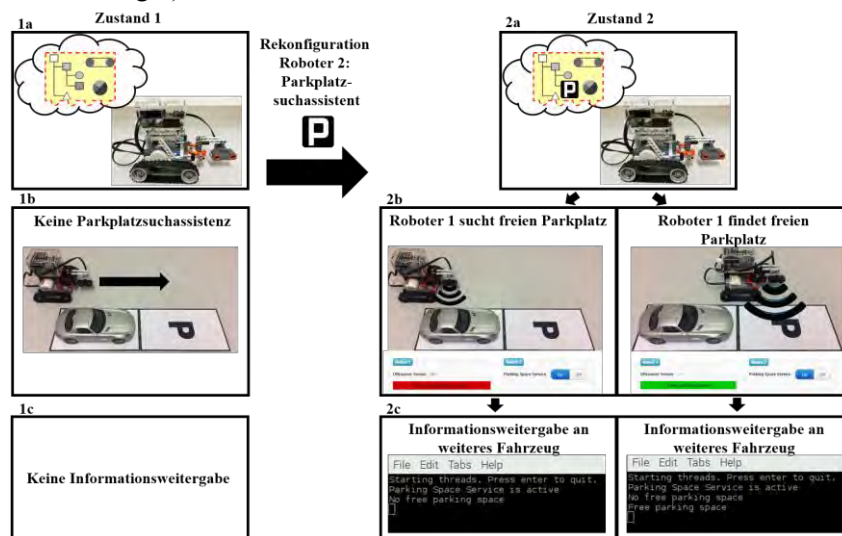


Bild 5: Zustand 1a - 1c zeigt Roboter 2 mit der ursprünglichen Konfiguration. Zustand 2a – 2c zeigt Roboter 2 nach der Rekonfiguration. Abhängig von den empfangenen Daten von Roboter 1 (2b) wird die Information der freien Parklücke mittels des gebuchten IT-Services an Roboter 2 übertragen (2c).

5 Fazit und Ausblick

Aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften bieten Smarte Produkte ein enormes Potential für Rekonfigurationen in der Nutzungsphase. Dies trifft in besonderer Weise auf ein breites Spektrum an IT-Services zu, die mittels Internet und vorhandener Hardware den Funktionsumfang eines Smarten Produktes erweitern. In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, inwiefern Smarte Produkte eine lebenszyklusbegleitende, kontinuierliche Entwicklung erfordern, die im Bereich der dynamischen Rekonfiguration heute konzeptionell und informationstechnisch unzureichend unterstützt wird. Um einen Beitrag zur Entwicklung derartiger Lösungsansätze zu leisten wurde der vorgeschlagene konzeptionelle Ansatz, der auf dem Konzept des virtuellen Produktwillings basiert in einer cloud-basierten Rekonfigurationsplattform modellhaft ausgeprägt. Dieser Ansatz soll als Schritt in Richtung einer ganzheitlichen Rekonfigurationsumgebung für Smarte Produkte dienen, die in Industrieunternehmen individualisiert und betrieben werden können. Der Ansatz soll besonders durch seine informationstechnische Offenheit einen Rahmen für die Integration weiterer funktions- oder datenorientierter Module und somit auch Übertragbarkeit auf andere Smarte Produkt- und Servicesysteme ermöglichen. Herausforderungen wie z.B. Latenzprobleme, Verfügbarkeit von der benötigten Internetinfrastruktur, Datensicherheit und -zugriffmanagement sowie Skalierbarkeit der Rekonfigurationsumgebung bei einer hohen Anzahl von Produktinstanzen sind nur einige Aspekte, die weiterhin einen enormen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet begründen. Konkreten, aktuell laufenden

Forschungsaktivitäten, die unmittelbar auf dem vorgestellten Ansatz basieren, befassen sich mit der Entwicklung semantischen Datenmanagementmodelle und der Einbeziehung von Produktverhaltensmodellen in den Rekonfigurationszyklus.

Literatur

- Abramovici 2014 ABRAMOVICI, Michael: *Smart Products*, in Lapierrière L, Reinhart G, (Eds) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin Heidelberg : Springer, 2014.
- Abramovici u. a. 2016a 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 - Manufacturing Technology* 65 (2016), Nr. 1, S. 185–188.
- Abramovici u. a. 2015 ABRAMOVICI, Michael ; GÖBEL, Jens Christian ; NEGES, Matthias: *Smart Engineering as Enabler for the 4th Industrial Revolution*. In: FATHI, Madjid (Hrsg.): *Integrated Systems: Innovations and Applications*. Cham : Springer International Publishing, 2015, S. 163–170.
- Abramovici u. a. 2016b ABRAMOVICI Michael ; GÖBEL, Jens Christian ; SAVARINO, Philipp (2016) : *Virtual Twins as Integrative Components of Smart Products* : In: *Proceedings PLM16 International Conference on Product Lifecycle Management, 11-13 Juli , Columbia, SC, USA*, 2016.
- Anderl und Eigner 2012 ANDERL, Reiner ; EIGNER, Martin ; SENDLER, Ulrich ; STARK, Rainer: *Smart Engineering : Interdisziplinäre Produktentstehung*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012.
- DIN EN 61499 Norm DIN EN 61499 : *International Electrotechnical Commission 61499-1: Function Block - Part 1 Architecture*, 2013.
- Eigner und Stelzer 2013 EIGNER, Martin ; STELZER Ralph: *Product Lifecycle Management : Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2., neu bearb. Aufl. Dordrecht : Springer, 2013.
- ISO 10007 Norm ISO 1007:2003: *Quality management systems- Guidelines for configuration management*.
- Lepuschitz u. a. 2011 LEPUSCHITZ, Wilfried ; ZOITL, Alois ; VALLÉE, Mathieu ; MERDAN, Munir: *Toward Self-Reconfiguration of Manufacturing Systems Using Automation Agents*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 41 (2011), Nr. 1, S. 52–69.
- Lutters u. a. 2014 LUTTERS, Eric ; VAN HOUTEN, Fred J.A.M. ; BERNARD, Alain ; MERMOZ, Emmanuel ; SCHUTTE, Corné S.L.: *Tools and techniques for product design*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014), Nr. 2, S. 607–630.
- Männistö u. a. 1999 MÄNNISTÖ, Tomi ; SOININEN, Timo ; TIHONEN, Juha ; SULONEN, Reijo : *Framework and conceptual model for reconfiguration. Configuration Papers from the AAI Workshop (AAAI Technical Report WS-99-05)(pp.59-64)*, AAAI Press, 1999.
- Nasa 2010 NASA: *Technology Roadmap: Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap Technology Area 11*, 2010.
- Olsen u. a. 2005 OLSEN, Scott ; WANG, James ; RAMIREZ-SERRANO, Alejandro ; BRENNAN, Robert W.: *Contingencies-based reconfiguration of distributed factory automation*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 21 (2005), 4-5, S. 379–390.
- Rosen u. a. 2015 ROSEN, Roland ; WICHERT, Georg von ; LO, George ; BETTENHAUSEN, Kurt D.: *About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing*. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015), Nr. 3, S. 567–572.
- Zhang u. a. 2015 ZHANG, Linda L. ; HELO, Petri T. ; KUMAR, Arun ; YOU, Xiao: *Implications of product configurator applications: An empirical study*. In: *IEEM 2015 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management : 6-9 December 2015, Singapore*. Piscataway, NJ : IEEE, 2015, S. 57–61.

Anpassung bestehender Zuverlässigkeitsmethoden für eine entwicklungsbegleitende Ermittlung eines Lebensdauermodells

Jan Gröber¹, Wolfgang Gauchel¹, Peter Zeiler², Bernd Bertsche³

¹Festo AG & Co. KG, 73734 Esslingen/Berkheim, Deutschland
jan.groeber@festo.com, wolfgang.gauchel@festo.com

²Hochschule Esslingen, Fakultät Mechatronik und Elektrotechnik, 73037 Göppingen, Deutschland
peter.zeiler@hs-esslingen.de

³Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 70569 Stuttgart, Deutschland
bernd.bertsche@ima.uni-stuttgart.de

Abstract: In diesem Beitrag wird ein Vorgehen vorgestellt, mit welchem die Zuverlässigkeit eines neuartigen mechatronischen Systems auch für bisher unbekannte Anwendungsfälle und unterschiedliche Randbedingungen ermittelt werden kann. Kern dieses Vorgehens ist eine statistische Versuchsplanung (Design of Experiments - DoE) für die Komponenten des mechatronischen Systems. Zur erfolgreichen Durchführung des DoE müssen verschiedene Informationen erarbeitet werden. Es wird daher vorgestellt, welche Methoden sich vorbereitend auf ein DoE anwenden lassen. Weiterhin wird dargestellt, wie sich die mittels Versuchen ermittelten Informationen in einem gesamtheitlichen Ansatz der Zuverlässigkeitsanalyse zur Bestimmung eines Lebensdauermodells anwenden lassen. Hierbei werden u.a. Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulationen sowie eine Modellierung und Simulation mit Petrinetzen vorgeschlagen. Das hier vorgestellte Vorgehen wird am Beispiel eines neuartigen mechatronischen Systems in Form einer pneumatischen Ventilinsel angewendet.

Keywords: Zuverlässigkeitsanalyse, Mechatronik, R-DoE, Wechselwirkungen

1 Einleitung

Durch eine neue pneumatische Ventilinsel können im Gegensatz zu der marktüblichen Ausführung von Ventilinseln eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten realisiert werden. Die universellere Verwendbarkeit des Produktes bringt Vorteile bei Funktion und Kundennutzen mit sich. Beim Einsatz in den vielen neuen Anwendungsfeldern stellt sich jedoch die Frage nach der Zuverlässigkeit dieses komplexen mechatronischen Systems. Im Rahmen eines Projektes wird die Zuverlässigkeit dieser neuartigen Automatisierungsplattform entwicklungsbegleitend untersucht. Das firmenintern übliche Vorgehen zur Ermittlung der Lebensdauer von Produkten würde die Lebensdauer des hier betrachteten Produktes nur teilweise beschreiben. Durch die vollständige Neuentwicklung des mechatronischen Systems ist keinerlei Vorwissen über Zuverlässigkeitskennwerte oder Schadensmechanismen zu Beginn der Entwicklung vorhanden. Es stellt sich somit die Frage, wie die Zuverlässigkeit eines solchen neuartigen mechatronischen Systems für eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder entwicklungsbegleitend analysiert werden kann.

Im Folgenden wird die hier beispielhaft betrachtete neuartige pneumatische Ventilinsel vorgestellt. Anschließend werden Anforderungen an die Zuverlässigkeitsanalyse abgeleitet. Im Anschluss werden aktuelle Methoden und Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme aufgezeigt. Auf Basis des hierbei identifizierten Bedarfs wird in Kapitel 2 ein angepasstes Vorgehen vorgeschlagen und mit Beispielen bei der Anwendung vorgestellt. In Kapitel 3 folgt eine Bewertung und Diskussion.

1.1 Neuartige pneumatische Ventilinsel

Die in diesem Beitrag beispielhaft untersuchte pneumatische Ventilinsel der Festo AG & Co. KG ist in Bild 1 dargestellt. Die Hauptkomponenten sind das Controllermodul, das Anschlussprofil, sowie die eigentlichen Ventile. Die Ventile werden auf das Anschlussprofil aufgeschraubt und somit pneumatisch

und elektronisch kontaktiert. Durch die Ventile können an den Arbeitsanschlüssen angeschlossene Verbraucher, wie z.B. Pneumatikzylinder, angesteuert werden. Mittels des Controllermoduls können die Ventile separat angesprochen werden.

Bei der hier beschriebenen Ventilinsel wird ein Konzept verfolgt, welches aktuell noch nicht am Markt erhältlich ist. Ohne auf technischen Details einzugehen, kann gesagt werden, dass sich mit Hilfe dieses Konzeptes neue, teils noch unbekannte Anwendungsfelder erschließen. Nach der Einführung des Produktes auf dem Markt können zusätzliche Anwendungsfelder erschlossen werden. Um nicht für jeden Anwendungsfall separat teure und zeitaufwändige Lebensdauerversuche durchführen zu müssen wäre es wünschenswert, ein Lebensdauermodell des mechatronischen Systems zu erarbeiten um Aussagen zur Zuverlässigkeit für die verschiedenen, zum Teil heute noch unbekannte, Anwendungsfelder zu ermöglichen. Mit einem solchen Modell könnten somit auch Aussagen für neue Anwendungsfelder getroffen werden. Im Rahmen eines Vorgehens zur Ermittlung eines Lebensdauermodells werden die erforderlichen Zuverlässigkeitskennwerte versuchstechnisch ermittelt. Da Lebensdauerversuche zeit- und kostenintensiv sind, ist auf eine möglichst effiziente Durchführung dieser Versuche zu achten.

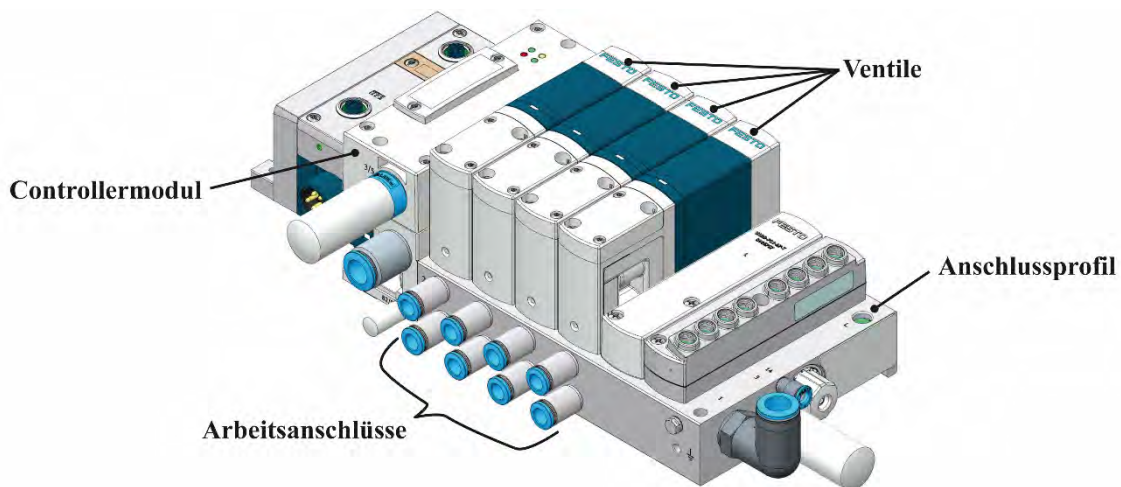


Bild 1: Neuartige pneumatische Ventilinsel der Festo AG & Co. KG, Esslingen (Firmeneigene Darstellung).

1.2 Bestehende Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme

Ein mechatronisches System besteht neben mechanischen und elektronischen Komponenten ebenfalls aus Software. Für die Entwicklung mechatronischer Systeme wird in der Norm VDI 2206 (2004) eine Entwicklungsmethodik vorgestellt, welche das Zusammenwirken dieser drei Domänen berücksichtigt. Da durch dieses Vorgehen jedoch nicht automatisch die Zuverlässigkeit des zu entwickelnden mechatronischen Systems beschrieben wird, muss die Zuverlässigkeit weitergehend untersucht werden. Bertsche et al. (2009) stellen verschiedene Methoden vor, wie die Zuverlässigkeit eines mechatronischen Systems in frühen Phasen analysiert und bewertet werden kann. Wie in Bertsche und Lechner (2004) beschrieben, existieren verschiedene Möglichkeiten zur entwicklungsbegleitenden Analyse der Zuverlässigkeit. Neben qualitativen Methoden, wie z. B. der weit verbreiteten Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA), werden quantitative Methoden beschrieben, mit welchen sich die Zuverlässigkeit von Komponenten sowie Systemen berechnen lassen. Bild 2 zeigt dabei eine Vorgehensweise, mit welcher die Systemzuverlässigkeit ermittelt werden kann. Durch qualitative und quantitative Methoden werden die einzelnen Komponenten hierbei auf ihre Zuverlässigkeit hin untersucht. Die Ergebnisse der jeweiligen Untersuchungen werden anschließend zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit zusammengeführt. In VDA 3.2 (2016) sind unterschiedliche Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse dargestellt. Hierbei wird gezeigt, in welchen Phasen des Entwicklungsprozesses sich diese Methoden anwenden lassen.

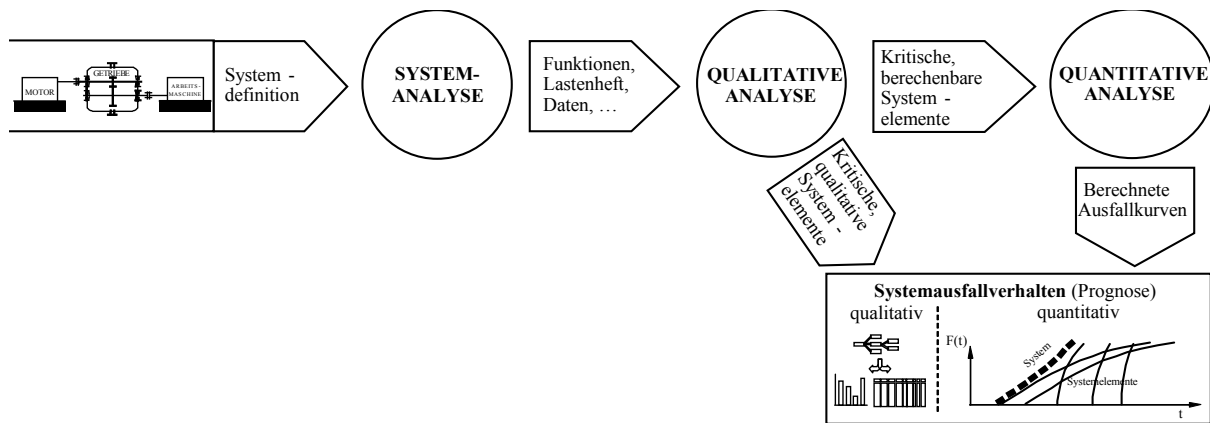


Bild 2: Vorgehensweise zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit nach Bertsche und Lechner (2004).

Habchi und Barthod (2016) untersuchen verschiedene bestehende Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Sie stellen fest, dass bei vorhandenen Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme der Einfluss von Betriebsprofilen, Faktoren mit Einfluss auf die Lebensdauer, sowie Wechselwirkungen kaum berücksichtigt werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen stellen sie ein Vorgehen zur ganzheitlichen Bewertung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme vor (Habchi und Barthod 2016). Wechselwirkungen werden hierbei mittels einer Wechselwirkungsmatrix erfasst und anschließend mittels Petrinetzen simuliert. Der Einfluss von Einflussfaktoren und Betriebsprofilen wird beispielhaft dadurch berücksichtigt, dass durch Experteninterviews Zuverlässigkeitskennwerte von bestehenden Produkten für die unterschiedlichen Phasen des Betriebs abgeleitet werden. Dieses Vorgehen ist offensichtlich nur bei entsprechend vorhandenem Vorwissen anwendbar. In der Literatur wird noch kein Vorgehen beschrieben, mit welchem sich entwicklungsbegleitend die Zuverlässigkeit eines neuartigen mechatronischen Systems für unterschiedliche, teils noch unbekannte, Anwendungsfälle ermitteln lässt. Dabei muss beachtet werden, dass Vorwissen oder Berechnungsmöglichkeiten von Zuverlässigkeitskennwerten zu Beginn des Entwicklungsprozesses nicht vorhanden sind. Zur Erstellung eines solchen Vorgehens werden in diesem Beitrag bestehende Methoden der Zuverlässigkeitstechnik auf Eignung untersucht und ein Vorgehen basierend auf geeigneten Methoden vorgestellt. Hierbei ist es nicht das Ziel, alle möglichen Methoden detailliert zu beschreiben, sondern ein übergeordnetes Vorgehen auf Basis ausgewählter Methoden darzustellen.

1.3 Grundlagen der statistische Versuchsplanung für Lebensdauerversuche

Die Lebensdauer eines Produktes kann von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst werden. Bei einem pneumatischen Ventil können beispielsweise sowohl der Arbeitsdruck, als auch die Temperatur einen Einfluss auf die Lebensdauer haben. Um Zuverlässigkeitskennwerte erfassen zu können, müssen Lebensdauerversuche durchgeführt werden. Diese Lebensdauerversuche werden bei pneumatischen Ventilen in der Regel bei Nennbedingungen durchgeführt (ISO 19973-1 2015). Soll anschließend der Einfluss des Druckes untersucht werden, wird klassischerweise ein Versuch bei höherem Druck und Nenn-temperatur ergänzend durchgeführt. Für die Ermittlung des Einflusses einer erhöhten Temperatur würde anschließend ein weiterer Dauerlauf mit erhöhter Temperatur und Nenndruck durchgeführt werden. Dieses Vorgehen wird „One-factor-at-a-time“ (OFAT) genannt (Kleppmann 2011) und ist in Bild 3 links dargestellt. Bei den Versuchen ermittelten hohen Lebensdauern sind beispielhaft mit großen Punkten, kleine Lebensdauern mit kleinen Punkten dargestellt (siehe Legende). Im Vergleich hierzu werden bei der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) alle Versuche zwingend im Voraus geplant und die Faktoren gleichzeitig geändert. Wie man in Bild 3 in der zweiten Grafik von links erkennen kann, existiert ein Versuchspunkt bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck. Auf den ersten Blick ergibt sich durch den zusätzlichen Versuchspunkt ein erhöhter Aufwand. Da aber für statistisch verwertbare Ergebnisse gewöhnlicher Weise mehrere Prüflinge pro Versuchspunkt getestet werden müssen, ist durch den Versuchsaufbau des DoE eine weitaus effizientere Auswertung möglich. Hierbei können mehr Informationen bei einem gleichzeitig geringeren Gesamtumfang an Versuchen gewonnen

werden (Kleppmann 2011). Es ist somit möglich, Wechselwirkungen zwischen den Faktoren zu identifizieren. Der Einfluss unterschiedlicher Faktoren und deren Wechselwirkungen auf eine Zielgröße können effizient bestimmt werden. Je nach Anforderung können unterschiedliche Testpläne zum Einsatz kommen, z.B. vollfaktorielle oder teilfaktorielle Versuchspläne (beispielhaft in Bild 2 rechts dargestellt). Weitere Informationen über diese und weitere Versuchspläne kann beispielsweise Kleppmann (2011) oder Siebertz et al. (2010) entnommen werden.

Bei der Planung und Auswertung des DoE werden üblicherweise normalverteilte Daten benötigt. Dies ist bei Lebensdauerersuchen in der Regel nicht der Fall. Hier können die Ausfallzeiten häufig mittels einer Weibullverteilung angenähert werden (Bertsche und Lechner 2004). Weiterhin liegen bei Lebensdauerersuchen häufig nicht Ausfallkennwerte von allen Prüflingen vor. Durch diese Eigenheiten stellt ein DoE mit Lebensdauerersuchen eine besondere Form des DoE dar. Auswertungssoftware, welche auch diese Besonderheiten weitestgehend berücksichtigen kann, gehört mittlerweile zum Stand der Technik (Reliasoft 2017). Hamada (1995) zeigte verschiedene Beispiele auf, in denen DoE genutzt werden konnte, um den Einfluss von unterschiedlichen Faktoren auf die Lebensdauer vergleichsweise einfacher Komponenten bestimmen zu können. Bisher wird noch nicht dargestellt, wie DoE in einem gesamtheitlichen Ansatz zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme verwendet werden kann.

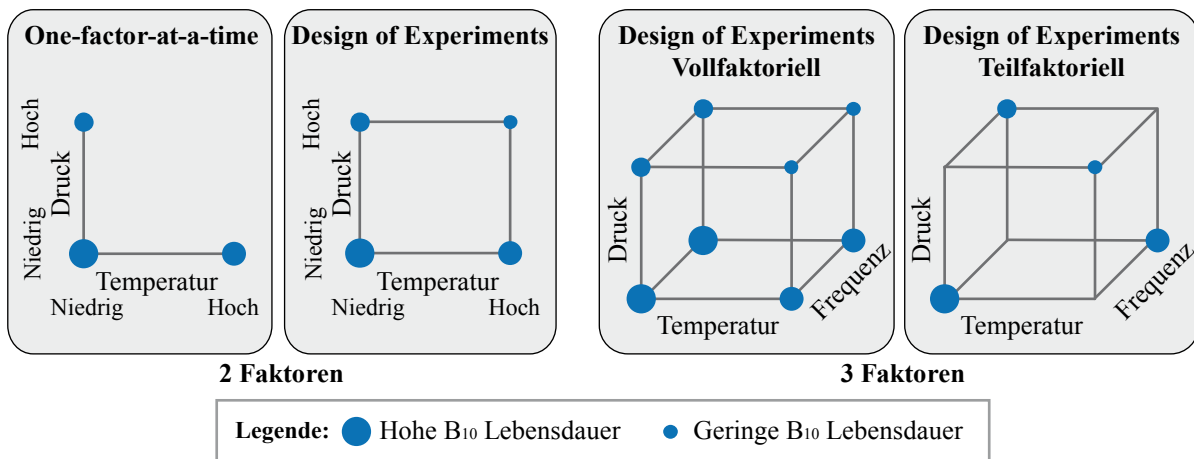


Bild 3: Unterschied zwischen One-factor-at-a-time und Design of Experiments bei zwei Faktoren (links), sowie Unterschiede zwischen voll- und teilfaktoriellen DoE (rechts).

1.4 Anforderungen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme

Zusammengefasst ergeben sich folgende grundlegenden Anforderungen an ein Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme:

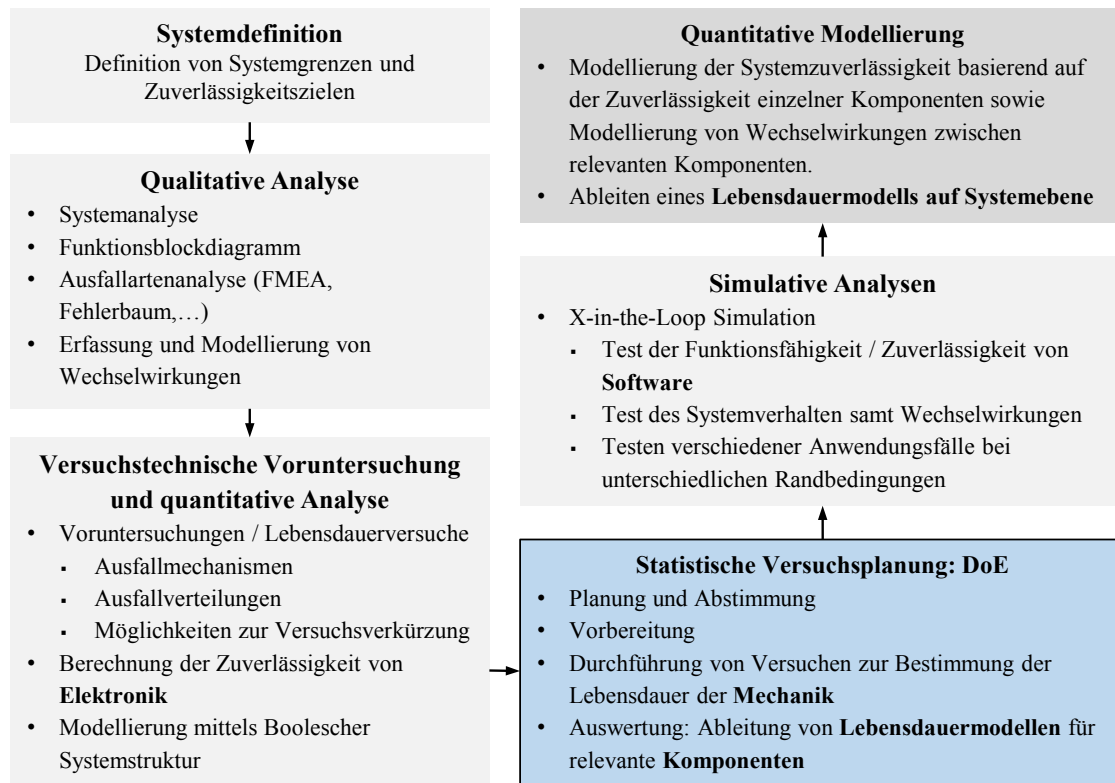
1. Ganzheitliches Vorgehen unter Berücksichtigung von Hardware, Elektronik und Software.
2. Ableitung von Lebensdauer kennwerten für unterschiedliche Anwendungsfälle. Auch für aktuell undefinierte Anwendungsfälle sollen später Lebensdauer kennwerte abgeleitet werden können.

Das Vorgehen nach Habchi und Barthod (2016) erfüllt Anforderung eins und weitestgehend auch Anforderung zwei (siehe Kapitel 1.2). Jedoch lässt sich dieses Vorgehen, unter der Randbedingung eines neuartigen mechatronischen Systems und somit fehlenden Vorwissens, nicht erfolgreich anwenden. Mittels Lebensdauer-DoE kann Anforderung zwei bei fehlendem Vorwissen erfüllt werden (vgl. Kapitel 1.3). Eine Eingliederung eines Lebensdauer-DoE in ein ganzheitliches Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse ist nicht beschrieben.

2 Vorgeschlagenes Vorgehen

Basierend auf den erläuterten Anforderungen an die Zuverlässigkeitsanalyse sowie den aufgezeigten Defiziten bisheriger Vorgehensweisen wird das in Bild 4 dargestellte Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme für Teils noch unbekannte Anwendungsfelder vorgeschlagen. Kern dieses Vorgehens bildet die statistische Versuchsplanung (DoE).

Das in Bild 4 vorgeschlagene Vorgehen wird in den folgenden Unterkapiteln 2.1 bis 2.5 genauer beschrieben. Für ein besseres Verständnis, werden ergänzend Beispiele bei der Anwendung der hier betrachteten neuartigen pneumatischen Ventilinsel gezeigt. In Kapitel 3 folgt eine Bewertung des vorgeschlagenen Vorgehens.



Zwecks Übersichtlichkeit nicht dargestellt sind Iterationsschleifen, sowie möglicherweise gleichzeitige Bearbeitungen.

Bild 4: Vorgeschlagenes Vorgehen zur entwicklungsbegleitenden Ermittlung eines Lebensdauermodells eines mechatronischen Systems.

2.1 Systemdefinition und qualitative Analyse

Eine statistische Versuchsplanung kann nur durchgeführt werden, wenn genügend Prüflinge mit einem vergleichbaren Stand vorhanden sind. Weiterhin müssen bestimmte Informationen für eine erfolgreiche Versuchsplanung vorhanden sein. Dies ist in den frühen Phasen der Produktentwicklung üblicherweise nicht der Fall. Zu Beginn des vorgeschlagenen Vorgehens soll daher nach der Systemdefinition, der Definition von Systemgrenzen und Zuverlässigkeitszielen, zunächst wie üblich eine qualitative Analyse durchgeführt werden. Weit verbreitete Methoden, wie z.B. FMEA, können hier zum Einsatz kommen. Für folgende Analysen kann es hilfreich sein, das zu untersuchenden Systems in Form eines Funktionsblockdiagrammes darzustellen. Hierbei können Funktionszusammenhänge und Schnittstellen der einzelnen Komponenten übersichtlich dargestellt werden. Für das Beispiel der hier betrachteten neuartigen Ventilinsel ist ein vereinfachtes Funktionsblockdiagramm in Bild 5 dargestellt. Es ist visualisiert, wie die einzelnen Komponenten untereinander angebinden sind. Die einzelnen Ventile sind jeweils elektrisch mit dem Controller über ein Busprotokoll verbunden. Eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ist an das Controllermodul angeschlossen und kann dieses steuern. Form- oder kraftschlüssige Verbindungen zwischen den Komponenten sind ersichtlich.

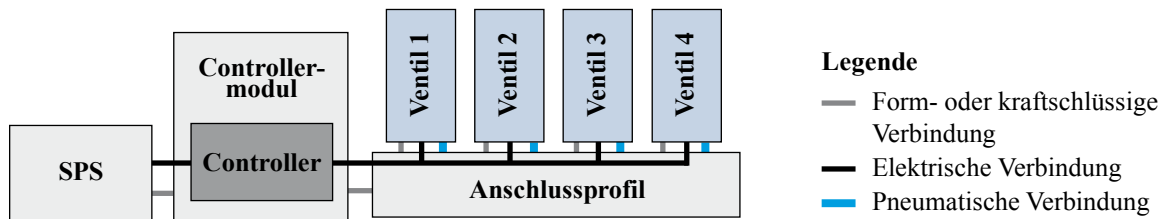


Bild 5: Vereinfachtes Funktionsblockdiagramm der neuartigen Ventilinsel auf oberster Ebene.

Abhängig von dem Schädigungszustand einer Komponente kann im realen Betrieb eine andere Komponente stärker belastet werden und somit früher ausfallen. Beispielsweise könnte durch einen falsch ausgelegten Regler die Regelung der Ventilposition zu schwingen anfangen. Hierbei würde die Mechanik des Ventils deutlich stärker belastet und folglich früher ausfallen. Für eine realistische Nachbildung dieses Verhaltens müssen diese Wechselwirkungen bekannt sein. Nach Gäng (2012) können Wechselwirkungen systematisch durch einen paarweisen Vergleich der vorhandenen Komponenten in einer Matrixdarstellung dargestellt werden. Bei der Anwendung dieses Vorgehens bei dem hier betrachteten System ergibt sich, bedingt durch die mit der Einzelkomponentenzahl annähernd quadratisch steigende Anzahl an notwendiger Bewertungen, ein großer Aufwand. Um diesen Aufwand zu reduzieren, schlagen Müller et al. (2017) ein mehrstufiges Vorgehen zur Ermittlung und Bewertung von Wechselwirkungen vor. Zuerst werden die Wechselwirkungen von Baugruppen auf oberster Ebene durch Expertenbefragung bewertet. In einer darauf folgenden Bewertung werden nur die als kritisch betrachteten Komponenten genauer betrachtet. Besonders schlecht bewertete Komponenten können in einer abschließenden Bewertung überprüft werden.

Durch qualitative Analysen können frühzeitig mögliche Schwachstellen, Fehlermechanismen und Wechselwirkungen erfasst werden. Diese Informationen sind hilfreich für eine versuchstechnische Voruntersuchung und Planung des DoE. Potentiell kritische Komponenten können identifiziert und evtl. notwendige Versuche aufgezeigt werden.

2.2 Versuchstechnische Voruntersuchung und quantitative Analyse

Für eine quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten des mechatronischen Systems sind entsprechende Zuverlässigkeitskennwerte notwendig. Für elektronische Komponenten können diese Kennwerte bestehenden Ausfallratenkatalogen wie z. B. der Siemens Werksnorm SN 29500 (z.B. SN 29500-4 (2004)) oder dem älteren Militärhandbuch MIL-HDBK-217F (1990) entnommen werden. Es sei angemerkt, dass Unterschiede zwischen den nach Normen berechneten und den real auftretenden Lebensdauer kennwerten bestehen können.

Für neuartige nichtelektronische Komponenten ohne jegliches Vorwissen oder Berechnungsmöglichkeiten können Zuverlässigkeitskennwerte in der Regel nur mittels Dauerlaufversuchen ermittelt werden. Dauerlaufversuche sind üblicherweise kosten- und zeitintensiv. Daher ist auf eine möglichst effiziente Durchführung dieser Versuche zu achten. In Tabelle 1 sind hierzu verschiedene Möglichkeiten der Versuchsverkürzung dargestellt. Eine Möglichkeit die Versuche zu verkürzen, ist die Prüflinge unter härteren Bedingungen zu testen. So können die Belastungen erhöht, Lasten schneller hintereinander aufgebracht, Design Parameter (z.B. der Querschnitt eines kritischen kraftführenden Stelle) angepasst, oder die Fehlergrenzen herabgesetzt werden (Yang 2007). Jedoch muss anschließend von den Ausfällen unter verschärften Bedingungen auf Ausfälle bei üblichen Bedingungen zurückgerechnet werden können. Dieses Wissen ist in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses üblicherweise nicht vorhanden und muss falls erforderlich erarbeitet werden. Wird dieses Wissen aufgebaut, so kann es in den nachfolgenden Versuchen des DoE zur Verkürzung der Versuche verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Dauerlaufversuche besteht darin, aus noch nicht komplett abgeschlossenen Versuchen bereits die notwendigen Informationen zu extrahieren. Eine oft angewendete Methode ist die zensierte Auswertung. Hierbei werden Zuverlässigkeitskennwerte aus nicht kompletten (zensierten) Daten berechnet (siehe Bertsche und Lechner (2004)). Zur Voraussage von Ausfällen können prinzipiell Degradationsmerkmale verwendet werden. Im Beispiel des pneumatischen Ventils könnte dies z.B. die Leckage sein. Würde die Leckage kontinuierlich und gleichmäßig ansteigen,

könnte vorhergesagt werden, wann der kritische Schwellwert zum Ausfall überschritten wird. Allerdings müssen solche Kennwerte messbar und deren Verlauf im Voraus bekannt sein.

Im Rahmen von ausführlichen Voruntersuchungen an einer kritischen Komponenten des pneumatischen Ventils wurden die gezeigten Möglichkeiten der Versuchsverkürzung untersucht. Eine zeitliche Raffung wurde genauer untersucht. Extrapolierbare Degradationsmerkmale konnten keine gefunden werden. Der dominierende Schadensmechanismus sowie eine Ausfallverteilung konnte ermittelt werden. Versuche für unterschiedliche Faktoren und Einstellungen wurden in kleinem Maße getestet. Bei den Versuchen musste jeweils beachtet werden, dass sich das Produkt noch in der Entwicklung befindet und sich der Konstruktionsstand zwischen den Versuchen ändern kann. Folglich muss regelmäßig überprüft werden, inwieweit bisherige Erkenntnisse übertragen werden können.

Tabelle 1: Möglichkeiten der Versuchsverkürzung.

Versuchsverkürzung durch (vgl. Yang (2007))		Anwendbarkeit in frühen Phasen	Einschränkung
1. Früheres Auftreten der Ausfälle	Erhöhung der Belastung	Bedingt	Übertragbarkeit auf übliche Belastungen muss bekannt sein
	Zeitliche Raffung	Bedingt	Einfluss von Pausenzeiten / höheren Frequenzen muss bekannt sein
	Design Parameter anpassen	Bedingt	Einfluss von Design Parameter auf Lebensdauer muss bekannt sein
	Fehlergrenze heruntersetzen	Bedingt	Umrechnungsfaktor auf übliche Fehlergrenze muss bekannt sein
2. Auswertung	Zensierung	Ja	Ausreichend beobachtete Ausfälle
	Extrapolation eines Degradationsmerkmals	Bedingt	Schadensmechanismus, Degradationsmerkmal sowie dessen Verlauf muss bekannt sein

2.3 Statistische Versuchsplanung: DoE

Mittels DoE geplante Versuche stellen den zentralen Punkt des hier vorgeschlagenen Vorgehens dar. Lebensdauer kennwerte der relevanten Komponenten für unterschiedliche Randbedingungen und Belastungen können systematisch ermittelt werden. Diese Lebensdauer kennwerte stellen die Basis für die Modellierung und Ermittlung der Systemzuverlässigkeit nach Kapitel 2.5 dar.

Um eine DoE durchführen zu können, müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt werden. Die zu testenden Faktoren müssen zusammen mit deren Einstellungen ausgewählt werden. Es können nicht zu viele Faktoren genauer untersucht werden, da sonst der Aufwand exponentiell steigt. Üblicherweise wird erst eine Versuchsreihe mit vielen Faktoren gestartet und geprüft, ob diese Faktoren einen Einfluss auf die Lebensdauer haben („Screening“, vgl. Kleppmann (2011)). Der Einfluss der Faktoren auf die Lebensdauer kann beim Screening jedoch noch nicht genauer quantifiziert werden. Um dies zu ermöglichen, werden in einer zweiten Versuchsreihe die als relevant identifizierten Faktoren genauer untersucht. Für die Versuche muss je nach Anforderung ein passender Versuchsplan ausgewählt und ausgearbeitet werden. Nicht vernachlässigt werden sollte die Abstimmung des Versuchsplans mit den Projektbeteiligten. Ist ein Versuchsplan ausgearbeitet und abgestimmt, müssen anschließend entsprechend viele Prüflinge mit dem gleichen Konstruktionsstand verfügbar sowie entsprechende Mess- und Dauerlaufprüfstände vorhanden sein.

Nutzen eines DoE ist die systematische und effiziente Erfassung von Faktoren auf eine Zielgröße (vgl. Kapitel 1.3). Eine Herausforderung liegt in der Wahl eines geeigneten Versuchsplans sowie geeigneter Faktoren und deren Einstellungen. Werden Faktoren mit Einfluss auf die Zielgröße von vornherein vernachlässigt, werden folglich auch Einflüsse dieser Faktoren im späteren Beschreibungsmodell nicht wiedergegeben. Weiterhin muss zwischen Versuchsaufwand und erkennbarem Effekt abgewogen werden. Bei dem hier beispielhaft betrachteten mechatronischen System der neuartigen Ventilinsel wurde ein statistischer Versuchsplan ausgearbeitet, abgestimmt und die hierbei vorgesehenen Versuche gestartet. Um dies zu ermöglichen, wurden extra ermittelte Informationen aus Voruntersuchungen (dominante

Schadensmechanismen, Ausfallverteilung, mögliche Einflussfaktoren und deren Einstellungen,...) sowie vorhandenes Wissen aus Versuch, Forschung und Entwicklung berücksichtigt. Zur Auswahl eines Versuchsplanes wurden unterschiedliche Versuchspläne ausgearbeitet und u. a. in Hinsicht auf Aufwand und zu erkennende Effekte verglichen. Berücksichtigt werden muss, dass die jeweiligen Versuchspläne auch in Realität umsetzbar sind. Um den Zustand der einzelnen Komponenten der Ventile über die Lebensdauer erfassen zu können, müssen regelmäßig eine Vielzahl an Messungen durchgeführt werden. Um diesen großen Messaufwand handhaben zu können, wurden eigens entsprechende Messaufbauten entwickelt. Durch einen hohen Automatisierungsgrad dieser Messaufbauten wird die detaillierte Erfassung der Eigenschaften der Komponenten über die Lebensdauer möglich.

Während die Ermittlung der Lebensdauerwerte das eigentliche Ziel der Versuche ist, können dennoch deutlich mehr Informationen durch die Versuche abgeleitet werden (Gröber et al. 2017). So können beispielsweise durch das systematische Testen Schwachstellen und Einsatzgrenzen aufgezeigt und an die Entwickler zurückgegeben werden. Kernelement stellen jedoch die in den zyklischen Messungen erfassten Kennwerte der Komponenten dar. Auf der einen Seite bilden diese die Grundlage für die Auswertung von Zuverlässigkeitskennwerten. Auf der anderen Seite können gezielt Informationen über die Verteilung der Kennwerte (Produktionsstreuung) erfasst werden. Das Verhalten dieser Kennwerte in Abhängigkeit der Randbedingungen und Belastungen über die Lebensdauer kann ermittelt werden. Diese Daten können in einer Simulation zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit verwendet werden.

2.4 Anwendung erfasster Daten in simulativen Analysen

Fällt ein Bestandteile eines mechatronischen Systems (Mechanik, Elektronik, Software) aus, fällt folglich das gesamte System aus. Die einzelnen mechanischen und elektronischen Komponenten unterliegen fertigungsbedingten Toleranzen. Eigenschaften dieser Komponenten können sich, hervorgerufen etwa durch Alterung oder Verschleiß, über die Lebensdauer ändern. Für ein zuverlässiges Gesamtsystem muss gewährleistet werden, dass diese Eigenschaftsänderungen keine bzw. nur eine möglichst geringe Auswirkung auf die Funktionsfähigkeit des mechatronischen Systems hat. Ein Regelalgorithmus muss folglich mit den im Feld auftretenden Randbedingungen zurechtkommen. Um Regelalgorithmen bzw. die Software eines mechatronischen Systems entwicklungsbegleitend zu testen, schlägt VDI 2206 (2004) den Einsatz von Hardware-in-the-Loop (HiL), sowie Software-in-the-Loop (SiL) Simulationen vor. Bei dieser Art der Simulation werden Teile des mechatronischen Systems durch eine Simulation ersetzt. Somit können effizient unterschiedliche Anwendungen getestet werden. Weiterhin können Szenarien getestet werden, welche ohne Simulation schwierig oder gefährlich umzusetzen wären. Neben HiL und SiL existieren noch weitere Möglichkeiten der Simulation, welche unter dem Überbegriff „XiL“ zusammengefasst werden können. Das „XiL“ steht hierbei für die zu untersuchenden Prüfling (Albers et al. 2010). Die Simulationen sind dabei jeweils von klassischen HiL-Simulationen abgeleitet. Diese Arten der Simulation werden häufig im Bereich der Fahrzeugentwicklung angewendet. Auf das Beispiel eines pneumatischen Ventils übertragen sind unterschiedliche Möglichkeiten in Tabelle 2 dargestellt. So gibt es die Möglichkeit, mittels eines Modell-in-the-Loop (MiL) den eigentlichen Regelalgorithmus zu testen. Mittels einer Prozessor-in-the-Loop (PiL) Simulation kann die Firmware des Ventils in Echtzeit getestet werden. Hierbei werden das Ventilverhalten sowie der Controller simuliert. Ein reales Ventil oder ein realer Controller muss somit nicht zur Verfügung stehen.

Tabelle 2: Möglichkeiten der Simulation am Beispiel eines pneumatischen Ventils.

X - in the Loop	Möglicher Prüfling	Simulation	Simulation in Echtzeit
Modell (MiL)	Regelalgorithmus	Ventil, Controller, Kundenanwendung	Nein
Software (SiL)	Firmware	Ventil, Controller, Kundenanwendung	Nein
Prozessor (PiL)	Firmware	Ventil, Controller, Kundenanwendung	Ja
Hardware (HiL)	Reales Ventil	Controller, Kundenanwendung	Ja

2.5 Quantitative Modellierung: Ableiten eines Lebensdauermodells auf Systemebene

Im Rahmen des DoE werden Zuverlässigkeitskennwerte für die relevanten Komponenten des mechatronischen Systems für unterschiedliche Lasten und Randbedingungen ermittelt. Wie in Kapitel 2.1 dargestellt wurde, können diese Komponenten voneinander abhängig sein. Für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit müssen diese Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Einfache Modellierungsansätze, wie z.B. die Modellierung mit Hilfe der Booleschen Theorie, können diese Wechselwirkungen nicht berücksichtigen (Bertsche und Lechner 2004). Hier wird von unabhängigen Systemelementen ausgegangen. Wie auch in Habchi und Barthod (2016) vorgestellt, können mechatronische Systeme, auch solche mit Wechselwirkungen, mittels Petrinetzen modelliert und simuliert werden. Müller et al. (2017) konnten zeigen, dass eine Modellierung mittels Petrinetzen am Beispiel der hier betrachteten neuartigen pneumatischen Ventilinsel möglich ist. Insbesondere wird aufgezeigt, dass eine Vernachlässigung von auftretenden Wechselwirkungen einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit haben kann.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist die Zusammenführung von Lebensdauer kennwerten der einzelnen Komponenten zu einem Lebensdauermodell für das Gesamtsystem. Damit können, wie in Kapitel 1.4 gefordert, u.a. Aussagen zur Lebensdauer für unterschiedliche Belastungen und Randbedingungen abgeleitet werden.

3 Zusammenfassung, Bewertung, Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein Vorgehen vorgestellt, mit welchem ein Lebensdauermodell eines neuartigen mechatronischen Systems ermittelt werden kann. Mit Hilfe dieses Vorgehens können Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Anwendungen abgeleitet werden. Kern des hier vorgeschlagenen Vorgehens bildet eine statistische Versuchsplanung (DoE) für die relevanten Komponenten des Systems. Um notwendige Informationen für die Versuchsplanung zu erfassen, wird eine qualitative sowie versuchstechnische Voruntersuchung vorgeschlagen. Da Versuche in der Regel kosten-, als auch zeitintensiv sind, wurden unterschiedliche Möglichkeiten vorgestellt, um die Versuchszeiten zu verkürzen. Durch die Versuche des DoE kann eine Vielzahl an Informationen generiert werden. Im Rahmen eines ganzheitlichen Ansatzes wird daher aufgezeigt, dass diese Informationen auch anderweitig, z.B. in HiL Simulationen, verwendet werden können. Eine abschließende Modellierung des Systemverhaltens kann mittels Petrinetzen durchgeführt werden.

Im Vergleich zu bestehenden Methoden eignet sich das hier vorgeschlagene Vorgehen für neuartige mechatronische Systeme, bei welchen Lebensdauer kennwerte nur durch Versuche ermittelt werden können, aber dennoch Aussagen für unterschiedliche Anwendungen und Randbedingungen abgeleitet werden sollen. Weiterhin wird gezeigt, wie die hier anwendbaren Methoden in einem ganzheitlichen Ansatz verwendet werden können.

Trotz einer effizienten Vorgehensweise entsteht durch die hier vorgeschlagenen Versuche ein erheblicher Aufwand. Daher sollte detailliert geprüft werden, inwieweit Vorwissen oder Berechnungen zur Bestimmung der notwendigen Lebensdauerparameter verwendet werden können. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob ein einheitliches Lastprofil definiert werden kann. Ist beides der Fall, können bestehende Vorgehensweisen angewendet werden. Andernfalls kann mit dem hier vorgestellten Vorgehen die Zuverlässigkeit des neuartigen mechatronischen Systems im Rahmen eines ganzheitlichen Ansatzes untersucht werden.

Das hier vorgeschlagene Vorgehen der Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme wird aktuell am Beispiel einer pneumatischen Ventilinsel verifiziert. Es wurden entwicklungsbegleitend qualitative Analysen und versuchstechnische Voruntersuchungen durchgeführt. Auf Basis dieser Informationen konnte eine DoE geplant, abgestimmt und gestartet werden. Aktuell werden die Versuche des DoE noch durchgeführt. Dennoch können bereits erste Lebensdauer kennwerte in Abhängigkeit unterschiedlicher Belastungen ermittelt werden. Weiterhin können durch das systematische Testen Fehler aufgezeigt werden, welche im Rahmen üblicher Versuche bisher nicht erkannt wurden. Durch das Erfassen von Kennwerten von Komponenten über die Lebensdauer konnte das Systemverständnis vertieft werden. Im Vergleich zu herkömmlich angewendeten Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse sind somit bereits Vorteile erkennbar. Das vorgestellte Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme wird in Zukunft weiter detailliert und optimiert.

Literatur

- Albers et al. 2010 ALBERS, Albert ; DÜSER, Tobias ; SANDER, Oliver ; ROTH, Christoph ; HENNING, Josef: *X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme*. In: *ATZelektronik* 5 (2010), Nr. 5, S. 60–65
- Bertsche et al. 2009 BERTSCHE, Bernd ; GÖHNER, Peter ; JENSEN, Uwe ; SCHINKÖTHE, Wolfgang ; WUNDERLICH, Hans-Joachim: *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme : Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Berlin u.a. : Springer, 2009 (VDI-Buch)
- Bertsche und Lechner 2004 BERTSCHE, Bernd ; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau : Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. 3., überarb. u. erw. Aufl. Berlin u.a. : Springer, 2004
- Gäng 2012 GÄNG, Jochen: *Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen*. Stuttgart : Univ. Inst. für Maschinenelemente, 2012
- Gröber et al. 2017 GRÖBER, Jan ; MÜLLER, Frank ; GAUCHEL, Wolfgang ; ZEILER, Peter ; BERTSCHE, Bernd: Extended Reliability Analysis of Mechatronic Systems based on Information Obtained by Design of Experiments. In: *Proc. of European Safety and Reliability Conference (ESREL 2017)*.
- Habchi und Barthod 2016 HABCHI, Georges ; BARTHOD, Christine: *An overall methodology for reliability prediction of mechatronic systems design with industrial application*. In: *Reliability Engineering & System Safety* 155 (2016), S. 236–254
- Hamada 1995 HAMADA, Michael: *Using statistically designed experiments to improve reliability and to achieve robust reliability*. In: *IEEE Transactions on Reliability* 44 (1995), Nr. 2, S. 206–215
- ISO 19973-1 2015 ISO 19973-1. 2015-08-01. *Pneumatic fluid power — Assessment of component reliability by testing — Part 1: General procedures*
- Kleppmann 2011 KLEPPMANN, Wilhelm: *Taschenbuch Versuchsplanung : Produkte und Prozesse optimieren*. 7., aktualisierte und erw. Aufl., München : Hanser, 2011
- MIL-HDBK-217F 1990 MIL-HDBK-217F. 1990. Reliability prediction of electronic equipment
- Müller et al. 2017 MÜLLER, Frank ; GRÖBER, Jan ; RIEKER, TIMO, ZEILER, PETER ; BERTSCHE, Bernd: Development-based Reliability Modelling and Analysis with Petri Nets considering Interactions. In: *Proc. of European Safety and Reliability Conference (ESREL 2017)*.
- Reliasoft 2017 ReliaSoft Corporation. *Experiment Design & Analysis Reference*. URL: <http://reliawiki.org> (abgerufen am 01-02-2017)
- Siebertz et al. 2010 SIEBERTZ, Karl ; VAN BEBBER, David ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung : Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg : Springer, 2010 (VDI-Buch)
- SN 29500-4 2004 SN 29500-4. 2004-03. *Ausfallraten Bauelemente Teil 4: Erwartungswerte für Passive Bauelemente*
- VDA 3.2 2016 VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten*. VDA 3.2, 2016
- VDI 2206 2004 VDI 2206. Juni 2004. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*
- Yang 2007 YANG, Guangbin: *Life cycle reliability engineering*. Hoboken N.J. : John Wiley & Sons, 2007

Zuverlässigkeitstestplanung auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit

M.Sc. Stefan Jetter¹, Dipl.-Ing. Frank-Oliver Müller¹, Dr.-Ing. Ralph Weller¹, Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche²

¹Daimler AG, 70546 Stuttgart, Deutschland
stefan.jetter@daimler.com

²Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, Deutschland
contact@ima.uni-stuttgart.de

Abstract: Neue Herausforderungen in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung, vor allem durch immer leichter und komplexer werdende Konstruktionen, stellen den bislang überwiegend historisch gewachsenen Auslegungs- und Erprobungsprozess buchstäblich auf den Prüfstand. Bislang gültige Auslegungs- und Prüfprofile gilt es kritisch zu hinterfragen sowie stetig zu erweitern und zu optimieren. Neue Möglichkeiten, vor allem durch die im Zuge von Big-Data mögliche Erfassung von Kundenkollektiven, sowie verbesserte Berechnungs- und Simulationsmethoden können hierbei unterstützend eingesetzt werden. Dabei gilt es zu überprüfen, welche Betriebspunkte für eine Auslegung in Frage kommen und wie relevant diese für den Kunden sind. Durch die Überlagerung der digitalen Baustufe mit dem Kundennutzungsverhalten kann diese Fragestellung mittels eines simulativen Zuverlässigkeitsprozesses geklärt und dadurch Rückschlüsse auf die notwendigen Erprobungsprofile gezogen werden.

Keywords:

Zuverlässigkeit, Testplanung, Simulation, Betriebsfestigkeit

1 Motivation & Zielsetzung

Zuverlässigkeit ist eines der wichtigsten Ziele im Fahrzeug- und Maschinenbau und nimmt einen der höchsten Stellenwerte im Entwicklungsprozess ein (Bertsche und Lechner 2004). Umfangreiche Absicherungen und Erprobungen sollen die entsprechend geforderte Zuverlässigkeit nachweisen, dabei aber möglichst in einem vertretbaren Kosten- und Zeitrahmen liegen.

Im Bereich der Fahrzeug-, bzw. Antriebstrangentwicklung verschärft sich dieser Zielkonflikt aufgrund zunehmend komplexer werdender Konstruktionen. Exemplarisch zeigt dies die Entwicklung neuerer modularer Motoren (z.B. des OM 654 von Mercedes-Benz). Neben optimiertem Gewicht, höherer Leistung, geringerem Verbrauch sowie Emissionen gilt es auch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebstrangs zu berücksichtigen. (Eder et al. 2016)

Um eine Zuverlässigkeitsabsicherung derartiger Projekte in einem sinnvollen Kosten- und Zeitrahmen zu halten, wird der Einsatz einer digitalen Baustufe unerlässlich (Weller 2016). Neben klassischen Themen wie der Dimensionierung von Bauteilen oder der Analyse des Geräuschverhaltens werden zunehmend auch rein digitale Absicherungen von Varianten bzw. Derivaten durchgeführt.

Um dies mit höchster Präzision zu ermöglichen, sind vor allem zuverlässigkeitsorientierte Simulationsmethoden Gegenstand der aktuellen Forschung. Ziel ist es die Komplexität der Auslegung, Erprobung und des Feldverhaltens bereits in frühen Phasen der Entwicklung digital abzubilden um verlässliche Aussagen zu generieren, die dabei auch die bestehende Hardware-Erprobung unterstützen können. (Eder 2015, Mutter 2015, Jetter et al. 2016)

Neben der Integration der digitalen Baustufe in den Erprobungsprozess, steht dabei auch die Optimierung der Erprobungsprofile an sich im Fokus. Die bestmögliche Identifikation kritischer Beanspruchungszustände sowie die Analyse des Kundennutzungsverhaltens sind dabei die zentralen Themen zur Optimierung der meist empirisch gewachsenen Prüfprofile. Durch die zunehmende Felddatenerfassung ergeben sich hierbei neue Möglichkeiten zur Überprüfung vorhandener Erprobungsprozesse (Köttermann et al. 2015). Mit dieser Felddatenerfassung kann aufgezeigt werden,

ob die über die Jahre gewachsenen Prüfprofile noch den heutigen Anforderungen des Kunden entsprechen.

Parallel dazu kann die digitale Baustufe die Optimierung der Zuverlässigkeitstestplanung in Form einer Identifikation kritischer Beanspruchungsbereiche unter Berücksichtigung des Degradationsverhaltens der Bauteile weiter unterstützen und die Testplanung von „innen“ heraus gestalten. Diese Herangehensweise soll vor allem im Bereich der Prüfstanderprobung eingesetzt werden, um möglichst zeiteffiziente Erprobungsprofile zu entwickeln, die sich auf die Überprüfung einzelner Lastpunkte konzentrieren, aber dennoch die Anforderungen des Felds abbilden.

Ziel ist es folglich die Berechnung und den Versuch noch enger zu verzahnen und mit den realen Gegebenheiten des Felds abzugleichen um eine optimierte Zuverlässigkeitstestplanung aufzubauen, die zum einen möglichst kosten- und zeiteffizient ist, zum anderen aber auch die Zuverlässigkeit der Komponenten und Systeme umfassend nachweist.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der eine solche Verzahnung der beiden Teilbereiche unter Nutzung von Kundenlastprofilen und simulativen Methoden ermöglicht. Zunächst wird dazu der aktuelle Stand der Technik besprochen (Kapitel 2) und aufgezeigt inwiefern die Erprobung unter der Verwendung eines simulativen Zuverlässigkeitsprozesses (Kapitel 3) optimiert werden kann, bzw. bestehende Prüfprofile systematisch validiert werden können (Kapitel 4). Da dieser Ansatz im Rahmen der Kurbelgehäuse-Entwicklung entstanden ist, wird er zwar allgemeingültig beschrieben, findet jedoch den Anwendungsbezug am Beispiel des Kurbelgehäuses. Dieses ist vor allem aufgrund seiner Leichtbaupotentiale sowie der, aufgrund zunehmender dynamischen Effekte des Kurbeltriebs (Eder et al. 2016), nicht eindeutig vorab zu bestimmenden kritischen Betriebszustände (Jetter et al. 2016), ein überaus geeignetes Beispiel zur Anwendung des entwickelten Verfahrens.

2 Stand der Technik

Um aufzuzeigen, inwiefern die digitale Baustufe bestehende Erprobungsprozesse zielgerichtet unterstützen und optimieren kann, ist zunächst eine Analyse des aktuellen Standes zum Ablauf von Erprobungen sowie von Ansätzen zur zeitoptimierten Erprobung notwendig. Entsprechende Handlungsableitungen für eine weitere Verzahnung zwischen Erprobung und Berechnung sollen dadurch bestimmt werden.

Der typische Auslegungs- und Erprobungsprozess einer mechanischen Komponente im Fahrzeugbau, welcher aus einer digitalen Baustufe sowie einer Hardware-Erprobung besteht, wird in Bild 1 aufgezeigt (siehe auch Friedrich 2017). Die Hardware-Erprobung ist dabei in eine Komponenten- sowie eine System-Erprobung unterteilt und wird erst nach erfolgreichem Abschluss der digitalen Baustufe durchlaufen (Eder 2015).

Die digitale Baustufe besteht zunächst aus der rechnergestützten Konstruktion, in welcher bereits eine erste Dimensionierung des Bauteils auf Basis von Erfahrungswissen durch Vorgängerprojekte stattfindet. Gemäß Bertsche und Lechner (2004) legt dies bereits den Grundstein der Zuverlässigkeit, da auf Bauteilebene die Zuverlässigkeit nicht durch Redundanzen erhöht werden kann. Eine auf den kritischsten Betriebslastfall angepasste Auslegung der Komponenten ist aus diesem Grund zwingend erforderlich. Beim Kurbelgehäuse wurde dies bislang zum Beispiel durch eine Auslegung auf den Zündzeitpunkt (maximale Gaskraft) erreicht. Der zunehmende Leichtbau, welcher sich durch die gesamte Fahrzeugentwicklung zieht, lässt aber auch bislang unbekannt kritische Lastfälle (z.B. durch Massenkräfte der Kurbelwelle oder Schwingungen) auftreten, die es zielgerichtet vorherzusagen gilt und deren Degradationseinfluss auf die betrachtete Komponente bestimmt werden muss.

Soll solch ein Vorgehen in die Auslegung und Erprobung übertragen werden, so sind rechenzeitoptimierte Simulationsmethoden, zur Bestimmung der möglich auftretenden Lasten und Degradationen unabdingbar. Im aktuellen, überwiegend durch die Finite-Elemente-Methode (FEM) dominierten Auslegungsprozess des Kurbelgehäuses zum Beispiel, ist dies vor allem durch die, für die FEM typischen langen Rechenzeiten, nicht möglich. Aufgrund dieser Einschränkungen findet die digitale Auslegung des Kurbelgehäuses nur zu ausgewählten Lastfällen statt, die sich dabei an entsprechenden Prüfstandversuchen orientieren (siehe Bild 2). Diese sind zumeist historisch gewachsen, wodurch kritische Betriebspunkte, die im Rahmen neuer Entwicklungen aufkommen können, übersehen bzw. erst in der Straßenerprobung aufgedeckt werden können. Dies kann zu zeit-

und kostenintensiven Iterationsschleifen führen, die durch eine optimierte digitale Absicherung sowie Prüfstanderprobung reduziert werden können.

In aktuellen Prozessen kann hier aufgrund der Vielzahl bestehender Prüfstandprofile weitestgehend sichergestellt werden, dass solche Iterationen minimal gehalten werden, jedoch ist auch diese Vielzahl für eine effiziente Erprobung nicht förderlich.

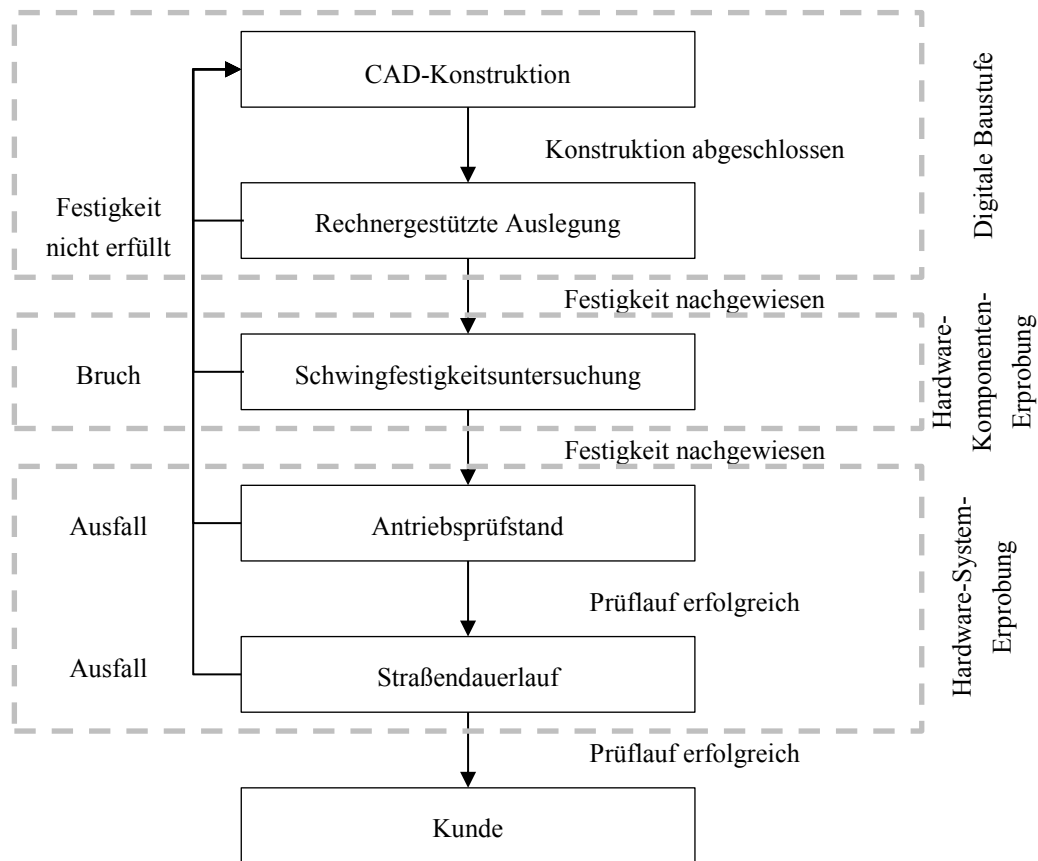


Bild 1: Typischer Auslegungs- und Erprobungsprozess mechanischer Komponenten

In diesem Punkt kann die digitale Baustufe zu großen Teilen unterstützend tätig werden, indem kritische Stellen und Betriebspunkte bereits systematisch vor der Prüfstand- und Straßenerprobung (vgl. Bild 2 & 3) gefunden und somit Iterationsschleifen, wie sie in Bild 1 zu sehen sind, auf die digitale Baustufe beschränkt werden. Ebenso sollen überflüssige Prüfstandversuche aufgedeckt werden.

Zur Aufdeckung solcher überflüssigen Prüfstandversuche gibt es aktuell eine Reihe an Arbeiten, die unterschiedliche Ansätze verfolgen, aber nicht auf die digitale Baustufe und der daraus zu ermittelbaren physikalischen Belastung zurückgreifen, sondern die Lasten entweder direkt am Bauteil erfassen oder über die reine Statistik der Felddaten ein entsprechendes Prüfprofil aufbauen. Nichtsdestotrotz können anhand der im Folgenden kurz vorgestellten Verfahren Ansätze für die Zuverlässigkeitstestplanung auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit abgeleitet werden.

Mit dem Ziel ein optimiertes Testprofil zu erstellen, schlagen Denkmayr et al. (2003) ein methodisches Konzept zum Aufbau einer Load-Matrix vor, welches darauf verweist dass je nach Versagensart ein entsprechend individuelles Degradationsmodell angewendet werden muss. Maisch (2007) wiederum schlägt ein ganzheitliches Erprobungskonzept vor, welches sich hauptsächlich mit der Erfassung von Betriebsdaten beschäftigt. Mit der Glättung eben solcher Daten und damit einer Raffung des Erprobungsprofils beschäftigen sich Xiong und Shenoi (2008), während Mattetti et al. (2012) die Adaption der Erprobung an das Feldverhalten untersucht.

Das methodische Vorgehen zum Vergleich des Felds mit dem Prüfprofil von Denkmayr et al. (2003) kann hierbei zum Beispiel eine gute Grundlage für die digitale Planung der Erprobungsprofile bilden,

während sich aus der Arbeit von Mattetti et al. (2012) Ideen zum schädigungsäquivalenten Aufbau von Prüfprofilen ableiten lassen.

Neben dem reinen Aufbau von Prüfprofilen gilt es darüber hinaus auch zu prüfen ob bestehende Erprobungsabläufe in dieser Form noch zeitgemäß sind. So muss sich im Zuge immer komplexer werdender Aggregate sowie Betriebsstrategien die Hardware-Erprobung auf Komponentenebene (vgl. Bild 1) neu einordnen. Hauptsächlich dienten diese Schwingfestigkeitsuntersuchungen zur Validierung der Berechnung und zur Überprüfung der Bruchfestigkeit gegenüber geforderten Grenzlsten. Durch die weitere Förderung der digitalen Baustufe wandelt sich jedoch dieses Konzept und wird parallel zur Simulation eingeordnet um nicht die Berechnung an sich zu validieren, sondern gemeinsam mit der Simulation die Grenzen der Werkstoffe und Komponenten detailliert bestimmen zu können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bestehende Auslegungs- und Erprobungskonzepte meist über Jahre gewachsen und validiert sind. Jedoch gibt es in neueren Entwicklungen zunehmend komplexere Einflussfaktoren, die eine Überarbeitung und systematische Hinterfragung der Prozesse erfordern. Durch bislang unbekannte kritische Stellen oder Lastfälle kann es innerhalb der Hardware-Erprobung zu kosten- und zeitintensiven Iterationsschleifen kommen, die es zukünftig zu vermeiden gilt. In diesem Punkt können die sich aktuell in der Forschung befindlichen, simulativen Zuverlässigkeitsprozesse Optimierungen schaffen und Iterationsschleifen auf die digitale Baustufe beschränken, indem Prüfstandversuche von „innen“ heraus entwickelt werden.

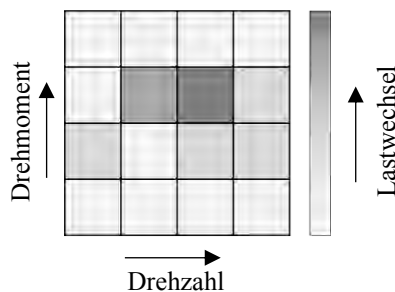


Bild 2: Betriebslastkollektiv eines Prüfstandprofils

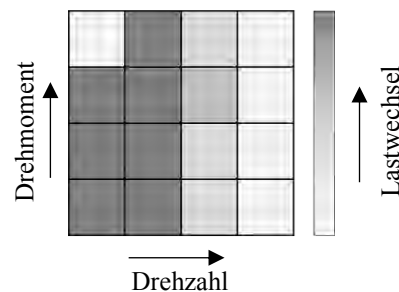


Bild 3: Betriebslastkollektiv eines Straßendauerlaufs

3 Der simulative Zuverlässigkeitsprozess

Mit dem Ziel bereits in frühen Phasen der Entwicklung Aussagen über die statistische Zuverlässigkeitsverteilung mechanischer Komponenten im Feld zu treffen, wurde der simulative Zuverlässigkeitsprozess (Bild 4) als Erweiterung zum bestehenden Standardprozess der digitalen Auslegung aufgebaut. Der Prozess bestimmt dabei die Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung von Belastungskollektiven aus dem Feld und ist überwiegend durch die in den vorangegangenen Kapiteln erwähnten Herausforderungen motiviert.

Basierend auf denen in diesem Kapitel beschriebenen Eigenschaften des Prozesses, ist dessen Adaption auch auf die hier vorliegende Fragestellung nach einer digital unterstützten und optimierten Zuverlässigkeitstestplanung möglich. Der entwickelte und bereits in Ausschnitten in Jetter et al. (2016) und Jetter et al. (2017) vorgestellte Prozess besteht aus vier einzelnen Stufen und ist bezüglich des Aufbaus mit der SZG-Methode nach Mutter (2015) vergleichbar, welche das statistische Feldverhalten miteinbezieht.

Kern des Prozesses ist zum einen eine leistungsstarke Simulationsmethode, zum anderen die Bestimmung und präzise Berechnung der Bauteildegradation unter Berücksichtigung jeglicher Einflussfaktoren auf deren Lebensdauer. Im Fall mechanischer Bauteile wird die Degradation anhand der Schadensakkumulation bestimmt (Gorjian et al. 2009), was vor allem zur Bewertung einzelner Erprobungsprofile im Vergleich zum Kundennutzungsverhalten relevant ist (Denkmayr et al. 2003). Die Wahl der Hypothesen sowie der kritischen Schadenssumme ist dabei stark von externen Einflüssen abhängig, die individuell pro Bauteil und Werkstoff zu bewerten sind. Auf die Bewertung und Auslistung unterschiedlicher Schadensakkumulationsansätze gehen dabei Fatemi und

Yang (1998) ein, während Schütz und Zenner (1973) die Berücksichtigung einzelner Einflussparameter betrachten.

Mittels des im Folgenden beschriebenen Zuverlässigkeitsprozesses soll es nun möglich sein die real im Feld auftretenden Belastungsverteilungen in der Bauteilauslegung zu berücksichtigen und die Zuverlässigkeitsverteilung über der Nutzungsdauer zu bestimmen, was bislang nur auf Basis von Hardware-Erprobungen möglich ist. Des Weiteren ermöglicht er die systematische Untersuchung von Betriebslastfällen. Gerade durch diese Systematik kann auch die Zuverlässigkeitstestplanung deutlich unterstützt werden, in dem die Logik des Prozesses auf die Fragestellung nach optimierten Prüfstandversuchen adaptiert wird, was in Kapitel 4 vorstellt wird.

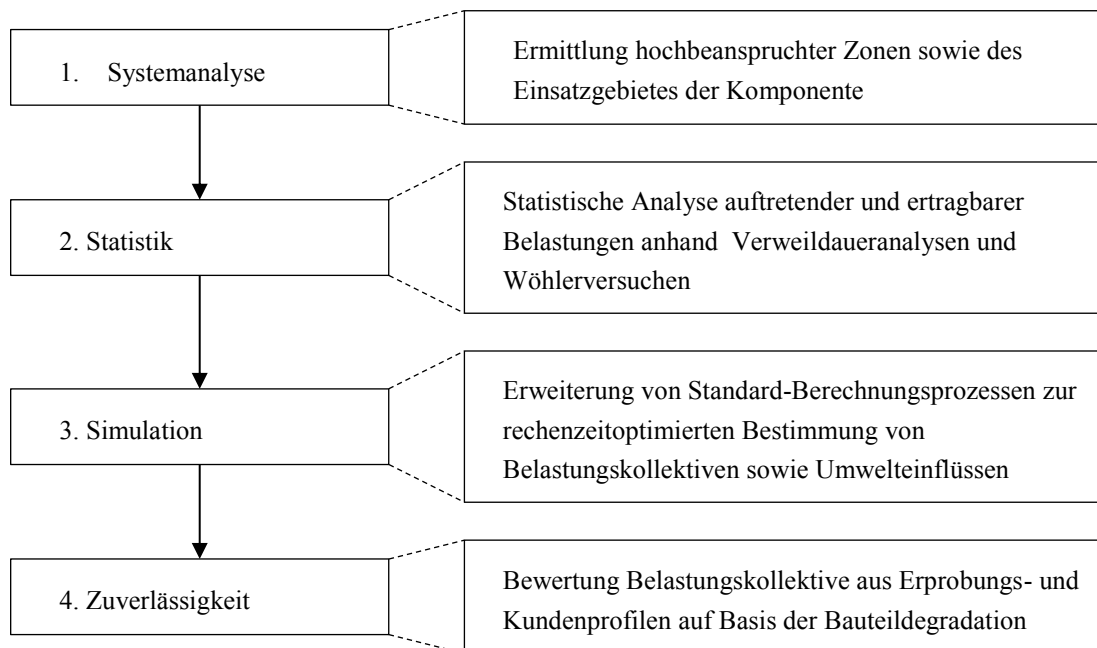


Bild 4: Der simulative Zuverlässigkeitsprozess

Wie in Bild 4 ersichtlich, beschäftigt sich der erste Schritt des simulativen Zuverlässigkeitsprozesses mit der Systemanalyse, das heißt mit der Identifikation kritischer Stellen und Einsatzgebiete. Dieser Schritt bleibt dabei noch parallel zu standardmäßigen Herangehensweisen (z.B. FMEA, FTA) und ist vor allem für eine zielgerichtete Modellierung des Bauteils (Schritt drei) überaus wichtig. Insgesamt ergeben sich im Kurbelgehäuse mehr als 50 kritische Stellen, wovon in Bild 5 exemplarisch drei Stellen (Hohlkehle, Ölbohrung, Ventilation) des Grundlagers betrachtet werden. Zusätzlich gilt es innerhalb dieses Schnittes die Verteilungen der Verweildauern des Felds innerhalb der einzelnen Klassen des betrachteten Kollektivs zu erfassen (z.B. Bild 3).

Der zweite Schritt der simulativen Zuverlässigkeit steht im Zeichen der Statistik. Basierend auf dem Ansatz des Stress-Strength-Interference (Bertsche und Lechner 2004) gilt es die statistische Streuung der auftretenden als auch der ertragbaren Last zu bestimmen. Unter der auftretenden Last werden dabei die Belastungskollektive aus dem Feld verstanden, die ertragbare Last wiederum ergibt sich für mechanische Bauteile aus statistischen Wöhlerlinien bzw. Dauerfestigkeitsdiagrammen (Haigh- oder Smith-Diagramm). Diese werden idealerweise mittels den, in Kapitel 2 beschriebenen Schwingfestigkeitsversuchen direkt an der zu untersuchenden Stelle ermittelt. Neuere Erkenntnisse der Werkstoffmechanik erlauben derweil sogar die simulative Bestimmung solcher Wöhlerkurven (Božić et al. 2014), welche ebenfalls in den Zuverlässigkeitsprozess integriert werden könnten.

Um auf die im Feld oder auch der Erprobung auftretenden Lasten zu schließen, benötigt es den dritten Schritt des Zuverlässigkeitsprozesses. In diesem Schritt wird eine auf den degradationsbestimmenden Einfluss angepasste Simulationmethode benötigt, mittels der die Lasten der einzelnen Klassen des zu betrachtenden Kollektivs berechnet werden. Für das Kurbelgehäuse kommt hier zum Beispiel eine elastische Mehrkörpersimulation zum Einsatz (Jetter et al. 2016; Jetter et al. 2017).

Die im Schritt der Simulation als auch im Schritt der Statistik bestimmten Daten können in der letzten Stufe (Zuverlässigkeit) zusammengeführt und dadurch Aussagen über das Verhalten der einzelnen kritischen Stellen zu jedem Betriebspunkt bzw. Lastfall getroffen werden. Dieser Vorteil kann für eine optimierte Auslegung, bzw. Zuverlässigkeitsprognose genutzt werden. Ebenfalls ist eine Adaption des Prozesses zur Zuverlässigkeitstestplanung möglich, welche im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben wird.

Eine Erweiterung zum bestehenden Vorgehen stellt hier zum einen die Berücksichtigung und Bewertung ganzheitlicher Belastungskollektive anstelle einzelner Lastpunkte dar, zum anderen wird die in Kapitel 2 angesprochene Neustrukturierung der Schwingfestigkeitsversuche vorgenommen.

4 Optimierte Prüfstanderprobung auf Basis von Bauteilfestigkeits-Simulationen

Um den in Kapitel 2 beschriebenen Auslegungs- und Erprobungsprozess zu unterstützen, wird eine zweistufige Umsetzung des in Kapitel 3 vorgestellten simulativen Zuverlässigkeitsprozesses angewendet: Im ersten Schritt (Kapitel 4.1) wird anhand der optimierten Berechnungsmethode für jede kritische Stelle der kritischste Betriebspunkt bestimmt (Sensitivitätsanalyse), wobei das Kundennutzungsverhalten zunächst noch unberücksichtigt bleibt. Dieses wird erst im zweiten Schritt (Kapitel 4.2) für die Bewertung der einzelnen Betriebspunkte und deren Kundenrelevanz herangezogen (vgl. Mattetti et al. 2012). Das Vorgehen ist dabei nur durch die konsequente Entwicklung rechenzeitoptimierter Simulationsansätze sowie der Erfassung des Kundennutzungsverhaltens im Zuge von Big-Data möglich. Die Untersuchung der Betriebspunkte ist dabei beschränkt auf den, für die jeweilige Komponente degradationsfördernden Betriebszustand. Für das Kurbelgehäuse ist dies die Spannungsbelastung, welche sich auf Basis der Information einer Drehzahl-/ Drehmoment-Klassierung bestimmen lässt (vgl. Bild 2 & 3).

4.1 Sensitivitätsanalyse zur Identifikation höchstbelasteter Betriebspunkte

Durch die optimierte Simulationsmethode (Kapitel 3) ist eine für die Serienentwicklung des Kurbelgehäuses geeignete Berechnung aller Betriebslastpunkte des Kundenkollektivs möglich. Die Sensitivitätsanalyse wird dabei für alle in Schritt 1 bestimmten kritischen Stellen (vgl. z.B. Bild 5) sowie für das gesamte Belastungskollektiv (vgl. z.B. Bild 2 & 3) durchgeführt, wodurch sich für jede kritische Stelle der kritischste Betriebspunkt bestimmen lässt (vgl. Bild 5).

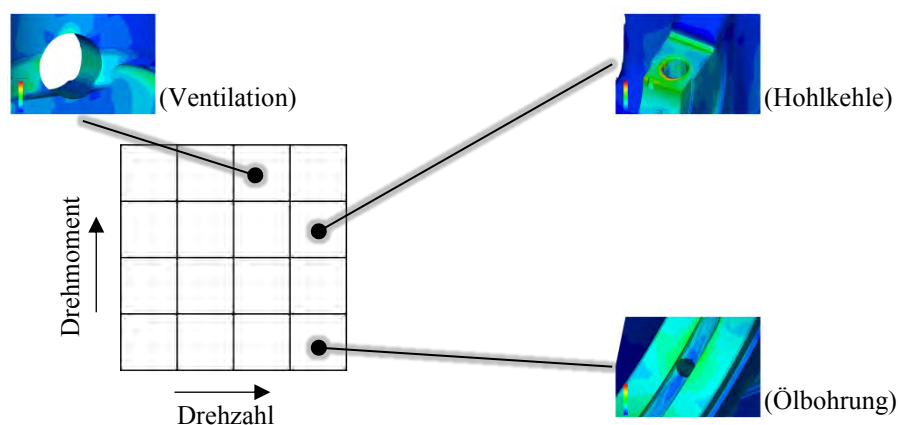


Bild 5: Auftretende Belastungen der kritischen Stellen über den Lastpunkten

Zu sehen ist dabei, dass es im Beispiel keinen generell eindeutigen kritischsten Betriebspunkt gibt, sondern jede untersuchte Stelle für sich ihren eigenen kritischsten Betriebspunkt besitzt, wobei die im zweiten Schritt des simulativen Zuverlässigkeitsprozesses durchgeführten Schwingfestigkeitsversuche zunächst von untergeordneter Bedeutung sind. Relevant ist ausschließlich ein für alle Betriebspunkte

einheitliches Werkstoffverhalten, welches die Bewertung der auftretenden Mittel- und Amplitudenspannungen der einzelnen Stellen / Betriebspunkte objektiv ermöglicht und sich somit eine Rangfolge der „schädlichsten“ Betriebspunkte pro kritischer Stelle aufbauen lässt.

Eine Auslegung auf diese Betriebspunkte würde eine Absicherung aller anderen Betriebspunkte des Kollektivs sicherstellen und die Iterationsschleifen im Hardware-Erprobungs-Prozess auf ein Minimum reduzieren.

Was für die Auslegung kein Problem darstellt, muss jedoch mit Blick auf Leichtbauaspekte und Erprobungszeit kritisch hinterfragt werden. Überdimensionierungen und Erprobungen ohne Kundenbezug gilt es zu vermeiden, weshalb zwingend die jeweilige Kundenrelevanz der einzelnen Betriebspunkte zu prüfen ist. Die aus der exemplarischen Sensitivitätsanalyse des Kurbelgehäuse berechneten kritischen Betriebspunkte legen zum Beispiel die Vermutung nahe, dass sie im Feld aufgrund ihrer Lage, im hohen Drehzahl- und auch Drehmomentbereich, nur selten gefahren werden und daher zu der angesprochenen Überdimensionierung führen. Diese Vermutung soll im nächsten Abschnitt geklärt werden.

4.2 Bewertung von Betriebspunkten durch Analyse des Kundenutzungsverhaltens

Um die Ergebnisse aus Kapitel 4.1 auf ihre Relevanz für die spätere Kundennutzung zu bewerten, müssen die entsprechenden Verweildauern des Feldes (Schritt eins des simulativen Zuverlässigkeitsprozesses) in den einzelnen Betriebspunkten analysiert werden. Zu illustrativen Zwecken und aufgrund der großen Nähe zum Feld wird an dieser Stelle die Bewertung anhand eines Straßendauerlauf-Profiles (vgl. Bild 3) durchgeführt, siehe Bild 6. Es könnte dabei aber auch das Profil eines realen Kunden, z.B. des 50 %- oder 99 %-Kunden für die Bewertung herangezogen werden. Dies kann je nach Auslegungs- und Erprobungsziel vorgegeben werden, wobei eine Erprobung auf Basis des 100 %-Kunden die konservativste Herangehensweise darstellt. Der 100 %-Kunde bedeutet dass dieser fiktionale Kunde in jedem Betriebspunkt die höchste Verweildauer des gesamten analysierten Feldes aufweist. Die Höhe der auftretenden Last in den einzelnen Betriebspunkten ist hingegen unabhängig vom Kunden.

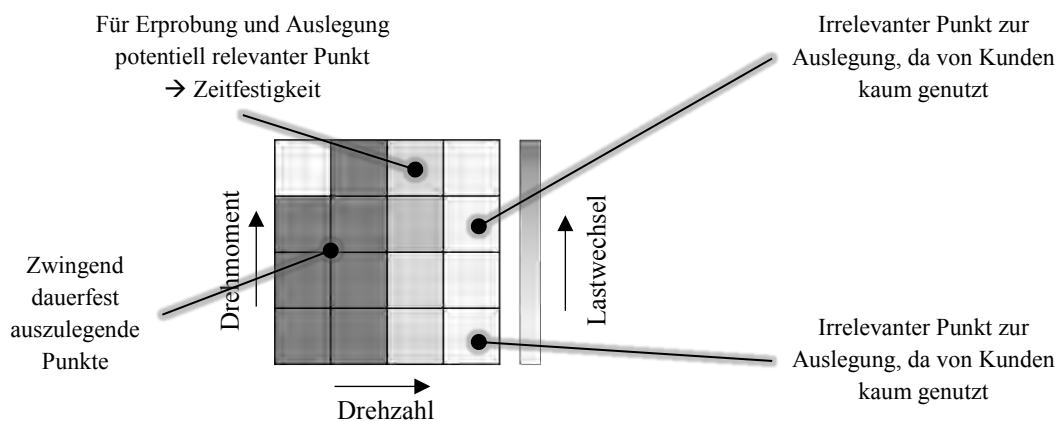


Bild 6: Überlagerung der Betriebspunkte mit dem Profil des Straßendauerlaufs

Bild 6 zeigt dabei, dass die in der Sensitivitätsanalyse bestimmten Betriebspunkte im oberen Drehzahlbereich für eine kundenorientierte Erprobung und Auslegung überwiegend irrelevant sind, was die Vermutung aus Kapitel 4.1 bestätigt.

Um nun eine Kunden- und Betriebspunkt-optimierte Auslegung für jede kritische Stelle zu gewährleisten, ist eine Bewertung des Degradationsverhaltens des Bauteils notwendig. Durch einen entsprechenden Abgleich mit der im zweiten Schritt des simulativen Zuverlässigkeitsprozess ermittelten Wöhlerlinie, können die entsprechenden Schädigungsanteile der einzelnen Betriebspunkte bestimmt werden. Da es im Rahmen der hier vorgestellten Zuverlässigkeitstestplanung rein um die Ermittlung des Prüfprofils geht, muss eine Streuung der Werkstoffkennwerte nicht berücksichtigt werden. Einzige Voraussetzung ist jedoch, dass wie bereits in Kapitel 4.1 ein einheitliches

Werkstoffverhalten pro Stelle / Betriebspunkt angenommen wird. Die im realen Verhalten auftretenden Streuungen sollen hingegen erst bei der Wahl der Prüflingsanzahl verwendet werden. Zur Bestimmung des auslegungsrelevanten Betriebspunktes wird jener Betriebspunkt gewählt, der zwingend gegen Dauerfestigkeit auszuliegen ist, das heißt, der eine definierte Grenzlastspielzahl überschreitet. Sollten mehrere Betriebspunkte im Dauerfestigkeitsgebiet liegen, so wird zunächst der Betriebspunkt gewählt, der die größte Belastung aufweist. Die entsprechend zu untersuchende kritische Stelle wird dann an diesem Betriebspunkt auf die maximal dauerhaft ertragbare Spannung (bekannt aus Schritt 2) hin optimiert. Ausgehend davon werden die spezifischen Schädigungsanteile der restlichen Betriebspunkte im Schaubild der Wöhlerlinie ermittelt (Bild 7). Liegt die summierte Schadenssumme dabei unter einem vorab festgelegten Grenzwert, ist die untersuchte kritische Stelle ausreichend dimensioniert.

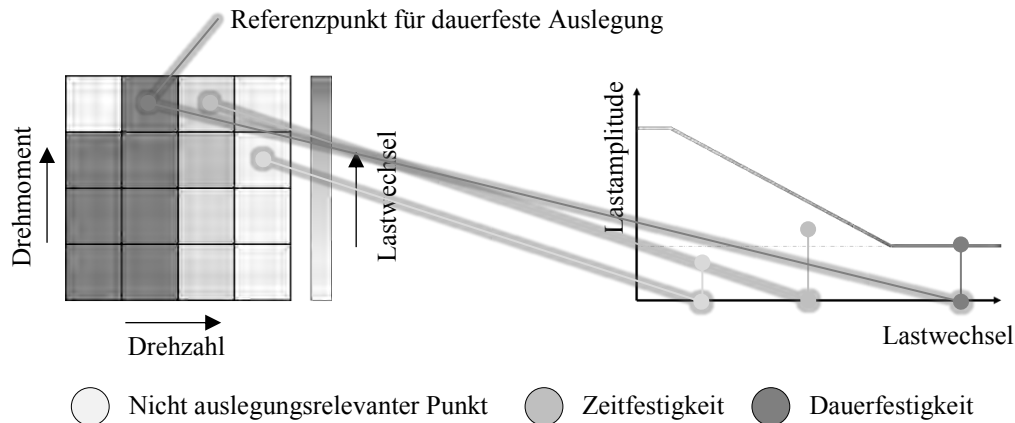


Bild 7: Abgleich des Betriebslastkollektivs mit der Wöhlerlinie (kritische Stelle „Ventilation“)

Am Beispiel der Ventilation war hierbei eine Bestimmung des auslegungsrelevanten Betriebspunktes ohne weitere Iteration möglich. An anderen analysierten Stellen war dies jedoch teilweise nicht der Fall und entsprechend müssen iterativ Änderungen zur Reduktion der Schadenssumme vorgenommen werden. Um diese Iteration systematisiert aufzubauen und klare Auslegungsrichtlinien zu integrieren, wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Zunächst wird der Betriebspunkt ausgewählt, welcher den höchsten Lastwechselanteil im Bereich der Zeitfestigkeit aufweist und dessen Belastung höher ist, als die des bereits zuvor betrachteten Betriebspunktes. Die betrachtete Stelle wird nun so lange iterativ optimiert, bis für sie an diesem Betriebspunkt eine Dauerfestigkeit vorliegt und das gesamte Kollektiv eine, unter dem vorab festgelegten Grenzwert liegende Schadenssumme aufweist.

Wird diese Systematik der optimierten Auslegung nun auf die Erprobung übertragen, muss anhand der bestimmten „Referenzpunkte der dauerfesten Auslegung“ (Bild 7) ein Kompromiss für die Erprobung gefunden werden. Dieser Kompromiss ergibt sich dabei auf Basis jener kritischen Stelle, deren Kollektiv den höchsten individuellen Schädigungswert aufweist. Dadurch kann die Erprobung auf eine „Schwachstelle“ reduziert werden.

Wird dieses Verfahren zunächst vereinfacht und exemplarisch für die drei in Bild 5 gezeigten kritischen Stellen durchgeführt, so zeigt sich ein Prüfprofil (Bild 8), welches überwiegend dem bereits bekannten Profil (Bild 2) entspricht und dieses weiter validiert. Die Besonderheit hierbei ist jedoch, dass das Prüfprofil auf einen ausschlaggebenden Lastpunkt reduziert werden konnte und von „innen“ heraus entwickelt wurde.

An dieser Stelle gilt es aber anzumerken, dass für eine gesamtheitliche Systemerprobung das eben vorgestellte Verfahren für jegliche kritische Stelle des gesamten Antriebsstrangs durchgeführt werden muss, wobei sich anderweitige auslegungs- und erprobungsrelevante Betriebspunkte und Prüfdauern einstellen können, denen sich das im Beispiel gezeigte Erprobungsprofil unterordnen muss. Dabei gilt es aber gemäß des in Kapitel 3 vorgestellten Prozesses, das jeweilige Ausfallkriterium der Komponente zu bestimmen und mittels einer geeigneten Degradationsrechnung zu bewerten.

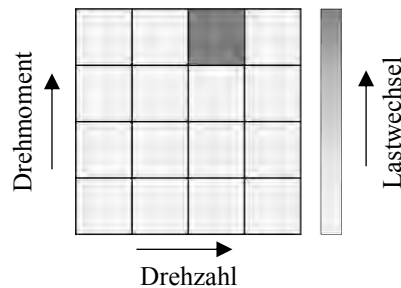


Bild 8: optimiertes Prüfprofil auf Basis drei kritischer Stellen im Kurbelgehäuse

5 Zusammenfassung & Ausblick

Die Überprüfung, Validierung und Optimierung vorhandener Zuverlässigkeitstest im Bereich der Antriebstrangentwicklung sind die Kerninhalte der vorliegenden Arbeit. Mit dem Ziel einer nachvollziehbaren und systematischen Zuverlässigkeitstestplanung wurde das Verfahren der simulativen Zuverlässigkeitsprognose verwendet und die Anwendbarkeit auf die vorliegende Fragestellung nachgewiesen. Basierend auf der Analyse des Kundennutzungsverhaltens werden aktuell bestehende Prüfprofile kritisch hinterfragt. Gezeigt wurde dabei, dass unterschiedliche kritische Stellen jeweils spezifisch auf die auftretende Belastung reagieren und dabei nicht immer bei dem im Prüfstand gefahrenen Betriebspunkt am höchsten belastet werden.

Durch die Adaption des vierstufigen simulativen Zuverlässigkeitsprozesses ist eine solche systematische Überprüfung bzw. auch Generierung neuer Erprobungsprofile möglich.

Eine Sensitivitätsanalyse der einzelnen Betriebspunkte führt auf den, pro untersuchter Stelle, individuell kritischsten Betriebspunkt. Durch die Kenntnis, wie die einzelnen Betriebspunkte im Feld gefahren werden, kann eine entsprechende „Schwachstelle“ gefunden werden, welche für eine Hardware-Erprobung herangezogen werden kann.

Im aufgezeigten Beispiel der Optimierung einer Kurbelgehäuse-Erprobung wurde gezeigt, dass sich das Verfahren auf mechanische Bauteile problemlos anwenden lässt. Soll ein solches Vorgehen für komplexere System angewendet werden, so sind für alle weiteren Bauteile zunächst analoge Herangehensweisen zu entwickeln, was mittels des hier vorgestellten Verfahrens möglich ist. Kern dabei ist die Identifikation des entsprechenden Degradationsverhaltens als auch der Aufbau einer effizienten Berechnungsmethode. Für jegliche mechanische Bauteile kann dabei das vorliegende Verfahren, welches die Degradation der Komponente auf Basis der Schadensakkumulation berücksichtigt, angewendet werden. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit für das Kurbelgehäuse vorgenommen und kann als Grundlage und Erfahrungsbericht für weitere, ähnliche Ansätze verwendet werden. Der hier vorgestellte Ansatz bietet folglich die Möglichkeit den Auslegungs- und Erprobungsprozess ausgehend von der digitalen Baustufe zu planen, wodurch die Testplanung unterstützt werden kann und nicht rein auf Erfahrungswissen basiert geplant werden muss.

Literatur

- | | |
|---------------------------|--|
| Bertsche und Lechner 2004 | BERTSCHE, Bernd ; LECHNER Gisbert: <i>Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau</i> . 3. Aufl. Berlin : Springer, 2004. |
| Božić et al. 2014 | BOŽIĆ, Ž. ; SCHMAUDER, S. ; MLIKOTA, M. ; HUMMEL, M.: <i>Multiscale fatigue crack growth modelling for welded stiffened panels</i> . In: <i>Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures</i> 37 (2014), Nr. 9, S. 1043–1054. |
| Denkmayr et al. 2003 | DENKMAYR, Klaus ; HICK, Hannes ; SAUERWEIN, Ulrich: <i>Die Load-Matrix</i> . In: <i>MTZ</i> 64 (2003), Nr. 11, S. 924–930. |
| Eder 2015 | EDER, Torsten: <i>Frontloading in der Antriebsstrangentwicklung</i> . In: <i>MTZ</i> 76 (2015), Nr. 9, S. 82. |

- Eder et al. 2016 EDER, Torsten ; LÜCKERT, Peter ; KEMMNER, Markus ; SASS, Heiko: *OM 654 - Start einer neuen Motorenfamilie bei Mercedes-Benz*. In: *MTZ* 77 (2016), Nr. 3, S. 62–69.
- Fatemi und Yang 1998 FATEMI, A ; YANG, L: *Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials*. In: *International Journal of Fatigue* 20 (1998), Nr. 1, S. 9–34.
- Friedrich 2017 FRIEDRICH, Horst E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 2. Aufl. Wiesbaden : Springer, 2017.
- Gorjian et al. 2009 GORJIAN, Nima ; MA, Lin ; MITTINTY, Murthy ; YARLAGADDA, Prasad ; SUN, Yong: A review on degradation models in reliability analysis. In: Kiritsis, Dimitris ; Emmanouilidis, Christos ; Koronios, Andy ; Mathew, Joseph (Hrsg.): *Engineering Asset Lifecycle Management : Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management*. London : Springer, 2009, S. 369–384.
- Jetter et al. 2017 JETTER, Stefan ; MÜLLER, Frank-Oliver ; WELLER, Ralph ; BERTSCHE, Bernd: Strength-Analysis of a crankcase with a multibody-simulation, Bd. 1. In: Bargende, Michael ; Reuss, Hans-Christian ; Wiedemann, Jochen (Hrsg.): *17. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*. Wiesbaden : Springer, 2017, S. 655–668.
- Jetter et al. 2016 JETTER, Stefan ; MÜLLER, Frank-Oliver ; WELLER, Ralph ; ZÖLLNER, Michael ; BERTSCHE, Bernd: Reliability-oriented simulation in the engine development process, Bd. 1. In: Bargende, Michael ; Reuss, Hans-Christian ; Wiedemann, Jochen (Hrsg.): *16. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*. Wiesbaden : Springer, 2016, S. 691–704.
- Köttermann et al. 2015 KÖTTERMANN, Thomas ; JACOBI, Andreas ; JORDAN, Christoph ; BRACKE, Stefan: Anwendung multivarianter Methoden auf automobile Daten zur lastbasierten Zuverlässigkeitsanalyse. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *27. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit 2015*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2015, S. 269–280. (VDI-Berichte 2260)
- Maisch 2007 MAISCH, Matthias: *Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2007.
- Mattetti et al. 2012 MATTETTI, Michele ; MOLARI, Giovanni ; SEDONI, Enrico: *Methodology for the realisation of accelerated structural tests on tractors*. In: *Biosystems Engineering* 113 (2012), Nr. 3, S. 266–271.
- Mutter 2015 MUTTER, Katrin: *Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2015.
- Schütz und Zenner 1973 SCHÜTZ, W. ; ZENNER, H.: *Schadensakkumulationshypothesen zur Lebensdauervorhersage bei schwingender Beanspruchung. Teil 1*. In: *Zeitschrift für Werkstofftechnik* 4 (1973), Nr. 1, S. 25–33.
- Weller 2016 WELLER, Ralph: *Digitale Systementwicklung moderner Pkw-Antriebe*. In: *MTZextra* 21 (2016), Nr. 2, S. 58.
- Xiong und Shenoii 2008 XIONG, J. J. ; SHENOI, R. A.: *A load history generation approach for full-scale accelerated fatigue tests*. In: *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008), Nr. 10, S. 3226–3243.

Bewertungswerkzeug zur effizienten Einbindung der Topologieoptimierung in den virtuellen Produktentwicklungsprozess

Daniel Billenstein, Christian Dinkel, Christian Glenk, Frank Rieg,

Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Bayreuth, Deutschland
daniel.billenstein@uni-bayreuth.de

Abstract: Die Globalisierung und die einhergehenden Auswirkungen zwingt Unternehmen zu einem beschleunigten Produktentwicklungsprozess. Die neuesten Optimierungsmethoden finden trotz ihres hohen Potentials zur Materialeinsparung aufgrund ihrer Komplexität häufig keinen Einsatz. Diese Komplexität ergibt sich zum einen aus den bereits in der Finite-Elemente-Analyse vorhandenen Einstellmöglichkeiten sowie zusätzlichen Optimierungsparametern, die ein hohes Fachwissen der Produktentwickler voraussetzen. Die häufig zur Unterstützung herangezogene Parameterstudie führt zu einer Vielzahl an Designvorschlägen, die bisher durch den Produktentwickler „per Hand“ visuell bewertet werden müssen. Das neukonzipierte Bewertungswerkzeug, welches die topologische Ähnlichkeit von Designvorschlägen computergestützt beurteilt, vereinfacht die systematische Untersuchung der Einflussparameter deutlich. Ergebnis sind die relevanten Grundtopologien aller Designvorschläge und zudem die zur jeweiligen Grundtopologie gehörenden Parameterbereiche. Die damit geschaffene Möglichkeit zur Automatisierung der Ergebnisauswertung erlaubt die bessere Integration der Optimierung in den virtuellen Produktentwicklungsprozess.

Keywords:

Topologieoptimierung, Bewertungswerkzeug, Topologievergleich, Grundtopologie

1 Einleitung

Angesichts der Globalisierung, einer daraus resultierenden Verschmelzung der Märkte sowie der zunehmenden Konkurrenz auf dem Weltmarkt, benötigen vor allem kleine und mittelständische Unternehmen eine kontinuierlich wachsende Innovationskraft (Frisch et al. 2016). Damit erhöht sich u. a. die Notwendigkeit, die Effizienz der Produktentwicklung zu steigern und die Herstellkosten von Produkten sowie Werkzeugen zu senken. Daneben zwingen die gesetzlichen Vorgaben zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes, die Verknappung der Rohstoffressourcen sowie die Forderung nach einem verantwortungsvollen Umgang mit Energie die Industrie, verstärkt auf Leichtbaukonzepte zu setzen. Damit geht die Notwendigkeit eines beschleunigten Produktentwicklungsprozesses (PEP) einher, um Produkte zu entwickeln, die die Konkurrenzfähigkeit und das angestrebte Wachstum sichern. (Ehrlenspiel et al. 2013; Dörnhöfer 2008)

1.1 Virtueller Produktentwicklungsprozess

Wie sich Anforderungen an Produkte verändern, so wandelt sich auch die Produktentwicklung im Laufe der Zeit. Heutzutage sind bei der Entwicklung von neuen innovativen Produkten computergestützte Systeme nicht mehr wegzudenken, sodass größtenteils nur noch vom virtuellen Produktentwicklungsprozess die Rede ist (Albers und Nowicki 2003).

Zuvor bestand die Entwicklung von Konstruktionselementen darin, die verschiedenen technischen Problemstellungen durch Abwandlungen und Anpassungen zu verbessern (Frisch 2015). Die dabei häufig auftretenden Fehlkonstruktionen konnten im Folgenden durch den gezielten Einsatz von computergestützten Hilfsmitteln beziehungsweise Werkzeugen schneller erkannt und ausgebessert werden. Diese Integration in die frühe Phase der Produktentwicklung führte zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit und einer Reduktion von Entwicklungskosten (Ehrlenspiel et al. 2013). Mit dieser Entwicklung einhergehend ist es notwendig, dass der Produktentwickler entsprechend fachlich

qualifiziert wird. Sowohl die Integration als auch die Weiterbildung sind gegenüber der Weiterentwicklung neuer Methoden, wie beispielsweise numerischer Optimierungsverfahren, in Rückstand geraten und finden daher aufgrund ihrer Komplexität häufig keinen Einsatz, wobei gerade diese Optimierungsarten ein sehr hohes Potential zur Materialeinsparung besitzen (Trampert et al. 2007). Insbesondere den bisherigen Konflikt, dass Analysewerkzeuge (z. B. Finite Elemente Analyse, FEA) oft erst nach Abschluss der Konzeptionsphase aufgrund der Verfügbarkeit von Simulationsdaten eingesetzt werden können und somit bei vertretbarem finanziellen und zeitlichen Aufwand nur noch wenig Einfluss auf die grundlegende Gestalt des Bauteils genommen werden kann, kann die Topologieoptimierung auflösen, da beispielsweise nur die Verhältnisse der auftretenden Kräfte, nicht aber deren Absolutwerte benötigt werden. Die Einführung solcher weiterführenden, numerischen Werkzeuge in den virtuellen Produktentwicklungsprozess (vgl. Bild 1) ist eine funktionale Erweiterung der Simulationswerkzeuge von der reinen Analyse zur Synthese, wodurch sich Konzeptentscheidungen nicht lediglich auf die Erfahrung des Konstrukteurs stützen (Dörnhöfer 2008).

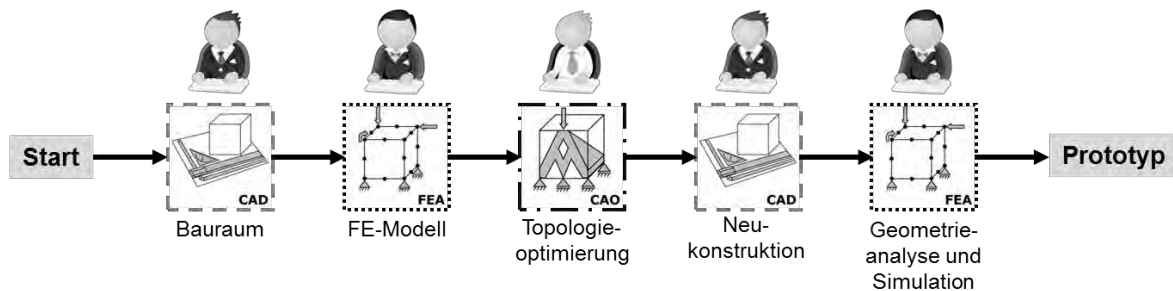


Bild 1: Virtueller Produktentwicklungsprozess (Frisch et al. 2016)

1.2 Topologieoptimierung

Der Ablauf einer dazu notwendigen Topologieoptimierung - als Teilgebiet der Strukturoptimierung - kann nach Eschenauer (1985) in das sogenannte Drei-Säulen-Konzept (vgl. Bild 2), bestehend aus Strukturanalyse, Optimierungsmodell und Optimierungsalgorithmus, aufgegliedert werden.

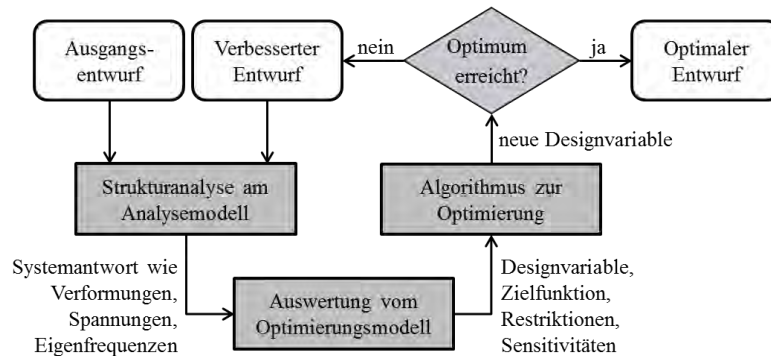


Bild 2: Drei-Säulen-Konzept nach Eschenauer (1985)

Die Strukturanalyse liefert dabei physikalische Ergebnisgrößen, wie etwa die maximalen Spannungen, Verschiebungen oder Verzerrungen, um daraus die Zielfunktionen und/oder Restriktionen des Optimierungsmodells zu ermitteln. Die aufgestellte Zielfunktion und deren Nebenbedingungen definieren das Optimierungsproblem, welches durch den Optimierungsalgorithmus iterativ gelöst wird, bis aus dem Ausgangsentwurf ein optimaler Entwurf erzeugt wurde (Hilchenbach 2010). Basis dieser materiellen Topologieoptimierung ist ein Materialverteilungsproblem. Das im Bauraum vorhandene Material soll auf einen definierten Anteil reduziert und abgeleitet von bionischen Prinzipien verteilt werden, so dass die Bauteilsteifigkeit des resultierenden Designvorschlags maximiert wird (Dörnhöfer 2008; Harzheim 2014). Dabei ist es das Ziel, die finiten Elemente - die sogenannten Designvariablen - so zu entfernen und zu verändern, dass eine 0-1-Struktur entsteht. Das bedeutet, es wird ein optimiertes FE-Modell erstellt, welches Loch-Bereiche (0; finites Element hat

das Elastizitätsmodul $1 N/mm^2$) oder feststehende Bereiche mit Material (1; finites Element hat das Elastizitätsmodul des gewünschten Materials) enthält (Harzheim 2014). Dieser Optimierungsprozess und die resultierende 0-1-Struktur ist exemplarisch in Bild 3 an einem Fahrwerksumlenker (Frisch 2015) dargestellt.

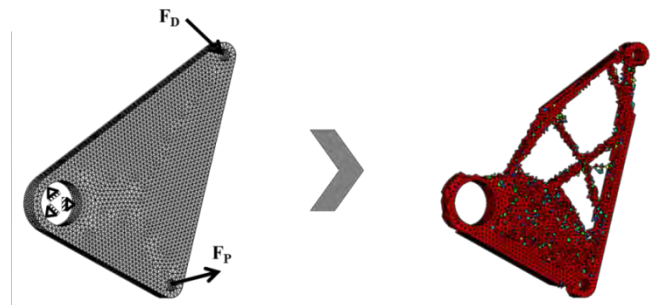


Bild 3: Bauraummodell (links) und Designvorschlag (rechts) eines Fahrwerksumlenkers nach Frisch (2015)

2 Identifikation von relevanten Einflussparametern

Neben der notwendigen Glättung der zerklüfteten Struktur ist die systemimmanent vorhandene Vielzahl an Optimierungsparametern, wie beispielsweise der Optimierungsalgorithmus, Straffaktor, usw., und deren Einflüsse auf die Designvorschläge eine Hürde für die vollständige Automatisierung des virtuellen Optimierungsprozesses (Schumacher 2013). Die aus der Vielzahl an Optimierungsparametern resultierende Komplexität des Simulationsverfahrens wird durch die bereits in der FEA vorhandenen Einstellmöglichkeiten (Randbedingungen, Netzparameter, Gleichungslöser, usw.) verstärkt und führt zu einer Vielfalt von Designvorschlägen, welche allesamt durch den Produktentwickler kritisch beurteilt werden müssen (Rieg et al. 2014). Beispielhaft hierfür ist in Tabelle 1 der Einfluss der Netzfeinheit auf das Optimierungsergebnis eines Balkens im 3-Punkt-Biegeversuch dargestellt.

Tabelle 1: Einfluss der Netzfeinheit eines Balkens (3-Punkt-Biegeversuch) auf das Optimierungsergebnis (Frisch 2015)

Variante	Anzahl Freiheitsgrade	Designvorschlag
1	930	
2	2024	
3	5400	
4	28800	
5	59520	
6	116250	

Die daher in der FEA häufig eingesetzte Parameterstudie hilft dem Konstrukteur die relevanten Parameter durch eine gezielte Variation der Eingangsgrößen und deren Auswirkung auf zuvor definierte Kennzahlen zu identifizieren (Gebhardt 2014). Die dabei durchgeführte Variation der oben genannten FE- und Optimierungsparameter führt jedoch zu einer Vervielfältigung der Designvorschläge. Die visuelle Beurteilung durch den Produktentwickler ist bei der Vielzahl an Optimierungsergebnissen nur mit sehr hohem Aufwand "per Hand" verarbeitbar. Dies hat zur Folge, dass die Topologieoptimierung und die systematische Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren in der Praxis nicht wirtschaftlich angewendet werden kann. Der fehleranfällige und kostenintensive Prozessschritt der Ergebnisauswertung sollte daher computergestützt und automatisiert erfolgen, sodass der Produktentwickler lediglich die aufgetretenen Grundtopologien erhält und diese vergleichend gegenüberstellen kann.

3 Computergestützte Bewertung von Designvorschlägen

Unter Berücksichtigung, dass der Designvorschlag nicht zu 100 % der am Ende fertigen Bauteilgeometrie entspricht, lassen sich bei der Betrachtung der diversen Optimierungsergebnisse Ähnlichkeiten in der Topologie (vgl. Tabelle 1: Variante 1-2; Variante 3-4) erkennen. Die Beurteilung anhand eines globalen Parameters (bspw. der maximalen Durchbiegung), wie sie etwa in der FEA häufig eingesetzt wird, ist innerhalb der Topologieoptimierung schwierig zu definieren, da die resultierenden Designvorschläge durch eine lokal aufgelöste 0-1-Struktur abgebildet werden (Dörnhöfer 2008). Bei der Zusammenfassung der lokalen Strukturinformationen zu einem globalen Wert, wie beispielsweise der Gesamtnachgiebigkeit, würde ein erheblicher Informationsverlust einhergehen. So ist es durchaus möglich, dass die gleiche Gesamtnachgiebigkeit durch unterschiedliche Designvorschläge generiert wird. Die Vergleichbarkeit von Designvorschlägen kann daher nicht auf Basis eines Wertes, sondern muss bisher visuell durch den Produktentwickler erfolgen.

3.1 Bewertungsalgorithmus

Für die computergestützte vergleichende Bewertung von Designvorschlägen muss aus diesem Grund eine lokal aufgelöste Betrachtung der Designvariable herangezogen werden. Der hierfür neukonzipierte Bewertungsalgorithmus (vgl. Bild 4) soll anhand eines abstrakten Beispiels erläutert werden, bei dem die beiden Designvorschläge A und B (DVA und DVB) aufgrund einer unterschiedlichen Vernetzung resultieren.

Der Algorithmus ermittelt für jedes finite Element des Designvorschlags A den Sollwert der Designvariable und vergleicht ihn mit dem Istwert - in dem Beispiel ist dies exemplarisch für das rechte obere finite Element des DVA mit einem Istwert von 1,0 gezeigt.

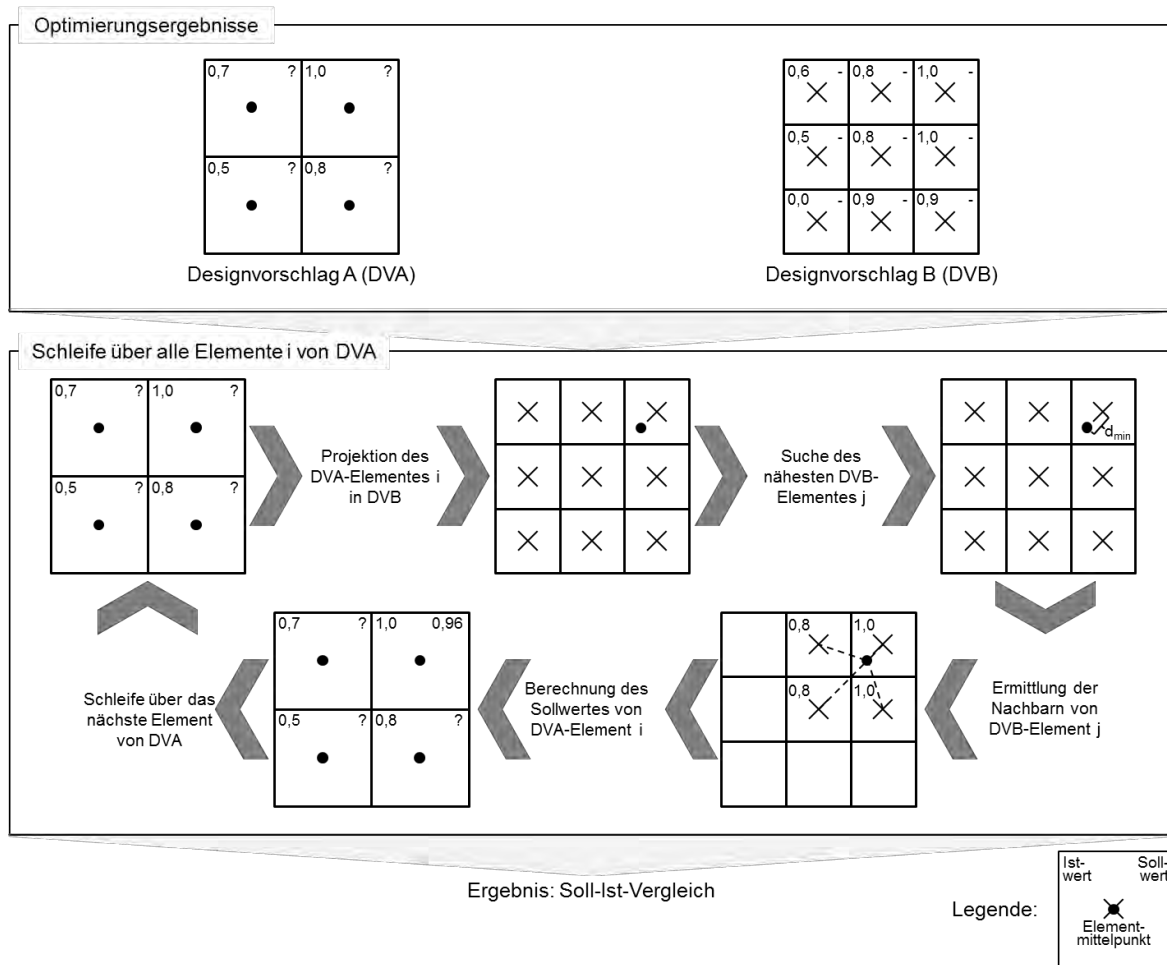


Bild 4: Vergleichender Bewertungsalgorithmus von Designvorschlag A und B

In einem ersten Schritt wird der Mittelpunkt des finiten Elementes (•) von DVA zunächst in den Designvorschlag B transformiert und dort das nächste (d_{min}) finite Element aus B gesucht. Die zu diesem Element gehörenden Nachbarn werden dann zur Bestimmung des Sollwertes herangezogen. Die dabei beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Vernetzungen notwendige Interpolation zwischen den Designvariablen von B basiert auf der inversen Distanzgewichtung (inverse distance weighting). Das nichtstatistische lokale Verfahren beruht auf dem Prinzip der räumlichen Korrelation, das heißt dass die Ähnlichkeit des unbekanntes Wertes v zu den bekannten Werten v_j mit dem jeweiligen euklidischen Abstand d_j von diesem abnimmt (Kalkhan 2011; Bartelme 2005):

$$v = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j^m} v_j}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j^m}} \tag{1}$$

Der Exponent m dient hier der Steuerung der Gewichtung des Abstandes:

- $m = 0$: Gewichtung entspricht dem arithmetischen Mittel der Werte
- $m > 0$: Gewichtung entspricht den inversen Distanzen mit geringer werdendem Einfluss weiter entfernter Werte bei steigendem m

Der Einfluss des Exponenten auf die computergestützte Bewertung von Designvorschlägen wird im Weiteren an einem Praxisbeispiel untersucht. In der Geostatistik wird üblicherweise ein Exponentwert von 2 veranschlagt. Der Einfluss des Exponenten ist zudem im vorliegenden Fall sehr gering, da ohnehin lediglich benachbarte - also räumlich zusammenliegende - finite Elemente in die Berechnung

einbezogen werden. Somit liegt bereits ein lokales Interpolationsverfahren vor, welches weit entfernte Werte nicht berücksichtigt.

3.2 Ergebnisbewertung

Aus dem dementsprechend berechneten Sollwert (hier: 0,96) für die Designvariable eines Elementes kann ein Soll-Ist-Vergleich erfolgen, der die Abweichung im Vergleich zu dem anderen Designvorschlag aufzeigt. Die Ähnlichkeit zweier Designvorschläge kann infolgedessen mit einem kumulierten Histogramm abgebildet werden, welches die relative Häufigkeit an finiten Elementen (Ordinate) für jede Klasse des absoluten Soll-Ist-Vergleiches (Abszisse) darstellt. Das in Bild 5 gezeigte untere Histogramm bestätigt beispielsweise die starke Ähnlichkeit beider Designvorschläge, da etwa 90 % der finiten Elemente eine kleinere Abweichung als 0,2 zu ihrem Sollwert aufweisen. Auf der anderen Seite zeigt das obere Beispiel zwei sich stärker unterscheidende Topologien und das zugehörige Histogramm. Darin weisen nahezu 50 % der Elemente eine Abweichung von mehr als 0,8 auf.

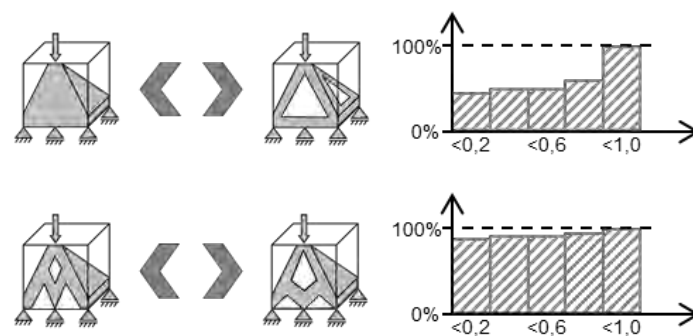


Bild 5: Kumulierte Histogramme als topologisches Vergleichsergebnis jeweils zweier Designvorschläge

Die Histogramme erlauben somit eine Aussage, wie stark sich zwei Designvorschläge topologisch ähneln. Werden diese Histogramme nun dem Prozess einer Parameterstudie zugeführt, erlauben sie eine Aussage, welcher Wertebereich der jeweiligen Optimierungsparameter keinen Einfluss auf den Designvorschlag hat und folglich bildet die inverse Menge der untersuchten Parameter die relevanten Einflussfaktoren. Somit kann sowohl der visuelle Vergleich als auch das Ergebnis computergestützt erstellt und weiterverarbeitet werden, sodass eine Automatisierung des aufwändigen Prozesses realisiert werden kann.

4 Fallbeispiel: Fahrwerksumlenker

Die Anwendung des topologischen Bewertungswerkzeuges und die damit verbundene Automatisierung von Parameteranalysen soll am Beispiel des Fahrwerksumlenkers eines Formula Student Rennwagens aus Bild 3 gezeigt werden. Die gewählten Simulationsparameter können Frisch (2015) entnommen werden. Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist die Ermittlung des Einflusses des Straf- bzw. Penaltyfaktors p auf den resultierenden Designvorschlag. Dieser Parameter bildet in der Topologieoptimierung beim SIMP-Verfahren (Solid Isotropic Material with Penalization) den Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul eines finiten Elements ($E_e = E_{min} \dots E_{max}$ mit $E_{min} = 1 \text{ N/mm}^2$) und seiner Designvariable ($x_e = 0 \dots 1$) (Sigmund 2001).

$$E_e = E_{min} + x_e^p \cdot (E_{max} - E_{min}) \quad (2)$$



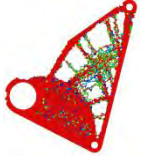
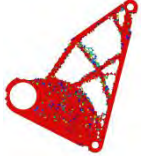


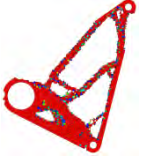

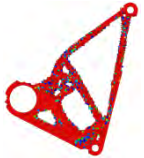
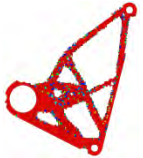
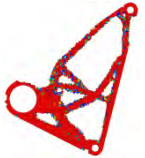



Dadurch soll eine scharfe 0-1-Verteilung der Designvariablen erreicht werden, damit möglichst wenig finite Elemente eine mittlere Steifigkeit erhalten, da sonst nicht bestimmt werden kann, ob diese Elemente entfernt werden dürfen. Gleichzeitig sollte der Straffaktor etwa innerhalb des Wertebereichs $p = 1,0 \dots 20,0$ liegen, damit ein physikalisches Materialmodell vorliegt (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Empfehlungswerte aus der Literatur für den Straffaktor p bei einer Querkontraktion von 0,27

Empfehlung	Literaturangabe
$p \geq 3,0$	Harzheim 2014
$p \geq 2,4$	Bendsoe und Sigmund 2013
$p = 2,0 \dots 4,0$	Rieg 2016

Auf Basis des computergestützten, topologischen Bewertungswerkzeuges für zwei Designvorschläge ist es möglich, eine systematische Variation des Straffaktors (Wertebereich 1,0 ... 20,0 mit einem Inkrement von 0,1) durchzuführen und statt 191 einzelner Designvorschläge lediglich die relevanten Grundtopologien der Designvorschläge zu erhalten. Hierzu wird automatisiert jeder Designvorschlag gegen jeden anderen topologisch auf Ähnlichkeit überprüft und bei ausreichend großer Übereinstimmung zusammengefasst. Die so für den Straffaktor durchgeführte Analyse und die anschließende topologische Bewertung lieferte aus den 191 resultierenden Designvorschlägen 14 Grundtopologie-Varianten mit den zugehörigen Sensitivitätsbereichen (vgl. Tabelle 3).







Tabelle 3: Grundtopologie-Varianten und zugehörige Sensitivitätsbereiche des Parameters $p = 1,0 \dots 20,0$ für einen Fahrwerksumlenker

Variante 1 $p = 1,0 \dots 1,4$ 	Variante 2 $p = 1,5 \dots 1,9$ 	Variante 3 $p = 2,0 \dots 2,8$ 	Variante 4 $p = 2,9 \dots 3,6$ 	Variante 5 $p = 3,7 \dots 4,2$ 	Variante 6 $p = 4,3 \dots 5,0$ 	Variante 7 $p = 5,1 \dots 5,3$ 
Variante 8 $p = 5,4 \dots 5,8$ 	Variante 9 $p = 5,9 \dots 6,1$ 	Variante 10 $p = 6,2 \dots 6,7$ 	Variante 11 $p = 6,8 \dots 6,9$ 	Variante 12 $p = 7,0 \dots 8,2$ 	Variante 13 $p = 8,3 \dots 11,7$ 	Variante 14 $p = 11,8 \dots 20,0$ 

Die Auswertung wurde mehrfach mit unterschiedlichen Werten für den Exponenten m aus Gleichung (1) durchgeführt und ergab stets das gleiche Ergebnis. Aus diesem Grund wird im Weiteren der in der Geostatistik üblicherweise veranschlagte Exponentwert von $m = 2$ angenommen, der auch bei Untersuchungen mit unterschiedlichen Diskretisierungen eine gute Annäherung der Datenlage aufwies.

Werden die im empfohlenen Wertebereich $p \approx 2,0 \dots 4,0$ liegenden Grundtopologie-Varianten betrachtet, kann die Anzahl von ursprünglich 21 Designvorschlägen computergestützt auf 3 Varianten (Nr. 3, 4 und 5 aus Tabelle 3) reduziert werden. Die zu einer Grundtopologie zusammengefassten Designvorschläge sind exemplarisch für Variante Nr. 5 in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Designvorschläge der Grundtopologie-Variante Nr. 5 aus Tabelle 3

Variante 5					
$p = 3,7$	$p = 3,8$	$p = 3,9$	$p = 4,0$	$p = 4,1$	$p = 4,2$
					

Die ähnliche Ergebnisstruktur zeigt sich insbesondere dadurch, dass lediglich an den Übergängen zwischen Loch-Bereich und feststehendem Bereich Abweichungen herrschen. Somit variiert nur die

Breite der ausgebildeten Stege, wodurch allerdings die Grundtopologie der Designvorschläge nicht beeinflusst wird.

Aufgrund zahlreicher Untersuchungen und in Anbetracht des in Tabelle 4 gezeigten Beispiels ist die hier getroffene Annahme, dass eine praxistaugliche Ähnlichkeit erreicht ist, sofern 90 % der finiten Elemente eine kleinere Abweichung als 0,2 zu ihrem Sollwert aufweisen, berechtigt.

Dieses Fallbeispiel zeigt die Leistungsfähigkeit des neukonzipierten Bewertungsalgorithmus und die einhergehende Automatisierbarkeit der Ergebnisauswertung, welche dem Produktentwickler den visuellen topologischen Vergleich vieler Designvorschläge erspart.

5 Fazit

Die im virtuellen PEP integrierte Topologieoptimierung unterstützt den Produktentwickler mit einem Designvorschlag. Die hierbei einstellbaren Parameter verlangen jedoch ein hohes Expertenwissen sowohl auf Seiten der Optimierung als auch der FEA. Die oftmals zur Unterstützung herangezogene Parameterstudie und die damit verbundene Variation der interessierenden Einstellmöglichkeiten führt zu einer Vielzahl an Designvorschlägen und benötigt bisher im Bereich der Topologieoptimierung einen visuellen Vergleich der Designvorschläge durch den Produktentwickler. Das entwickelte Bewertungswerkzeug, welches die topologische Ähnlichkeit von Designvorschlägen computergestützt beurteilt, vereinfacht die systematische Untersuchung der Einflussparameter deutlich. Ergebnis sind die relevanten Grundtopologien aller Designvorschläge und zudem die zur jeweiligen Grundtopologie gehörenden Parameterbereiche (vgl. Bild 6).

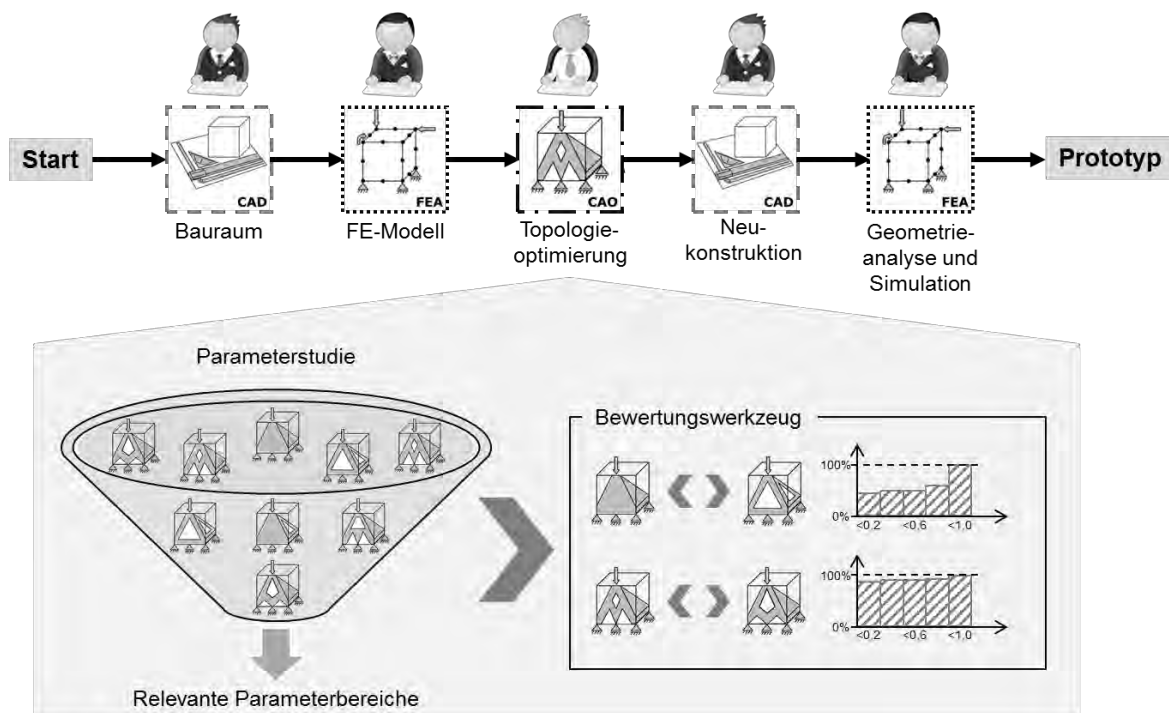


Bild 6: Virtueller Produktentwicklungsprozess mit integrierter topologischer Bewertung von Designvorschlägen

Dies erlaubt zum einen ein tieferes Simulations- und Produktverständnis des Konstrukteurs und zum anderen die bessere Integration der Optimierung in den virtuellen Produktentwicklungsprozess.

Literatur

- Albers und Nowicki 2003 ALBERS, Albert; NOWICKI, Lukas: Symposium "Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung". *Integration der Simulation in die Produktentwicklung – Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität und Effizienz in der Produktentwicklung*. Bremen, 2003, S. 141-147.
- Bartelme 2005 BARTELME, Norbert: *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen*. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2005.
- Bendsoe und Sigmund 2013 BENDSOE, Martin Philip; SIGMUND, Ole: *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2013.
- Dörnhöfer 2008 DÖRNHÖFER, Andreas: *Leichtbau mit partikelverstärkten Magnesiumlegierungen: Integration von virtueller Werkstoffentwicklung und Topologieoptimierung in den Produktentwicklungsprozess*. Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Dissertation, 2008.
- Ehrlenspiel et al. 2013 EHRENSPIEL, Klaus; KIEWERT, Alfons; LINDEMANN, Udo; MÖRTL, Markus: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2013.
- Eschenauer 1985 ESCHENAUER, Hans: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): *Rechnerische und experimentelle Untersuchungen zur Strukturoptimierung von Bauteilen*. Univ.-Gesamthochschule Siegen, 1985.
- Frisch 2015 FRISCH, Michael: *Entwicklung eines Hybridalgorithmus zur steifigkeits- und spannungsoptimierten Auslegung von Konstruktionselementen*. Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Dissertation, 2015.
- Frisch et al. 2016 FRISCH, Michael; GLENK, Christian; DÖRNHÖFER, Andreas; RIEG, Frank: *Topologieoptimierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen – Von der erfahrungsbasierten Konstruktion zum Einsatz der Topologieoptimierung im Produktentwicklungsprozess*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (2016), Nr. 111, S. 243-246.
- Gebhardt 2014 GEBHARDT, Christof: *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik*. 2. Aufl. München: Hanser, 2014.
- Harzheim 2014 HARZHEIM, Lothar: *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen*. 2. Aufl. Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2014.
- Hilchenbach 2010 HILCHENBACH, Carl Frederic: *Optimierung von Mehrphasenströmungen mit lokalem Schädigungsverhalten*. Universität Stuttgart, Institut für Baustatik und Baudynamik, Dissertation, 2010.
- Kalkhan 2011 KALKHAN, Mohammed: *Spatial Statistics: GeoSpatial Information Modeling and Thematic Mapping*. 1. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- Rieg 2016 RIEG, Frank: *Z88Arion: Theorie, Benutzerhandbuch, Beispiele*. http://download.z88.de/z88arion/V1/z88arion_install_win_de.pdf. – Zugriffsdatum: 15.12.2016.
- Rieg et al. 2014 RIEG, Frank; HACKENSCHMIDT, Reinhard; ALBER-LAUKANT, Bettina: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure: Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora*. 5. Aufl. München: Hanser, 2014.
- Schumacher 2013 SCHUMACHER, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2013.

Effiziente Entwicklung von prozessoptimalen Druckgussbauteilen durch Kombination von Topologieoptimierung und Prozesssimulation

Stefan Hautsch¹, Florian Heilmeier², Frank Rieg¹, Wolfram Volk²

¹Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Bayreuth, Deutschland
stefan.hautsch@uni-bayreuth.de

²Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, München, Deutschland
florian.heilmeier@utg.de

Abstract: Die Generierung von produkt- und prozessoptimalen Druckgussbauteilen durch eine Topologieoptimierung verspricht eine Effizienzsteigerung im Produktentwicklungsprozess, gepaart mit einer Verbesserung der Produkteigenschaften durch Formleichtbau und einer Steigerung der Prozesssicherheit. Dieses Vorgehen verlangt auf Grund der besonderen Eigenschaften der Restriktionen des Gießprozesses nach einer Koppelung von Topologieoptimierung und Prozesssimulation. Hierbei wird der Designvorschlag aus einer ersten Optimierung durch einen einzelnen Prozesssimulationsdurchlauf in Kombination mit einer schnellen geometrischen Bauteilanalyse untersucht, um Bereiche mit schlechter Füllqualität zu identifizieren. Diese Bauteilbereiche werden für einen zweiten Optimierungslauf aus dem Bauraum entfernt, wodurch das neue Ergebnis der Topologieoptimierung nicht nur ein produkt-, sondern auch prozessgerechtes Design aufweist. Das neu entwickelte Vorgehen wird an einem Anwendungsbeispiel erläutert und zeigt hier eine deutliche Reduktion der prozesskritischen Bauteilzellen bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand.

Keywords:

Druckguss, Prozesssimulation, Topologieoptimierung, prozessoptimal

1 Motivation

Um im nationalen und internationalen Wettbewerb zu bestehen, müssen sich Unternehmen neben einem technologischen auch einen zeitlichen Vorteil erarbeiten. Der Zielkonflikt der schnellen Markteinführung gegenüber der fehlerfreien Produktauslegung prägt daher die heutige Produktentwicklung. Zusätzlich drängt eine optimale Prozessauslegung zur Sicherstellung der Qualität, Senkung der Herstellungskosten und Verringerung von Ausschuss. Genau hier liegen große Potentiale in der virtuellen Produktentwicklung, die durch eine geschickte Kombination von Simulationstechniken eine effiziente, rechnergestützte Generierung von prozess- und funktionsoptimalen Bauteilen ermöglicht.

2 Ansatz für eine prozessgerechte Topologieoptimierung

Abseits von Neukonstruktionen können durch die Anwendung virtueller Entwicklungswerkzeuge (also Simulations- und Optimierungstools) auch bestehende Bauteile – z. B. unter Änderung des Fertigungsverfahrens – hin zu leichteren Strukturen bei gleicher Funktion anforderungsgerecht entwickelt werden. Hier hat sich in den letzten Jahren die Strukturoptimierung bzw. deren Unter Methode der Topologieoptimierung etabliert, welche in einem vorgegebenen Bauraum die optimale Materialverteilung unter Einhaltung von Restriktionen generiert. So kann computergestützt eine Konzeption bzw. ein Entwurf des Produkts erstellt werden, welcher neben den gewünschten Produkteigenschaften möglichst wenig Material und dadurch wenig Gewicht benötigt. Die Betrachtung bzw. Einhaltung von Prozessrestriktionen während dieser frühen Phase der Produktentwicklung reduziert Fehler und damit spätere Kosten durch ressourcenintensive Änderungsschleifen.

Für die Erzeugung prozessgerechter Bauteile sind die grundlegenden Prozessrestriktionen des Fertigungsprozesses in eine Topologieoptimierung zu integrieren. Dies wird nach Brunhuber (1991), Bührig-Polaczek et al. (2014) und Roller (2001) für den Prozess Druckguss jedoch durch den Charakter der Restriktionen verhindert, welche entweder abhängig vom Maschinentyp (z. B. der maximalen Zuhaltekraft) oder von empirischer Natur (z. B. die angestrebte Gießzeit) sind und erst mit der endgültigen Bauteilgeometrie berechenbar werden (z. B. Anschnittquerschnitt) oder nur simulativ zu ermitteln sind (z. B. Lufteintrag in die Schmelze). Folglich können diese Restriktionen nicht ohne weiteres mathematisch formuliert und in einen Algorithmus integriert werden.

Als Alternative können die Ergebnisse einer Gießsimulation als zusätzliches Bewertungskriterium für eine Topologieoptimierung genutzt werden, z. B. im Rahmen einer Mehrzieloptimierung oder als Filterung der finiten Elemente nach deren Relevanz für die Formfüllung. Hierfür müsste allerdings zu jedem Iterationsschritt der Optimierung (üblicherweise sind dies 15 bis maximal 50 Iterationen) eine Prozesssimulation durchgeführt werden. Diese vielen sequentiell durchgeführten Rechnungen würden sich auf eine Gesamtrechnzeit von mehreren Wochen kumulieren. Da eine solche Dauer für eine effiziente Produktentwicklung in der Industrie nicht tragbar ist, wird in dieser Arbeit ein schnellerer Ansatz vorgeschlagen.

Dieser besteht aus der Kombination von wissensbasierten Produkt- und Prozesssimulationen. Dies sind zum Beispiel optimale Parameter für die Optimierungsalgorithmen oder Gestaltungs- und Konstruktionsregeln für den Druckguss (vgl. Feldhusen et al. 2013 bzw. Rieg und Steinhilper 2012). Dieser wissensbasierte Ansatz ist für die Produktsimulation (Hautsch et al. 2016) sowie für die prozessgerechte Optimierung von Tiefziehteilen (Hautsch et al. 2015) bereits bekannt und soll nun für den Druckguss mit der Prozesssimulation kombiniert werden. Weitere Restriktionen für die Topologieoptimierung, wie z. B. geometrische Schranken, Symmetrien, Vermeidung von Lochbildung bzw. Hinterschneidungen oder Begrenzungen der zu generierenden Strukturgrößen – wie sie in kommerziellen Optimierungstools bereits verfügbar sind – werden in Kombination mit der selektiven Wissensbereitstellung gewinnbringend angewandt.

Zur Erzeugung eines optimalen Druckgussbauteils (Zielfunktional: minimale Nachgiebigkeit bei vorgegebener Volumenreduktion) ausgehend von einem bekannten Bauraum sind mehrere Schritte durchzuführen. Der Bauraum muss konstruiert und in das Optimierungssystem importiert werden. Dort sind passende Parameter sowohl für das Finite-Elemente- (FE-) Netz als auch die Optimierungsalgorithmen zu wählen. Im Speziellen ist die Feinheit des Rechnetzes der Finite-Elemente-Analyse adäquat einzustellen, so dass sowohl eine ausreichende Ergebnisgüte als auch die Anwendbarkeit von Fertigungsrestriktionen gegeben sind. Andererseits soll ein erhöhter Berechnungsaufwand durch zu feine Vernetzung vermieden werden. Zielfunktion, Restriktionen und weitere Parameter der Optimierungsalgorithmen sind sinnvoll einzustellen, um eine Topologieoptimierung effizient durchzuführen. Um nun ein dünnwandiges Bauteil mit Hilfe der Topologieoptimierung zu generieren, ist z. B. eine Kombination von Restriktionen wie „Maximum Member Size“ (maximale Strukturgröße) und „Demold“ (Entformung) zielführend, welche jedoch nur mit optimaler Einstellung der Parameter sinnvolle Ergebnisse liefern. Ist dies gelungen, versucht der Algorithmus dann bereits eine dünnwandige Struktur als Designvorschlag zu erzeugen, welchen der Produktentwickler dann in einer Neukonstruktion bzw. Anpassung des Bauraums zu einem fertigen Druckgussbauteil formen muss. Neben den Einstellungen der Optimierungssoftware sind hierbei, z. B. nach Feldhusen et al. (2013), auch die Gestaltungsrichtlinien bzw. Prozessrestriktionen für das Guss- bzw. Druckgussverfahren zu beachten. Dies kann – falls vorgesehen – situativ passend aus der Wissensbasis abgerufen werden.

Dazu kommt Prozesswissen aus einem einzelnen Simulationslauf, welcher nicht je Iteration der Optimierung, sondern einmalig nach der erfolgten, ersten Topologieoptimierung durchgeführt wird. Mit den dort erzeugten Ergebnissen werden die Bauteilzellen nach deren Einfluss auf eine gute Füllung bewertet und somit die Anpassung des Ausgangs-Bauraum-Modells der Topologieoptimierung ermöglicht. Die Prozesssimulation entspricht einer Gieß- bzw. Füllsimulation, welche die zu erwartenden Fließlängen der Schmelze zur Verfügung stellt. Mit einer zusätzlichen Geometrieanalyse auf Basis eines *shortest path* (*sp*)-Algorithmus (Heilmeier et al. 2016) wird eine Bewertung der Fließlängen und deren Einfluss auf die Bauteilqualität für jeden Iterationsschritt möglich. Dazu wird der Ausgabewert der Gießsimulation *distance travelled by fluid* (*dtbf*, dt. Fließlänge) mit den kürzest möglichen Fließlängen aus der *sp*-Analyse zum Kennwert *dtbf/sp* kombiniert. Dieser dient der

Abschätzung der Füllqualität und somit zur Bewertung von Bauteilzellen und deren Relevanz für den Druckgießprozess. Zellen mit überhöhten Werten weisen – gemessen an der Entfernung zum Anschnitt – viel zu lange Fließwege auf. Diese haben damit voraussichtlich eine schlechte Gießqualität zur Folge und sind im Bauteil unerwünscht (Nogowizin, 2011).

Wird das nachkonstruierte Ergebnis einer Topologieoptimierung nun nach dtbf/sp bewertet und alle Zellen mit Werten über dem Grenzwert zusammengefasst, ergibt sich ein negatives Volumen, welches aus dem Ausgangsbauraum entfernt werden kann. Somit werden Zellen mit potenziell nachteiligem Einfluss auf die Bauteilqualität aus einem erneuten Optimierungslauf mit dem neuen Bauraum ausgeschlossen. Um die Komplexität dieses Volumens zu reduzieren, werden einfache geometrische Formen erzeugt, deren Stützstellen markanten Punkten aus ein- oder mehreren Schnitten durch die dtbf/sp-Ergebnispunktwolke entsprechen. Dadurch kann das negative Volumen zur Anpassung des Bauraums in der Konstruktionsumgebung schnell und unkompliziert generiert werden.

Eine zweite Topologieoptimierungsschleife generiert auf Basis des angepassten Bauraums einen neuen Designvorschlag, der in einer nachfolgenden dtbf/sp-Analyse – welche lediglich der Kontrolle der Ergebnisse dient – in der Gesamtheit aller Bauteilpunkte bedeutend niedrigere Werte aufweist. Dies kann mit jeweils einem Durchlauf der Prozesssimulation und einer zusätzlichen Topologieoptimierung erreicht werden.

Zur Demonstration des erarbeiteten, effizienten Workflows dient die folgende Variantenentwicklung eines KFZ-Querlenkers.

3 Anwendungsbeispiel

Die Entwicklungsabteilung eines Fahrzeugherstellers bekommt die Aufgabe, ein sportliches Derivat auf der konzerneigenen Kompaktwagen-Plattformbasis zu entwerfen. Um die Beschleunigung des Fahrzeuges zu optimieren, soll mit Hilfe von Leichtbau Gewicht eingespart werden. Da gleichzeitig das Handling verbessert werden soll, bietet es sich an, auch am Fahrwerk Masse einzusparen. Nach Analyse der vorhandenen Komponenten im Baukasten wird entschieden, eine Alternative zum Stahlguss-Querlenker der Vorderachse zu entwickeln, welcher mit rund 4,6 kg pro Seite vergleichsweise schwer ausfällt.

Es soll nun mit den bekannten Randbedingungen des bestehenden Serienbauteils und dem zur Verfügung stehenden Bauraum (z. B. aus virtuellen Kollisionsuntersuchungen oder realen Messungen, vgl. Bild 1) eine Neukonzeption mit dem Ziel des Leichtbaus erfolgen. Dies geschieht nicht nur durch Formleichtbau, sondern auch unter Einbezug des Stoffleichtbaus. Um eine möglichst große Gewichtseinsparung in Verbindung mit dem Einsatz von Leichtmetall zu erzielen, wurde in diesem Fall das Fertigungsverfahren Druckguss ausgewählt.

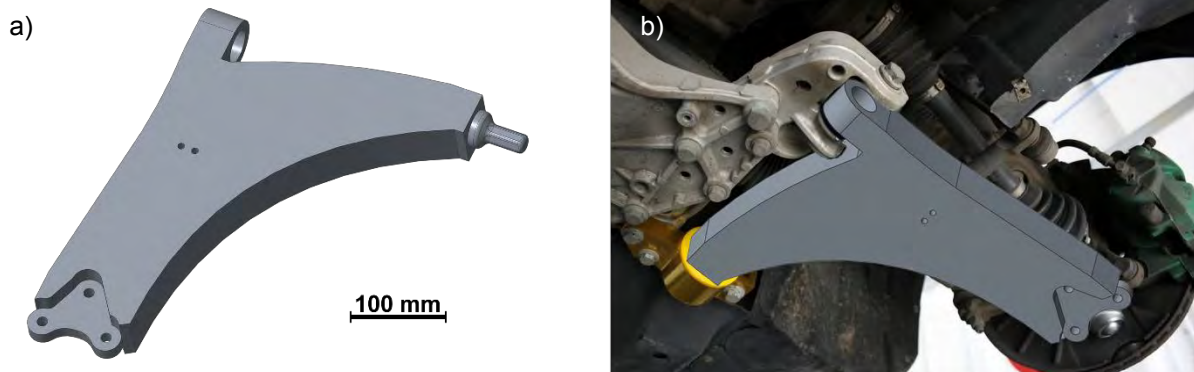


Bild 1: a) CAD-Modell des Querlenker-Bauraums und b) Montage im Fahrzeug

Um die Strukturoptimierung effizient und fehlerfrei einsetzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die verwendeten Algorithmen und Verfahren notwendig. Diese können zur Vermeidung von Fehlern und zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Konstruktions- und Simulationsqualität mit Hilfe eines Wissensmanagementsystems bereitgestellt werden, um z. B. die passenden Parameter auszuwählen oder eine optimale Vernetzung für die Topologieoptimierung zu erzeugen. Weiterhin

können dadurch bei der Konstruktion des Bauraums und der Nachkonstruktion des Optimierungsergebnisses die Gestaltungsregeln für eine prozessoptimale Auslegung einfließen.

3.1 Erste Optimierungsschleife

Bei der Topologieoptimierung eines Bauteils ist die Betrachtung der relevanten Lastfälle essentiell. Diese wurden im Falle des Querlenkers exemplarisch wie folgt identifiziert: maximale Betriebslastfälle wie extreme Beschleunigung in positive und negative Richtung (Anfahrt und Bremsen) sowie extreme Kurvenfahrt bei kurveninnerem Rad und kurvenäußerem Rad. Zusätzlich findet ein Missbrauchslastfall mit dem Durchfahren eines Schlaglochs Berücksichtigung. Weitere Lastfälle wurden zur Reduktion des Aufwands nicht berechnet, da diese bei identischen Lastrichtungen geringere Lastbeträge im Vergleich zu den genannten Lastfällen aufweisen. Würden relevante Lastfälle bei der Optimierung nicht berücksichtigt, könnte das Bauteil im praktischen Einsatz bei genau dieser Belastung versagen. Die dynamischen Lasten müssen für die Optimierung in statische Ersatzlasten konvertiert werden.

Als zusätzliche Sicherheit zur Lastberechnung wurde die zulässige Gesamtmasse des schwersten Fahrzeugs der Plattform herangezogen. Das Auslegungsziel soll für die Gebrauchslastfälle eine rein elastische Beanspruchung und für die Missbrauchslastfälle eine Sicherheit gegen Gewaltbruch sein.

Nach dem Import der Bauraumgeometrie in SIMULIA Abaqus 2016 (über die STEP-Schnittstelle) wird mit der Aufbereitung des Berechnungsmodells begonnen. Hierzu wird der Bauraum mit linearen Tetraederelementen und einer mittleren Netzfeinheit (Einstellung AGS = 3 mit lokaler Verfeinerung) vernetzt. In Voruntersuchungen wurden diese Parameter als ideal für die Topologieoptimierung ermittelt. Die Lasten und Randbedingungen werden appliziert und die Berechnungsparameter festgelegt. Es wird eine linear-elastische, statische Analyse mit fünf Lastfällen als Basis der Optimierung verwendet. Die nötigen Materialdaten E-Modul (70.000 N/mm^2) und Querkontraktionszahl (0,34) sind für die Alu-Druckgusslegierung passend definiert.

Anschließend wird die Topologieoptimierung durchgeführt, wozu das aufbereitete Berechnungsmodell direkt in Abaqus 2016 weiter bearbeitet wird. Es sind das Optimierungsziel (minimale Nachgiebigkeit) und die Randbedingungen festzulegen. Letztere umfassen die Volumenrestriktion (hier: 50 %) und Fertigungsrestriktionen (hier: „demold control / forging“ ohne Aushebeschrägen, zusätzlich „maximum member size“ und „frozen area“ um den Lastangriff). Nachdem die adäquaten Parameter für die Optimierung eingestellt wurden (z. B. Sensitivity-Algorithmus, Penalty-Faktor und Schrittweite auf Standard), kann der Optimierungslauf beginnen. Dieser schreitet iterativ bis zum Abbruchkriterium fort und liefert anschließend die optimale Bauteilgeometrie als Designvorschlag, wie in Bild 2 links dargestellt. Für dieses Beispiel wurde die Software SIMULIA Abaqus 2016 verwendet, das Vorgehen lässt sich aber grundsätzlich auf beliebige Strukturoptimierungstools übertragen.

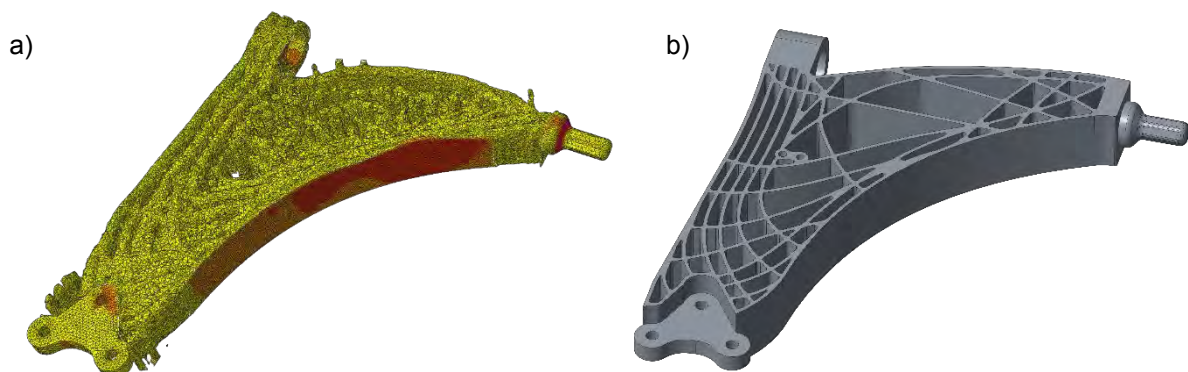


Bild 2: a) Ergebnis des ersten Topologieoptimierungslaufs ohne Prozessberücksichtigung und b) die daraus abgeleitete parametrische CAD-Neukonstruktion

Das Resultat der Topologieoptimierung muss daraufhin durch den Konstrukteur in ein parametrisches CAD-Modell überführt werden, vgl. Bild 2 b). Hierfür bietet sich entweder eine komplette Neukonstruktion oder die Anpassung des vorhandenen Bauraum-Modells an. Bei dem Schritt der Neukonstruktion ist durch den Anwender immer darauf zu achten, dass fertigungs- und prozessspezifische Details wie Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien eingehalten werden (siehe

Wissensbasis). Dies schafft bereits die Grundlage für eine prozesssichere Auslegung und ist die Grundvoraussetzung für eine valide Prozesssimulation.

3.2 Prozesssimulation

Zur Analyse der Prozesstauglichkeit wird nach der ersten Optimierungsschleife eine *dtbf/sp*-Analyse des nachkonstruierten Designentwurfs durchgeführt. Grundlage hierfür bildet die Formfüllsimulation in der Simulationssoftware Flow-3D der Fa. Flow Science, Inc., Santa Fe. Das Simulationssetup für die Simulation ist in Bild 3 gezeigt. Das Bauteil umfasst zusätzliche Anschnittfinger, die die Schmelzeströmung in das Bauteil leiten und so für eine realistische Formfüllung sorgen. Die Anschnittfinger werden von der weiteren Betrachtung bewusst ausgenommen, da sie zur lastgerechten Auslegung der Bauteilgeometrie nicht von Belang sind. Die Formentlüftung wird über mathematisch modellierte Entlüftungen realisiert.

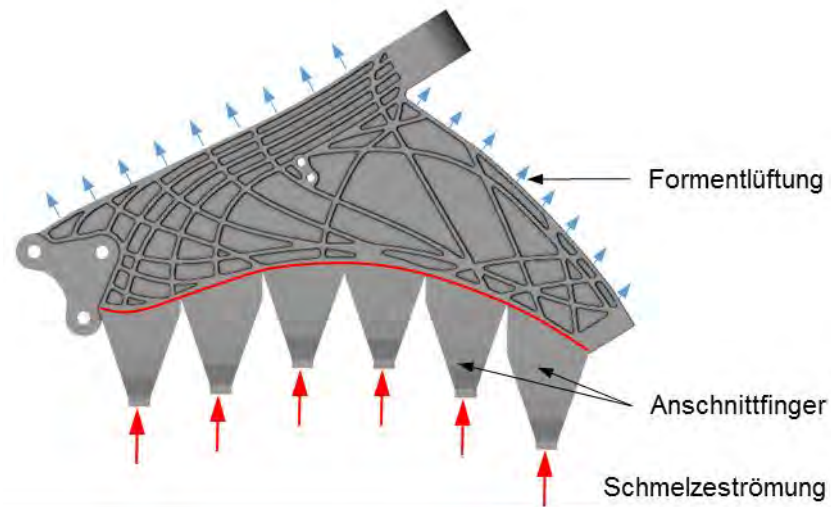


Bild 3: Simulationssetup zur Berechnung der Formfüllung mit Hilfe von Flow-3D. Für die Bauteilanalyse werden ausschließlich die Bereiche über der roten Anschnittlinie betrachtet.

Die Simulation liefert Informationen über die zu erwartenden Fließlängen bei der Füllung der Form mit Schmelze. Diese sind über eine Schnittstelle im ASCII-Format verfügbar und werden direkt in die Bauteilbewertung nach der *dtbf/sp*-Methode einbezogen. Die Simulationsdaten sind direkt den Koordinatenpunkten der Finiten Volumina aus der Bauteildiskretisierung zugeordnet und bilden eine Bauteil-Punktewolke. Diese wird nach Heilmeyer et. al. (2016) einer shortest path-Analyse unterzogen. Das Ergebnis ist in Bild 4 a) dargestellt. Die Werte in Falschfarbendarstellung repräsentieren die kürzesten Verbindungen jedes Bauteilpunktes zur Anschnittlinie (vgl. Bild 3). Dem gegenübergestellt sind in Bild 4 b) die Fließlängen, wie sie nach erfolgter Formfüllung im Bauteil vorliegen.

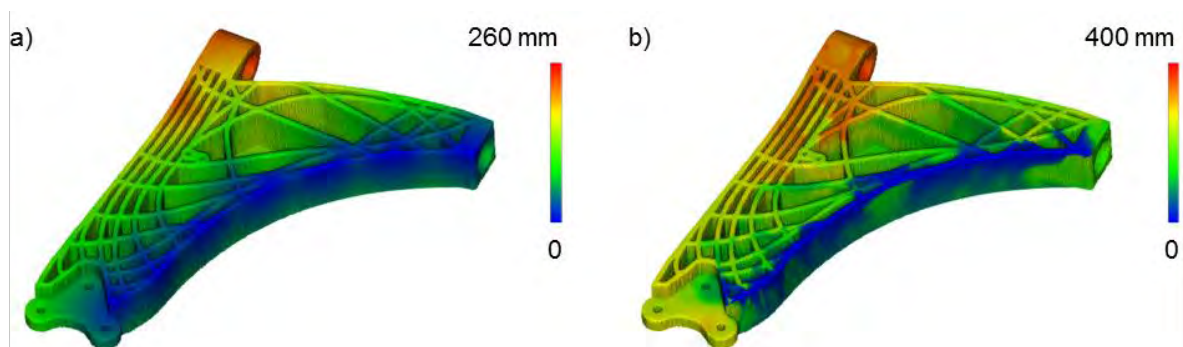


Bild 4: a) Falschfarbendarstellung des Werts *sp* als Maß für den Abstand der Bauteilpunkte zur Anschnittlinie und b) der in der Simulation berechneten Fließlängen (*dtbf*)

Da die Randbedingungen für die Berechnung der Fließlängen und der shortest path-Längen auf der gleichen Anschnittlinie beruhen, ist ein direkter Vergleich in Form des Quotienten $dtbf/sp$ auf Bauteilpunktebene möglich. Der Wert setzt die Fließlängen, die zur Füllung eines Bereichs nötig sind, und dessen Abstand zum Anschnitt ins Verhältnis und gibt damit Auskunft über die Fließlängenüberhöhung. Diese überhöhten Fließlängen dienen als Maß zur Selektion prozesstechnisch ungünstiger Bereiche, da bei zu hohen Fließlängen mit vermehrten Qualitätsproblemen im Gussteil zu rechnen ist. Ein Aussortieren dieser Bereiche gibt demnach Rückschlüsse auf den negativen Bauraum, der in der zweiten Topologieoptimierung ausgeschlossen werden sollte. Bild 5 zeigt eine Gegenüberstellung der verbleibenden Bauteilpunkte nach Anwendung unterschiedlicher Filter zwischen 1,5 und 3. Ein Aussortieren von Werten über 3 liefert noch keine brauchbaren Anhaltspunkte für eine Anpassung des Bauraums, während ein Filter über 1,5 zu viele notwendige Bauteilbereiche filtert (vgl. Bild 2 b).

Für den ersten Designvorschlag findet ein Filter ≤ 2 Anwendung (vgl. Bild 5). Daraus leitet sich ein prozesstechnisch ungünstiger Bereich ab, der in Bild 6 gezeigt ist. Dieser ist aus einfachen geometrischen Formen aufgebaut und orientiert sich an den geometrischen Größen des Bauteils (wie der Wandstärke) und funktionsbedingt notwendigen Bereichen. Die genaue Gestaltung des negativen Volumens obliegt dem Anwender dieser Methode und ist deshalb abhängig von dessen Erfahrung und Interpretationsvermögen.

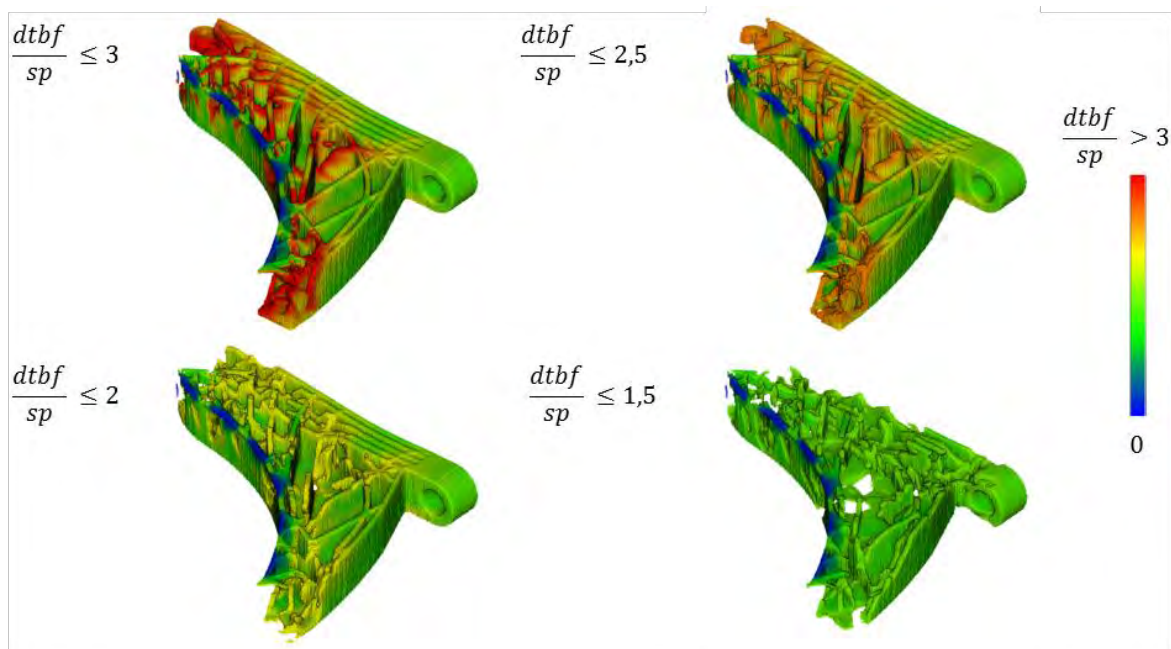


Bild 5: Anwendung verschiedener Filter auf die Auswertung des Querlenkers nach Anwendung der dtbf/sp-Analyse in einheitlicher Falschfarbendarstellung

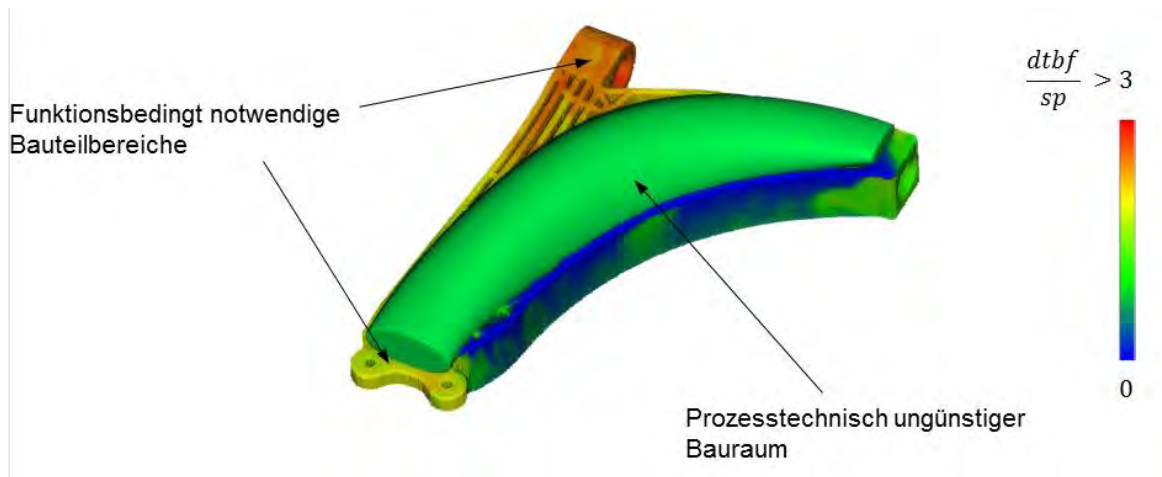


Bild 6: Darstellung der Bauteilgeometrie mit dem Wert $\frac{dtbf}{sp}$ in Falschfarben. Der prozesstechnisch ungünstige Bereich wird vor der zweiten Optimierung vom Bauraum entfernt.

Um den negativen Bauraum in eine neue Topologieoptimierung einfließen zu lassen, wird dieser vom Ausgangsbauraum entfernt. Der in Bild 7 dargestellte, verbleibende Bauraum steht für eine zweite Schleife der Topologieoptimierung zur Verfügung.



Bild 7: Angepasster Bauraum nach der $\frac{dtbf}{sp}$ -Analyse

3.3 Zweite Optimierungsschleife

Die zweite Topologieoptimierung mit dem neuen Bauraum bei gleichbleibenden Einstellungen generiert dann einen Designvorschlag, welcher die Bereiche mit schlechter Füllqualität von vornherein vermeidet. Durch den angepassten Bauraum wird vom Optimierungsalgorithmus eine andere, optimale Geometrie errechnet – es reicht nicht, die als untauglich bewerteten Bauteilbereiche aus dem CAD-Resultat der ersten Optimierungsschleife zu entfernen. Durch diesen Schritt würden sowohl die funktionellen Anforderungen als auch die gewünschten Festigkeits-/Steifigkeitseigenschaften nicht erreicht werden. Daher ist zwingend eine erneute Optimierung auf Basis des angepassten Bauraums nötig, deren Ergebnis wieder per Neukonstruktion (erneut in Verbindung mit den Inhalten, Regeln und Richtlinien aus dem Wissensmanagement) in ein fertigungs- und prozessoptimales CAD-Druckgussbauteil überführt wird (vgl. Bild 8).

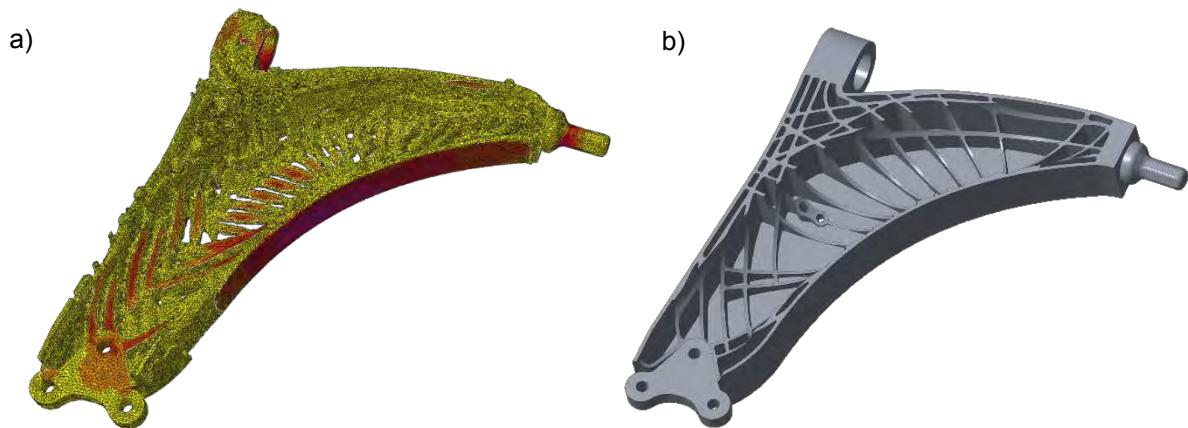


Bild 8: a) Optimierungsergebnis auf Basis des angepassten Bauraums und b) die daraus abgeleitete parametrische CAD-Neukonstruktion

Im Vergleich zum Ausgangsbauteil aus Stahlguss, welches ein Gewicht von 4,64 kg aufweist, konnte durch das Aluminium-Druckgussbauteil (2,75 kg) eine Massereduktion von über 40 % erzielt werden. Nach erfolgreicher Erzeugung (ergo Neukonstruktion) der Geometrien sollten diese einer abschließenden Produktsimulation zur Absicherung der mechanischen Eigenschaften unterzogen werden.

3.4 Abschließende Ergebnisbewertung

Der prozessoptimierte Designvorschlag wird einer abschließenden *dtbf/sp*-Analyse unterzogen. Hierfür sind eine erneute Gießsimulation und *sp*-Analyse notwendig. Das Ergebnis zeigt eine deutliche Reduktion der maximalen Fließlängen, was sich nach Bild 9 in einer Verschiebung der Verteilung der *dtbf/sp*-Werte hin zu kleineren Werten äußert.

Zur Freigabe des Prozesses kann diese abschließende Gießsimulation wiederverwendet werden, wodurch die Effizienz des neu entworfenen Prozesses weiter steigt.

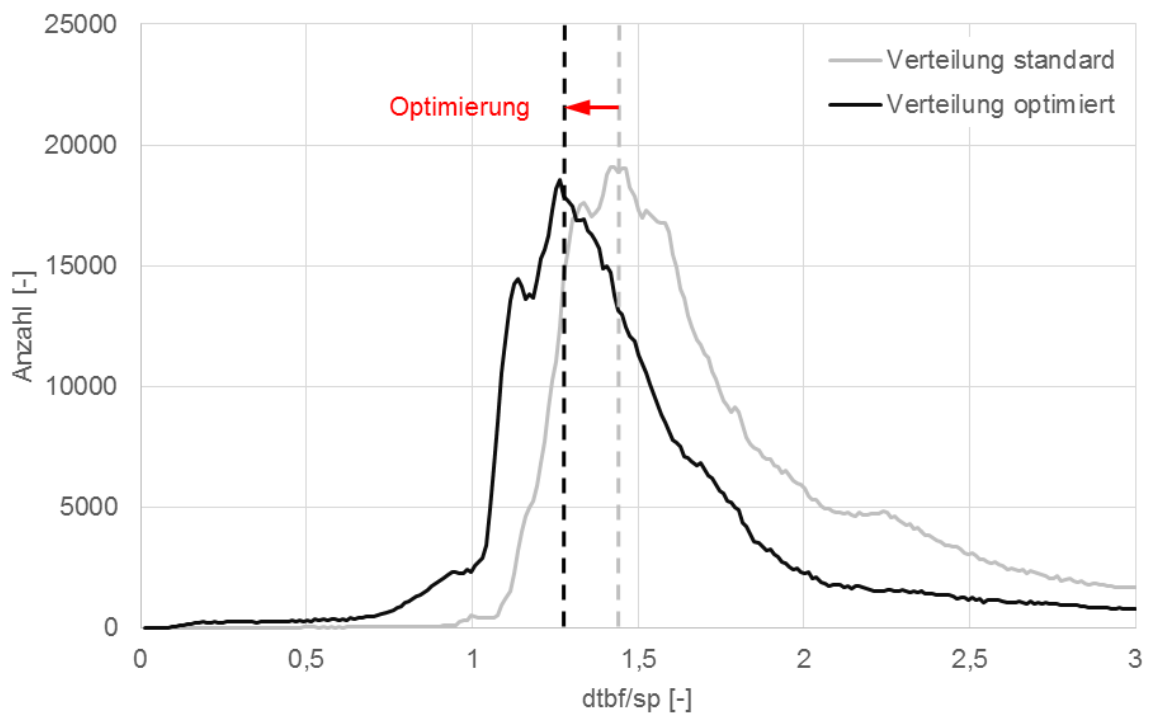


Bild 9: Verteilung der Summe an Bauteilpunkten mit dem gleichen *dtbf/sp*-Wert zum Vergleich der Standard- und optimierten Geometrie

Somit wurde der erste Designvorschlag in Hinblick auf die Prozessqualität durch eine erneute Optimierung unter angepasstem Bauraum stark verbessert. Dank der bei jeder Neukonstruktion umgesetzten Gestaltungsregeln aus der Wissensbasis entsteht ein fertigungs- und prozessoptimales Druckgussbauteil des Querlenkers in einem effizienten Entwicklungsprozess (vgl. Bild 8 b).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der neue Workflow vermeidet zum einen aufwändige, manuelle Iterationsschleifen zur Findung eines leichten Designs, welches zusätzlich den Ansprüchen an Steifigkeit und Festigkeit genügt. Zum anderen werden ineffiziente iterative Prozesse zwischen den Abteilungen Konstruktion, Berechnung und Fertigung stark reduziert, da die ersten Ergebnisse aus dem neuen Entwicklungsprozess bereits mit Rücksicht auf die mechanischen Eigenschaften und den Fertigungsprozess optimal ausgelegt sind. Somit bleibt nur noch eine abschließende Kontrollschleife durch die Berechnungsabteilung zur Absicherung der funktionalen Eigenschaften und durch die Fertigungsspezialisten zur Prozessabsicherung. In der Theorie – falls der neue Prozess fehlerfrei durchgeführt wurde – sollten nun keine Korrekturen mehr notwendig sein und das Bauteil direkt die Freigabe erhalten.

Durch die Kombination einer rein geometrischen Bauteilanalyse mit einer Gießsimulation kann mit geringem Aufwand eine Bewertung von Bauteilzellen erfolgen, auf deren Basis Prozessinformationen in die Topologieoptimierung einfließen können. Hierbei wird mit Rücksicht auf die Rechenzeit kein iteratives Vorgehen gewählt, sondern eine einstufige Anpassung des Bauraums für die Optimierung, um unerwünschte Bereiche mit voraussichtlich negativen Gießeigenschaften aus dem Designraum auszuschließen. Dadurch wird eine effiziente Produktentwicklung durchgeführt, welche produktoptimale Geometrieerzeugung mit prozessoptimaler Auslegung durch computergestützte Werkzeuge verbindet.

Das Vorgehen kurz zusammengefasst:

1. Konstruktion Bauraum für Topologieoptimierung
2. Durchführung Topologieoptimierung und Neukonstruktion Designvorschlag
3. Durchführung Gießsimulation und sp-Analyse, Ableitung unerwünschter Bauteilzellen
4. Anpassung Bauraum durch Entfernung unerwünschter Bauteilzellen
5. Topologieoptimierung angepasster Bauraum und Neukonstruktion Designvorschlag
6. Durchführung Gießsimulation und sp-Analyse, Bewertung Ergebnisse und Absicherung Prozesstauglichkeit

Zur Verbesserung der neu entwickelten Methode sind in Zukunft mehrere Schritte durchzuführen. Die Ableitung des negativen Volumens zur Anpassung des Bauraums ist zum jetzigen Stand nicht weiter spezifiziert und nutzerunfreundlich, d. h. stark abhängig vom Konstrukteur und dessen Interpretation des Ergebnisses. An diesem Punkt ist eine definierte Beschneidung des Bauraums über automatisiert erzeugte Ebenen zu etablieren, welche in ersten Versuchen mit CATIA-Funktionen bereits vielversprechende Ergebnisse zeigt.

Zur Identifikation eines allgemeingültigen Grenzwertes bei der Bewertung der dtbf/sp-Analyse, welche der Ermittlung der unerwünschten Bauteilbereiche dient, sind noch weitere Untersuchungen nötig. Aktuell zeigen sich bei einem dtbf/sp-Wert ≤ 2 sehr gute Ergebnisse, wobei dieser Wert zu validieren oder korrigieren ist.

Die bisherige Bauteilgeometrie wird ohne Überlauf und Entlüftungssystem simuliert. Eine dtbf/sp-Analyse nach der Simulation mit Überläufen könnte weitere Informationen zur Prozessbeurteilung liefern.

Zudem wird aktuell eine reine Geometrieanalyse (shortest path) durchgeführt, welche zwingend eine Gießsimulation zur Generierung aussagekräftiger Werte benötigt. Durch die Erweiterung der sp-Analyse um physikalische Meta-Modelle könnte die Gießsimulation entfallen, was neben der Einsparung von Rechenzeit die Möglichkeit eröffnet, zu jeder Iteration der Topologieoptimierung Prozessinformationen automatisiert zu berechnen und einfließen zu lassen. Dafür ist im Anschluss an die Implementierung physikalischer Modelle eine Automatisierung der prozessgerechten Topologieoptimierung anzustreben, indem eine bidirektionale Datenaustauschnittstelle zwischen Bauteilanalyse und Optimierungsalgorithmus entwickelt wird. Der Optimierungsalgorithmus ist

schließlich um eine Filterung von unerwünschten Elementen auf Basis der Prozessinformationen zu erweitern.

Danksagung

Wir danken der Bayerischen Forschungstiftung für die Förderung unserer Forschung im Rahmen des Forschungsverbunds „FORPRO² – Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation“.

Literatur

- Brunhuber 1991 BRUNHUBER, Ernst: Praxis der Druckgussfertigung. 4. neubearbeitete und erw. Auflage. Berlin: Schiele & Schön, 1991.
- Bührig-Polaczek et al. 2014 BÜHRIG-POLACZEK, Andreas; MICHAELI, Walter; SPUR, Günter: Handbuch Urformen. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- Feldhusen et al. 2013 FELDHUSEN, Jörg ; GROTE, Karl-Heinrich: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- Hautsch et al. 2015 HAUTSCH, Stefan; FRISCH, Michael; ALBER-LAUKANT, Bettina; RIEG, Frank (2015): Prozessgerechte Strukturoptimierung von Tiefziehbauteilen. In: Binz, Bertsche, Bauer, Maier, Roth (Hrsg.): *Tagungsband zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*, Stuttgart: Fraunhofer IAQ.
- Hautsch et al. 2016 HAUTSCH, Stefan; KATONA, Sebastian; SPRÜGEL, Tobias; KOCH, Michael; RIEG, Frank; WARTZACK, Sandro: Anwendung wissensbasierter Simulationen zur Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen in der Automobilindustrie. In: Krause, Paetzold, Wartzack (Hrsg.): *Design for X (DFX) 2016*, Hamburg: TuTech, 2016, S. 89-100.
- Heilmeier et al. 2016 HEILMEIER, Florian; GOLLER, Daniel; OPRITESCU, Daniel; THOMA, Christopher; RIEG, Frank; VOLK, Wolfram: *Support for Ingate Design by Analysing the Geometry of High Pressure Die Cast Geometries Using Dijkstra's Shortest Path Algorithm*. In: *Advanced Materials Research* 1140 (2016), S. 400-407.
- Nogowizin 2011 NOGOWIZIN, Boris: Theorie und Praxis des Druckgusses. Berlin: Schiele & Schön, 2011.
- Rieg und Steinhilper 2012 RIEG, Frank; STEINHILPER, Rolf: Handbuch Konstruktion. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2012.
- Roller 2001 ROLLER, Rolf: Fachkunde für gießereitechnische Berufe - Technologie des Formens und Gießens. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer, 2001.

ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor: Anwendungs- und Implementierungsmodell eines Live-Labs

Benjamin Walter, Albert Albers, Gernot Benesch, Nikola Bursac

Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland
{Benjamin.Walter, Albert.Albers, Gernot.Benesch, Nikola.Bursac}@kit.edu

Abstract: Im Live-Lab ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor entwickeln Studierende jährlich in Kooperation mit einem Industriepartner innovative Produktkonzepte. Es existieren hierbei drei Dimensionen: Im Sinne der *Lehre* zielt ProVIL auf Handlungskompetenz bei Studierenden. In der Dimension *Forschung* wird ProVIL als Forschungsumgebung zur Evaluierung von Methoden, Prozessen und Tools verstanden. Im Sinne der *Innovationsdimension* sollen die Projektergebnisse möglichst hohes Innovationspotential aufweisen. Zwischen den drei Dimensionen bestehen vielfältige Synergiepotentiale und Zielkonflikte. Im vorliegenden Beitrag wird das Live-Lab ProVIL 2016 umfangreich analysiert, um ein Implementierungsmodell für ProVIL 2017 abzuleiten. Weiterführend wird dieses Implementierungsmodell im integrierten Produktentstehungsmodell abgebildet, um daraus in Zukunft ein Referenzmodell für ProVIL entwickeln zu können.

Keywords:

Live-Lab, standortverteilte Produktentwicklung, virtuelle Teams, Prozessmodell

1 Einleitung und Motivation

Gemäß dem World Investment Report (UNCTAD 2016) steigt das Volumen ausländischer Direktinvestitionen stetig an, wobei Unternehmen neben kostenorientierten auch marktorientierte Motive verfolgen (Hemmer et al. 2006). Die globale Verteilung von Unternehmensstandorten geht mit einer internationalen Arbeitsteilung von Innovationsaktivitäten in Form des F&E-Outsourcings einher (Meyer und Berger 2008). Eines der wichtigsten Motive sind nach Stahlecker et al. (2014) Wissen und Technologie, da Unternehmen global nach neuen Technologien, hochqualifizierten Mitarbeitern und wissensintensiven Netzwerken suchen, um externen Wissensinput zu internalisieren. Daher sind die Innovationsaktivitäten eines Unternehmens zunehmend weltweit verteilt, wodurch der Innovationsprozess häufig durch internationale Projektteams koordiniert wird (Nippa und Rosenberger 2007). Der Anteil an Entwicklungsaktivitäten die von Teams an unterschiedlichen Standorten durchgeführt werden nimmt stetig zu (Zanker & Horvat 2015). Diese global verteilten F&E-Aktivitäten der Produktentstehung werden dabei von Kommunikations- und Informationstechnologien unterstützt und stehen mit der Internationalisierung in einer sich gegenseitig verstärkenden Wechselbeziehung (Aggarwal 1999). Dabei kann die situationsspezifische Auswahl des richtigen Tools methodisch unterstützt werden (Walter et al. 2016a). Wie Produktentwickler in standortübergreifenden Teams bei der Synthese neuer Produktgenerationen und im Produktentstehungsprozess zielgerichtet unterstützt werden können, untersuchen aktuelle Forschungsarbeiten (Albers et al. 2015; Walter et al. 2016a). Hierbei müssen Methoden und Prozesse untersucht werden, die in der standortübergreifenden Zusammenarbeit zum Einsatz kommen (Albers et al. 2016a).

2 Stand der Forschung

2.1 ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor

ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor, ist ein studentisches Produktentwicklungsprojekt, welches im Sommersemester 2016 erstmalig durchgeführt wurde. Es verfolgt, abhängig von der Sichtweise, Ziel in drei Dimensionen. Als Fachpraktikum im Bereich der

Lehre zielt es darauf, Studierenden Handlungskompetenz im Bereich der Produktentwicklung zu vermitteln. Als Innovationsprojekt verfolgt es das Ziel, Projektergebnisse mit hohem Innovationspotential zu generieren. Als Live-Lab dagegen stellt es eine Forschungsumgebung zur Evaluierung neuer Methoden, Prozesse und Tools in der Produktentwicklung dar. Als Live-Lab im Sinne der Produktentwicklung wird dabei eine Untersuchungsumgebung verstanden, die es erlaubt, Methoden, Prozesse und Tools in ihrem Einsatz in einem möglichst realgetreuen Entwicklungsprozess zu untersuchen. Es ist damit zwischen reinen Laborstudien und Feldstudien angesiedelt (Walter et al. 2016a). An ProVIL 2016 sind verschiedene Stakeholder beteiligt (Bild 1). Zum einen agieren Mitarbeiter des IPEK – Institut für Produktentwicklung als Projektleiter. Diese leiten 32 Studierende im Master Maschinenbau am KIT bei der Bearbeitung einer Entwicklungsaufgabe an. Dabei werden sie von 10 Master-Studierenden (Wirtschaftsingenieurwesen, International Management) der Hochschule Karlsruhe (HsKA) unterstützt, welche die KIT-Studierenden als Innovations-Coaches im Bereich der Methodenanwendung und Validierung von Projektergebnissen begleiten (Walter et al. 2016b). Die Projektaufgabe für ProVIL 2016 wird vom Industriepartner Porsche AG gestellt und ist im Bereich Smart Mobility angesiedelt. Hierbei entwickeln die Studierenden unter Beachtung von Trends, Technologie und Wettbewerb Produktkonzepte für digitale Dienste, die den Porsche-Kunden von morgen begeistern sollen. Zur Bearbeitung dieser Aufgabe agieren alle Projektbeteiligten hauptsächlich auf einer Innovationsplattform im virtuellen Raum, welche von dem Softwarepartner SAP zur Verfügung gestellt wird (Walter et al. 2016b). Zu wichtigen Ereignissen wie beispielsweise Kickoff und Meilensteine finden zudem Präsenzveranstaltungen statt.

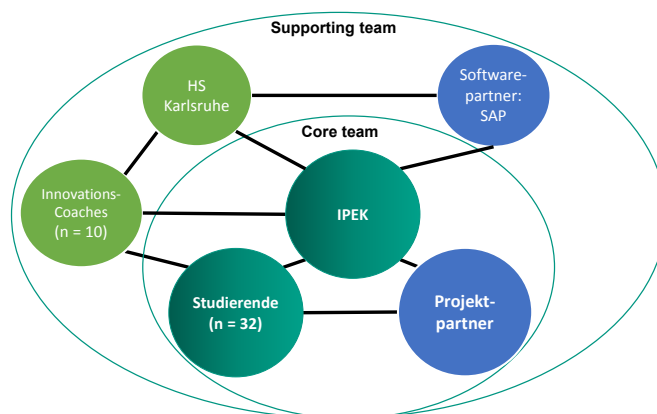


Bild 1: Stakeholder und deren Anzahl bei ProVIL

Um den Produktentstehungsprozess zu koordinieren wurde ein Prozessmodell entwickelt, welches das Projekt, abgesehen von der Planungsphase in vier Projektphasen gliedert (Bild 2): Innerhalb der Analysephase lernen die Studierenden alle weiteren Stakeholder kennen und bauen eine projektspezifische Wissensbasis auf (Walter et al. 2016a). In der Potentialfindungsphase werden Kunden und Märkte analysiert, um Marktchancen zu identifizieren. Diese werden aggregiert und als Produktprofile aufbereitet. In der Konzipierungsphase werden ausgewählte Produktprofile zu Produktideen weiterentwickelt, indem die Studierenden Ideen für die technische Umsetzung des späteren Produktes erzeugen. In der Präzisionsphase erarbeiten die Teilnehmer erste Mockups, um die prinzipielle Umsetzbarkeit ihrer Lösungen nachweisen zu können.

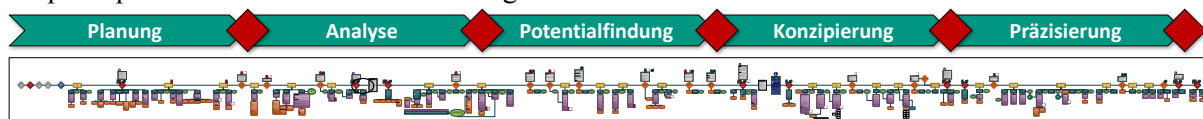


Bild 2: Prozessabbildung von ProVIL

Alle Projektphasen von ProVIL 2016 werden mit vielfältigen Entwicklungsmethoden wie beispielsweise Kreativitätsmethoden, Bewertungsmethoden, etc. unterstützt. Im Projektverlauf entstehen vielfältige (Zwischen-)Ergebnisse wie beispielsweise ca. 300 Produktprofile, ca. 100 Produktideen sowie acht finale Produktkonzepte inkl. entsprechender Mockups der entwickelten

digitalen Dienste. Um die weitgehende Bearbeitung der Aktivitäten auf einer Innovationsplattform zu ermöglichen, wurde das Prozessmodell im SAP Innovation Management (SAP IM) implementiert. Hierzu wurden die im SAP IM verfügbaren Kampagnen als Navigationskampagnen („Übersichtskampagnen“) und als themenspezifische Arbeitsbereiche („Tätigkeitskampagnen“) verwendet (Walter et al. 2016b). In den Tätigkeitskampagnen nutzen die Studierenden das Element Ideenkarte, um Arbeitsergebnisse zu generieren und strukturiert abzulegen. Diese können nach jeweiliger Freischaltung mittels einer Bewertungsfunktion beurteilt werden. Zudem können alle Projektbeteiligten jederzeit Feedback zu allen Arbeitsständen posten. Hierdurch werden diese schon während des Projektverlaufs weiterentwickelt. Im Vergleich zum studentischen Entwicklungsprojekt IP – Integrierte Produktentwicklung, welches am IPEK mit 16 ECTS-Punkte angeboten wird, weist ProVIL mit 3 bzw. 4 ECTS-Punkten weitaus geringeren Arbeitsaufwand für jeden Studierenden auf (Albers et al. 2017). Dies ist auch ein Grund dafür, dass sich der Kompetenzaufbau in ProVIL im Wesentlichen auf das Anwenden von Entwicklungsmethoden beschränkt, während die Studierenden in IP zusätzlich lernen, Entwicklungsmethoden situationsspezifisch auszuwählen und zu adaptieren. In diesem Sinne schließt ProVIL in der Dimension Lehre die Lücke zwischen der Grundlagenvorlesung Produktentstehung – Entwicklungsmethodik und IP („Lücke 1“). Darüber hinaus schließt es als Live-Lab die Lücke zwischen Laborstudien und Feldstudien („Lücke 2“) und im Sinne der Innovation die Lücke zwischen dem Innovationsbedarf des Projektpartners und seinen regulären Entwicklungsprojekten („Lücke 3“). Daher wird ProVIL – wie auch IP – vom jeweiligen Projektpartner vorwiegend auf der Stufe eines Vorentwicklungsprojektes wahrgenommen.

2.2 Das integrierte Produktentstehungsmodell

Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) ist ein generisches Metamodell, welches die Abbildung von Produktentstehungsprozessen erlaubt (Albers et al. 2016b). Es basiert auf dem System-Tripel des ZHO-Systems, welches die Aufgabe der Produktentstehung im Sinne der Systemtheorie darin sieht, ein Zielsystem (die Gesamtheit von Zielen und Randbedingungen) mit Hilfe eines Handlungssystems (u.a. Ressourcen, Aktivitäten, Methoden...) in ein Objektsystem ((Zwischen-) Ergebnisse bis hin zum finalen Produkt) zu überführen (Albers und Braun 2011). Das Handlungssystem besteht aus einem statischen Teil und einem dynamischen Teil. Im statischen Teil werden Makroaktivitäten und Mikroaktivitäten sowie das Ressourcensystem dargestellt. Die Makroaktivitäten sind zum Beispiel Projekte managen, Validieren und Verifizieren, etc. Diese werden mit Hilfe der Aktivitäten der Problemlösung (Mikroaktivitäten), die das SPALTEN-Modell zur Verfügung stellt, weiter aufgliedert (Albers et al. 2016b).

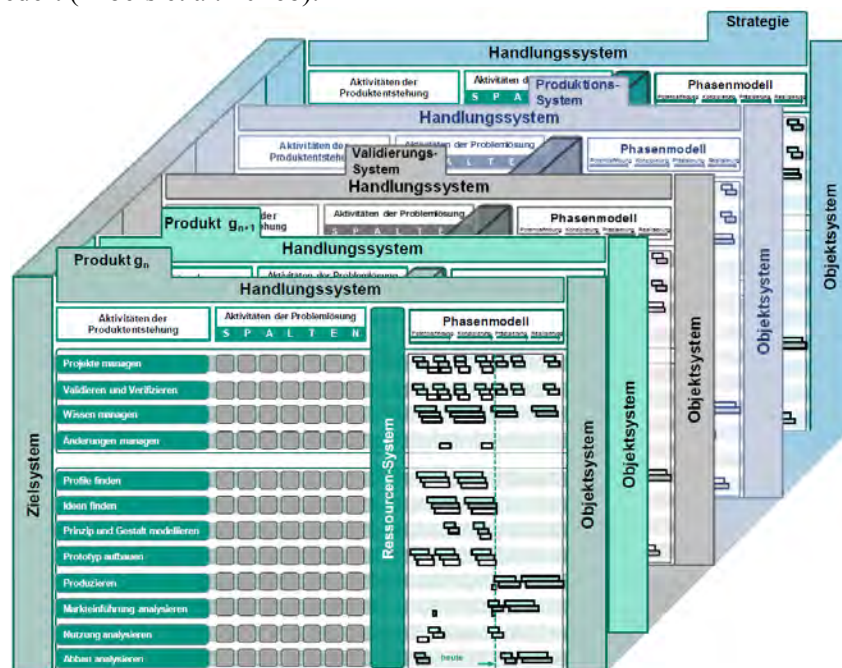


Bild 3: Das integrierte Produktentstehungsmodell in der Produktgenerationsentwicklung, Albers et al. 2016b

Das SPALTEN-Modell ist ein allgemein anwendbares Modell zur Problemlösung mit den sieben Schritten Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen sowie Nachbereiten und Lernen (Albers et al. 2016c). Der dynamische Teil des iPeM besteht aus dem Phasenmodell, welches es ermöglicht, das jeweilige Projekt im Zeitverlauf abzubilden. Es wird hierbei unterschieden in Referenzmodell, Implementierungsmodell und Anwendungsmodell. Das Referenzmodell stellt einen typischen Projektverlauf für eine bestimmte Art von Projekten dar und kann für Projekte, die in ähnlicher Form mehrmals auftreten, festgelegt werden. Um die Planung eines spezifischen Projektes zu konkretisieren, kann durch Adaption aus dem Referenzmodell ein Implementierungsmodell abgeleitet werden. Daher repräsentiert das Implementierungsmodell den geplanten Projektverlauf für ein spezifisches Projekt und wird vor Projektbeginn definiert. Das Anwendungsmodell beschreibt dagegen den tatsächlichen Projektverlauf und wird projektbegleitend erstellt. In diesem Sinne ist das Referenzmodell eine Verallgemeinerung typischer Projektverläufe, während das Implementierungsmodell den geplanten sowie das Anwendungsmodell den tatsächlichen Ablauf eines Projektes darstellt (Albers und Braun 2011). Im iPeM (vgl. Bild 3) wird die Entstehung eines Produktes bzw. einer Produktgeneration g_n auf einer Ebene dargestellt. Weitere Produktgenerationen (g_{n+1}, \dots) werden auf jeweils einer weiteren Ebene dargestellt (Albers et al. 2016b). Zudem existieren Ebenen für das Validierungssystem, das Produktionssystem sowie für die übergreifende Strategie.

3 Zielsetzung und Forschungsmethodik

Im Sommersemester 2016 wurde ProVIL erstmalig durchgeführt. Da ProVIL künftig jährlich im Sommersemester stattfinden wird und dabei jeweils Mehrwert sowohl als Live-Lab als auch als Fachpraktikum und Innovationsprojekt leisten soll, ergibt sich die übergreifende Zielstellung, ProVIL hinsichtlich der drei Dimensionen Forschung, Lehre und Innovation möglichst optimal zu gestalten. Diese Zielstellung wird mit Hilfe folgenden Forschungsfragen konkretisiert:

- Welche Synergiepotentiale und Zielkonflikte treten zwischen den Zielen der Dimensionen Forschung, Lehre und Innovation im Rahmen von ProVIL auf und welche Handlungsbedarfe lassen sich hieraus ableiten?
- Welche weiteren Handlungsbedarfe ergeben sich aus den Rückmeldungen der in ProVIL 2016 beteiligten Stakeholder sowie durch neue Randbedingungen und den Überlegungen zur Weiterentwicklung von ProVIL?
- Wie sollte ProVIL 2017 unter Berücksichtigung der Handlungsbedarfe gestaltet werden und wie lässt sich der Ablauf von ProVIL als Implementierungsmodell abbilden?

Um diese Forschungsfragen zu beantworten werden zunächst die Dimensionen Forschung, Lehre und Innovation getrennt voneinander hinsichtlich ihrer jeweiligen Ziele analysiert. Aufbauend werden die Ziele aus allen drei Dimensionen gegenübergestellt und im Rahmen eines Workshops innerhalb des ProVIL-Projektteams auf Synergiepotentiale und Zielkonflikte hin analysiert. Projektbegleitend zu ProVIL 2016 werden zudem die beteiligten Stakeholder (Studierende, Industriepartner, Softwarepartner, Hochschulpartner) mit Hilfe qualitativer und quantitativer Methoden auf Probleme und Verbesserungsvorschläge hin befragt. Diese werden um die Beobachtungen des Projektteams sowie weiterführende Analysen des Projektverlaufes ergänzt. Im Rahmen von vier Workshops werden daraufhin die Verbesserungsvorschläge im Projektteam diskutiert und in konkrete Handlungsbedarfe überführt. Auf dieser Grundlage wird das Anwendungsmodell von ProVIL 2016 in das Implementierungsmodell für ProVIL 2017 überführt und anschließend im iPeM modelliert, um die spätere Überführung in ein Referenzmodell für ProVIL zu ermöglichen und dadurch die Dokumentation sowie die künftige Nutzung von Erfahrungswissen nachhaltig zu ermöglichen.

4 Analyse von Zielen, Zielkonflikten und Synergiepotentialen

Die Ziele in den Bereichen Forschung, Lehre und Innovation werden jeweils in ein Hauptziel und mehrere Nebenziele gegliedert, wobei die Hauptziele in Unterziele aufgegliedert werden (vgl. Tabellen

1-3). Hauptziel in der Dimension Forschung ist im Rahmen von ProVIL der Erkenntnisgewinn im Hinblick auf Methoden und Prozesse für die standortübergreifende Produktentwicklung. Hauptziel in der Dimension Lehre ist die Vermittlung fachlicher und überfachlicher Kompetenzen, während der Projekterfolg das Hauptziel von ProVIL in der Innovationsdimension darstellt. Die Nebenziele definieren möglichen Zusatznutzen und beziehen sich beispielsweise auf die Betreuungs-, Forschungs- und Projektleitungseffizienz, aber auch auf eine hohe Anzahl an Studierenden oder die Qualität der Zusammenarbeit mit dem Industriepartner.

Die Verträglichkeit der Ziele aus unterschiedlichen Dimensionen wird auf einer fünfstufigen Skala bewertet. Diese reicht von (++) = „es existieren große Synergiepotentiale“, über (+), (o) und (-) bis zu (--) = „es existieren große Zielkonflikte“. Die Erreichung zweier Ziele, deren Relation mit einem (o) markiert ist, wird als unabhängig voneinander angesehen.

Tabelle 1: Synergiepotentiale und Zielkonflikte der Dimensionen Forschung und Lehre

Synergiepotentiale und Zielkonflikte der Dimensionen Forschung und Lehre			Forschung				
			Hauptziel: Erkenntnisgewinn			Nebenziele	
			Evaluierung neuer Methoden	Vergleich alternativer Methoden-umsetzungen	Identifizierung weiterführender Forschungsbedarfe	Hohe Anzahl an Studienteilnehmern	Geringer Forschungsaufwand
Lehre	Hauptziel: Kompetenzvermittlung	Vermittlung von Fachkompetenz	o	o	o	o	o (LF8)
		Vermittlung von Methodenkompetenz	++ (LF1)	++ (LF2)	+ (LF4)	o	o (LF8)
		Vermittlung von Kreativitätspotenzial	o	o	o	o	o (LF8)
		Vermittlung von Sozialkompetenz	o	o	o	o	o (LF8)
		Vermittlung von Elaborationspotential	o	o	o	o	o (LF8)
	Nebenziele	Hohe Anzahl an Studierenden	+ (LF6)	++ (LF7)	+	++ (LF3)	o (LF8)
		Geringer Betreuungsaufwand	o	o	- (LF5)	o	o (LF8)

Bei der Betrachtung der Abhängigkeiten der Dimensionen Lehre und Forschung wird ersichtlich, dass die Vermittlung von Methodenkompetenzen und die Evaluierung neuer Methoden sowie der Vergleich mit alternativen Methodenumsetzungen große Synergiepotentiale aufweist (LF1 und LF2 in Tabelle 1), da die Evaluierung neuer Methoden mit ggf. alternativen Umsetzungen impliziert, dass diese Methoden von den Studierenden angewendet werden. Die Studierenden, welche an ProVIL teilnehmen, stellen im Rahmen des Forschungsprojektes die Studienteilnehmer da, wodurch eine hohe Anzahl an Studierenden starke Synergiepotentiale mit einer hohen Anzahl an Studienteilnehmern aufweist (LF3). Je größer daher auch die Methodenkompetenz der Studierenden und damit der Studienteilnehmer ist, desto eher werden Forschungsbedarfe identifiziert (LF4). Dagegen steigt der Betreuungsaufwand bei der Identifizierung weiterführender Forschungsbedarfe, da diese vor allem von Betreuern identifiziert werden (LF5), welche am Projekt direkt teilnehmen. Synergiepotentiale ergeben sich ebenfalls zwischen einer hohen Anzahl an Studierenden und der Evaluierung neuer Methoden, da bei entsprechenden Studien (mehr) Kontrollgruppen gebildet werden können und so die Forschungsergebnisse valider werden (LF6). Dies gilt in verstärktem Maß beim Vergleich alternativer Methodenumsetzung, da hierfür zusätzliche Teilnehmer benötigt (LF7). Daneben wird der Forschungsaufwand als unabhängig von den Haupt- und Nebenzielen aus der Dimension Lehre eingeschätzt (LF8).

Tabelle 2: Synergiepotentiale und Zielkonflikte der Dimension Forschung und Innovation

Synergiepotentiale und Zielkonflikte der Dimensionen Forschung und Innovation			Forschung				
			Hauptziel: Erkenntnisgewinn			Nebenziele	
			Evaluierung neuer Methoden	Vergleich alternativer Methoden-umsetzungen	Identifizierung weiterführender Forschungsbedarfe	Hohe Anzahl an Studienteilnehmern	Geringer Forschungsaufwand
Innovation	Hauptziel: Projekterfolg	Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Projektergebnisse	o	o	o	o	o
		Technische Umsetzbarkeit der Projektergebnisse	o	o	+ (IF5)	o	o
		Aufbereitungsqualität der Projektergebnisse	o	o	o	o	o
		Quantität der Projektergebnisse	o	o	o	o	o
	Nebenziele	Transfer von Methodenwissen in das Partnerunternehmen	++ (IF1)	+	o	+	- (IF2)
		Qualität der Zusammenarbeit mit Industriepartner	o (IF3)	o (IF4)	o	o	o
		Geringer Projektleitungsaufwand	o (IF6)	o (IF6)	o (IF6)	o (IF6)	o (IF6)

Die Betrachtung der Abhängigkeiten der Ziele aus den Dimensionen Forschung und Innovation zeigt auf, dass die Evaluierung neuer Methoden und der Methodentransfer in das an ProVIL beteiligte

Partnerunternehmen bei entsprechender Bereitschaft große Synergiepotentiale aufweist (IF1 in Tabelle 2), da hier beispielsweise die Einbeziehung von Mitarbeitern des Unternehmens in wissenschaftliche Studien denkbar ist, was deren Aussagekraft steigert, andererseits aber den Forschungsaufwand ansteigen lässt (IF2). Die Qualität der Zusammenarbeit mit dem Industriepartner wird durch die Evaluierung neuer Methoden allerdings nicht direkt beeinflusst (IF3), genauso wenig wie der Vergleich alternativer Methodenumsetzungen (IF4). Da Probleme bei der technischen Umsetzbarkeit von Projektergebnissen auf unzureichende Methoden und Prozesse für standortübergreifende Entwicklungsteams hinweisen können, werden mittlere Synergiepotentiale zwischen technischer Umsetzbarkeit und der Identifizierung weiterführender Forschungsbedarfe hinsichtlich Methoden und Prozessen der standortübergreifenden Produktentwicklung gesehen (IF5). Der Aufwand aus Projektleitungssicht wird als weitgehend unabhängig von der Erreichung aller Haupt- und Nebenziele aus der Dimension Forschung eingeschätzt (IF6). Übergreifend betrachtet fallen die relativ geringen Synergiepotentiale zwischen den Dimensionen Innovation und Forschung auf. Dies liegt im Schwerpunkt daran, dass unter der Dimension Innovation an dieser Stelle lediglich der direkt Projektnutzen für den konkreten Projektpartner verstanden wird. Darüber hinaus zielt die Erforschung neuer Methoden, Prozesse und Tools selbstverständlich über den Projektkontext hinaus darauf, diese der Praxis von Industrieunternehmen zur Verfügung zu stellen und hiermit deren Innovationskraft nachhaltig zu steigern.

Tabelle 3: Synergiepotentiale und Zielkonflikte der Dimension Innovation und Lehre

Synergiepotentiale und Zielkonflikte der Dimensionen Innovation und Lehre			Innovation						
			Hauptziel: Projekterfolg				Nebenziele		
			Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse	Technische Umsetzbarkeit der Ergebnisse	Aufbereitungsqualität der Ergebnisse	Quantität der Ergebnisse	Transfer von Methodenwissen in das Partnerunternehmen	Qualität der Zusammenarbeit mit Industriepartner	Geringer Projektleitungsaufwand
Lehre	Hauptziel: Kompetenzvermittlung	Vermittlung von Fachkompetenz	o	+	o	o	o	o	o
		Vermittlung von Methodenkompetenz	+(LI1)	o	++(LI3)	o	++(LI2)	o	o
		Vermittlung von Kreativitätspotenzial	+	o	o	++(LI6)	o	o	o
		Vermittlung von Sozialkompetenz	o	o	o	o	+	++(LI7)	o
	Nebenziele	Vermittlung von Elaborationspotential	o	+(LI5)	+	o	o	o	o
		Hohe Anzahl an Studierenden	o	o	o	++	o	-	-(LI8)
		Geringer Betreuungsaufwand	o	o	--(LI4)	o	o	-	o

Bei der Gegenüberstellung der Dimensionen Lehre und Innovation geht hervor, dass es Synergiepotentiale zwischen der wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Vermittlung von Methodenkompetenz gibt, da ein Teil der vermittelten Methoden auf die Bewertung wirtschaftlicher Machbarkeit abzielt (LI1 in Tabelle 3). Starke Synergiepotentiale bestehen ebenfalls zwischen der Vermittlung von Methodenkompetenz an Studierende und dem Transfer von Methodenwissen an den Projektpartner, da die Studierenden ihr Wissen im Rahmen des Projektverlaufs z.B. im Rahmen von Meilensteinpräsentationen, auch direkt an den Projektpartner weitergeben (LI2). Gleichzeitig können sie ihre Methodenkompetenz nutzen, um Projektergebnisse anderen Stakeholdern besser präsentieren zu können (LI3). Aufgrund von Quality-Checks steigt jedoch der Betreuungsaufwand, um die Aufbereitungsqualität von Ergebnissen zu prüfen und zu heben (LI4). Synergiepotentiale bestehen ebenfalls zwischen dem Elaborationspotential und der technischen Umsetzbarkeit, da die Studierenden ihr vernetztes Wissen zur differenzierten Problemlösung und somit zur Umsetzung der Produktidee nutzen können (LI5). Des Weiteren steigert die Kreativität einer Person die Anzahl der Ergebnisse (LI6). Da die Sympathie zwischen Menschen eine wichtige Rolle bei der Zusammenarbeit spielt, unterstützt die Sozialkompetenz der Studierenden die Qualität der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner (LI7). Zielkonflikte entstehen jedoch zwischen einer hohen Anzahl an Studierenden und einem geringen Projektleitungsaufwand (LI8).

5 Handlungsbedarfe für ProVIL 2017

Um Handlungsbedarfe zur Verbesserung von ProVIL 2017 zu identifizieren, wurden die folgenden Quellen genutzt: Rückmeldungen von Stakeholdern, Synergiepotentiale und Zielkonflikte sowie neue Randbedingungen und Ziele der strategischen Weiterentwicklung von ProVIL. Die Studierenden äußerten im Rahmen von wöchentlichen Online-Umfragen den Wunsch, die Projektlaufzeit zu

verkürzen. Hierfür gab es zum einen den Grund den Aufwand der Teilnehmer zu reduzieren, um mit der Anzahl an ECTS-Punkten konsistent zu sein. Zum anderen sollte den Studierenden ausreichend Zeit für die Prüfungsvorbereitung eingeräumt werden, da das Projekt bis in den Prüfungszeitraum hinein durchgeführt wurde. Dies wurde durch eine Ausweitung der Teamgrößen von vier auf sechs Personen erreicht. Zusätzlich wünschten die Studierenden weitere Workshops zum Umgang mit den eingesetzten Software-Tools, wie beispielsweise Balsamiq, um diese effizienter anwenden zu können. Durch die Einplanung von Workshops in den Prozess, konnte das Hauptziel der Kompetenzvermittlung der Dimension Lehre verbessert werden und Synergiepotentiale mit der Dimension Innovation besser genutzt werden. Ebenso wurde von den Studierenden ein gemeinsamer Outlook-Kalender gefordert, um das Termin- sowie Aufgabenmanagement zu verbessern. Durch die Errichtung einer neuen Terminkategorie konnte den Studierenden wichtige Termine frühzeitig mitgeteilt werden, wodurch Terminkollisionen mit anderen Vorlesungen vermieden werden konnten.

Werden die in Kapitel 4 beschriebenen Synergiepotentiale und Zielkonflikte betrachtet wird ersichtlich, dass der Bedarf entsteht, Forschungskollegen frühzeitig in das Projekt zu integrieren. Dadurch können diese Forschungsbedarfe selbstständig erheben und sind nicht auf Beobachtungen der Projektleitung angewiesen. Dadurch wird der Zielkonflikt zwischen der Identifizierung von Forschungsbedarfen und einem geringen Betreuungsaufwand (LF5) reduziert. Um den Zielkonflikt zwischen einem geringen Betreuungsaufwand und der Aufbereitungsqualität (LI4) zu reduzieren, soll das Inno-Coach Konzept ausgebaut werden. Hierzu wird den Inno-Coaches mehr Verantwortung bei der Durchführung von Quality-Checks übertragen. Das Synergiepotential zwischen dem Transfer von Methodenwissen und der Evaluierung neuer Methoden (IF1) besser zu nutzen, sollen die Partnerunternehmen in wissenschaftliche Studien einbezogen werden. Dadurch können neue innovative Methoden direkt während der Evaluierung in das Unternehmen transferiert werden. Durch den Einsatz von Methodenvideos kann das Synergiepotential zwischen der Vermittlung von Methodenkompetenzen und der Evaluierung neuer Methoden (LF1) intensiviert werden. Durch den Einsatz von Methodenvideos erlernen die Studierenden schnell und qualitativ den Einsatz neuer Methoden.

Ein Ziel der Weiterentwicklung von ProVIL ist es, den Virtualisierungsgrad (der Anteil an virtuell durchgeführten Aktivitäten) in den laufenden Jahren sukzessive zu steigern. Dies wird durch virtuell durchgeführte Meilensteine und Phasenkickoffs erreicht, die in ProVIL 2017 aufgrund der räumlichen Distanz zum Industriepartner in Italien ohnehin notwendig sind. Die Existenz eines internationalen Projektpartners stellt gleichzeitig eine neue Randbedingung dar, die Englisch als Projektsprache erforderlich macht. Zudem werden Community-Phasen im virtuellen Raum eingeführt, bei denen die Teilnehmer die Crowd Intelligence – also das Wissen aller – nutzen und dadurch parallel den Virtualisierungsgrad steigern. Um beispielsweise die Recherchen in der ersten Projektphase zu unterstützen, teilen die Studierenden ihr Wissen mit Teilnehmern aus anderen Gruppen, indem sie ihr Wissen auf Ideenkarten der entsprechenden Recherchefelder festhalten und es dem gesamten Projektteam zugänglich machen. Ein weiteres strategisches Ziel ist es, die Bewertungsmethoden weiterzuentwickeln. Dadurch sollen Entscheidungen des Industriepartners hinsichtlich wirtschaftlicher Realisierbarkeit, technischer Umsetzbarkeit und Kreativität einer Idee realer abgebildet werden können.

6 Implementierungsmodell für ProVIL 2017

Für ProVIL 2017 wurde ein verbessertes und weiterentwickeltes Implementierungsmodell gestaltet. Innerhalb dieses Prozessmodells war es möglich Simultaneous Engineering abzubilden und zu realisieren, indem Aktivitäten parallel geplant sind und von den Studierenden entsprechend durchgeführt werden. Ebenfalls wurden sogenannte Community-Phasen eingeführt, um die Stärke des virtuellen Raums – die Crowd Intelligence – effizienter zu nutzen. Im Rahmen der Community-Phasen bewerten die Studierenden ihre Ideen gegenseitig und geben sich Verbesserungshinweise, wodurch die Qualität und somit auch das Innovationspotenzial der späteren Produkte gehoben werden. Da es für ProVIL noch kein Referenzmodell gibt und somit nicht zeiteffizient ein Implementierungsmodell für neue Projekte adaptiert werden kann, wurde das Implementierungsmodell für ProVIL 2017 auf das iPeM übertragen. Hiermit ergibt sich die Möglichkeit, das realisierte Anwendungsmodell und in der Folge Abweichungen zum Implementierungsmodell zu dokumentieren. Wird in den nächsten Jahren stets das jeweilige Implementierungsmodell auf das iPeM übertragen und sein dazugehöriges

Anwendungsmodell dokumentiert, wird ausreichend Erfahrungswissen erzeugt, um ein Referenzmodell generieren zu können.

Bei der Übertragung des Implementierungsmodells für ProVIL 2017 wurden die Aktivitäten von ProVIL den Makroaktivitäten des iPeM zugeordnet (Bild 4). Dabei wurden übergeordnete Aktivitätenbereiche definiert, welche bestimmte ProVIL-Aktivitäten clustern. Diese Bereiche können aufgeklappt werden und enthalten die jeweiligen ProVIL-Aktivitäten. Daneben wird in einer Spalte eine Empfehlung gegeben, welche Ressourcen oder Methoden bei einer ProVIL-Aktivität genutzt bzw. angewendet werden können. Diese enthält gleichzeitig einen Verweis auf einen Ressourcen- und Methodenköffer, welcher detailliertere Ressourcen-/Methodenbeschreibungen beinhaltet. Um eine Unterscheidung der Modelltypen zu gewährleisten, wird das Implementierungsmodell mit grünen Balken geordnet und das zu dokumentierende Anwendungsmodell mit roten Balken geordnet.

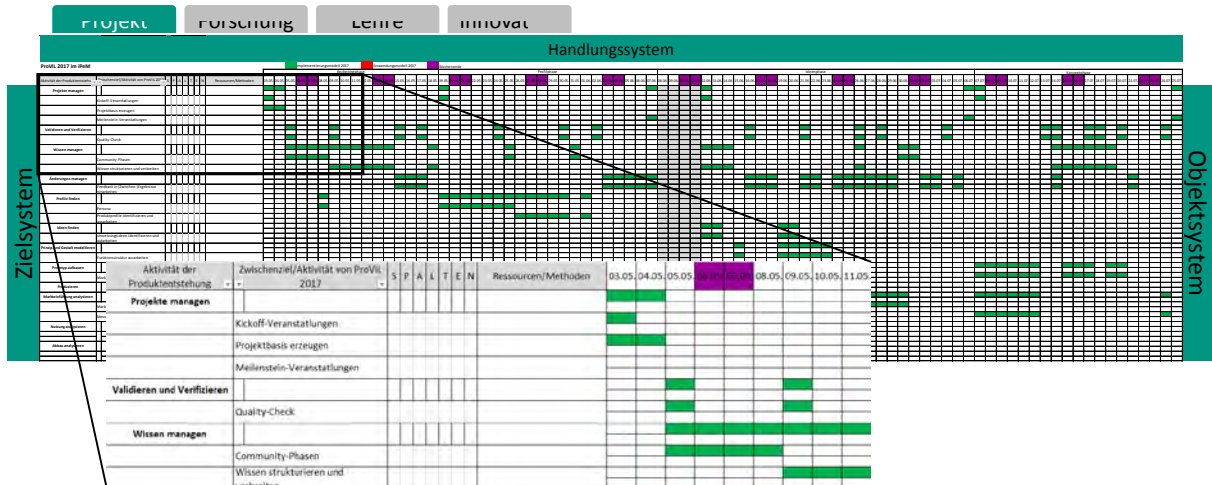


Bild 4: Das Implementierungsmodell von ProVIL 2017 im iPeM mit Fokus auf die Projektdurchführung

Diverse Aktivitäten von ProVIL ziehen sich über den gesamten Projektverlauf hinweg. Dazu zählen die Makroaktivitäten Projekte managen, Validieren und Verifizieren, Wissen managen und Änderungen managen. Die hier zugeordneten ProVIL-Aktivitäten erfolgen iterativ über den gesamten Projektverlauf, wie beispielsweise Quality-Checks. Diese Aktivitäten sind der Makroaktivität Validieren und Verifizieren zugeordnet, da hier Zwischenergebnisse evaluiert und durch Feedback qualitativ gehoben werden. Die nachfolgenden Makroaktivitäten enthalten die durchzuführenden Aufgaben, um innovative Produktkonzepte zu entwickeln. So beginnen die Studierenden mit der Erstellung sogenannter Personas um den Kunden und seine Bedürfnisse besser zu verstehen. Basierend auf diesem Wissen erzeugen die Studierenden Produktprofile. In der nachfolgenden Projektphase sind die ProVIL-Aktivitäten drei Makroaktivitäten zugeordnet. Zum einen beginnen die Studierenden damit Ideen für die Umsetzung des Produktprofils zu erzeugen. Anschließend arbeitet ein Team daran das Prinzip und die Gestalt zu modellieren, während ein anderes Team parallel ein Ideenvideo erstellt, welches für das Marketing verwendet werden kann. Das Simultaneous Engineering setzt sich in der nachfolgenden Projektphase fort, indem ein Team für das Marketing die Abschlussveranstaltung plant und ein anderes Team das Mockup der Produktidee erstellt und validiert.

7 Diskussion und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird aufgezeigt, wie sich Synergiepotentiale und Zielkonflikte zwischen den Dimensionen Forschung, Lehre und Innovation identifizieren lassen. Weiterführend werden diese Synergiepotentiale beschrieben und in Handlungsbedarfe überführt. Hierbei zeigt sich, dass sich Synergiepotentiale häufig durch ein gezieltes Management der Stakeholder, wie beispielsweise der frühzeitigen Einbeziehung von Forschungspartnern, realisieren lassen. Weiterhin bestehen Synergiepotentiale, die keinerlei weitere Aktivität erfordern und in den kommenden Jahren auf Grundlage der geplanten Ausweitung von ProVIL auf bis zu 150 Studierende ohnehin realisiert werden. Die Explikation dieser Zusammenhänge ist dennoch sehr hilfreich, beispielsweise um bei geförderter Forschung einen positiven Beitrag auch für den Bereich der Lehre aufzeigen zu können. Darüber hinaus

zeigt sich, dass aus den Rückmeldungen aller beteiligten Stakeholder sowie strategischen Überlegungen weitere Handlungsbedarfe abgeleitet werden können. Hierbei muss kritisch bemerkt werden, dass Feedback von Projektpartner und Inno-Coaches nicht regelmäßig erhoben wurde, wodurch möglicherweise Impulse zur Weiterentwicklung von ProVIL verloren gingen. Die Abbildung von ProVIL 2017 im iPeM ermöglicht es schließlich, umfangreiches Erfahrungswissen in den Dimensionen Forschung, Lehre und Innovation zu explizieren. Dies ist vor allem auch im Sinne des institutsinternen Wissenstransfers und vor dem Hintergrund wechselnder Projektleiter eine wesentliche Anforderung. Zusätzlich ermöglicht die Abbildung im iPeM in der Zukunft die Erzeugung eines Referenzprozesses, der dann als verallgemeinerter Projektablauf allen weiteren ProVIL-Projekten zu Grunde gelegt werden kann. Derzeit wird begleitend zu ProVIL 2017 ein solcher Referenzprozess erstellt. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf der Integration eines kontinuierlichen 360°-Projektmonitorings, was es künftig erlauben wird, Rückmeldungen von Stakeholdern schneller als bisher nutzenstiftend in den Projektverlauf einfließen zu lassen.

Danksagung

Die Autoren danken den ProVIL-Teilnehmern, den Inno-Coaches, der HsKA sowie dem Projektpartner Porsche für die vielfältigen Rückmeldungen in ProVIL 2016. Diese Publikation entstand teilweise durch Förderung im Rahmen des Projektes Science2Society (Projektnummer 693651), welches von der Europäischen Kommission gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- Aggarwal 1999 AGGARWAL, Raj: Technology and Globalization as Mutual Reinforcers in Business: Reorienting Strategic Thinking for the New Millennium. In: *Management International Review*. (1999), Nr. 2, Vol. 39, S. 83–104.
- Albers et al. 2017 ALBERS, Albert ; BURSAC, Nikola ; HEIMICKE, Jonas ; WALTER, Benjamin ; REIß, Nicolas: 20 years of co-creation using case based learning: An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering. In: *20th International Conference on Interactive Collaborative Learning 2017*. 2017 (eingereicht).
- Albers et al. 2016a ALBERS, Albert ; BURSAC, Nikola ; WALTER, Benjamin ; HAHN, Carsten ; SCHRÖDER, Jan: ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor. In: Stelzer, Ralph (Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben 2016. Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktion*. Dresden: TUDpress, 2016, S. 185–198.
- Albers et al. 2016b ALBERS, Albert ; REIß, Nicolas ; BURSAC, Nikola ; RICHTER, Thilo: The integrated Product engineering Model (iPeM) in context of the product generation engineering. In: *26th CIRP Design Conference*.
- Albers et al. 2016c ALBERS, Albert ; REIß, Nicolas ; BURSAC, Nikola; BREITSCHUH, Jan: 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In: *NordDesign 2016*. Trondheim: 2016.
- Albers et al. 2015 ALBERS, Albert ; BURSAC, Nikola; WINTERGERST, Eike: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*. Stuttgart: 2015.
- Albers und Braun 2011 ALBERS, Albert ; BRAUN, Andreas: A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. In: *International Journal of Product Development* (2011), Vol. 15, S. 6–25.

- Albers et al. 2010 ALBERS, Albert ; BRAUN, Andreas ; MUSCHIK, Sabine: Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung. In: Maurer, M. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. München: Hanser, 2010, S. 87 – 96.
- Hemmer et al. 2006 HEMMER, Hans-Rimbert ; KRÜGER, Ralf ; SEITH, Jennifer: Ausländische Direktinvestitionen - Flankierende Maßnahmen des Staates. In: Dolzer, Rudolf; Herdegen, Matthias; Vogel, Bernhard (Hrsg.): *Auslandsinvestitionen. Ihre Bedeutung für Wirtschaftswachstum, Armutsbekämpfung und Rechtskultur*. Freiburg im Breisgau: Herder, 2006, S. 34–74.
- Meyer und Berger 2008 MEYER, Susanne ; BERGER, Martin: Internationalisation of R&D Activities of Austrian Firms: Strategic Drivers for Spatial Organisation (Working Paper Nr. 66), 2008.
- Nippa und Rosenberger 2007 NIPPA, Michael ; ROSENBERGER, Björn: Stand und Perspektiven des internationalen Innovationsmanagements. Grundlagen der Organisation und des Managements internationaler Innovationsprozesse. In: Engel, Kai; Nippa, Michael (Hrsg.): *Innovationsmanagement. Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2007, S. 165–192.
- Stahlecker et al. 2014 STAHLLECKER, Thomas ; MEYBORG, Mirja ; SCHNABL, Esther: *Die Sicherung der unternehmerischen Innovationsfähigkeit vor dem Hintergrund globalisierter Märkte. Aktuelle Situation und zukünftige Herausforderungen im IHK-Bezirk Karlsruhe*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2014.
- UNCTAD 2016 UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD) (Hrsg.): *World Investment Report 2016. Investor Nationality: Policy Challenges*. Geneva: United Nations Publication, 2016.
- Walter et al. 2016a WALTER, Benjamin ; ALBERS, Albert ; HAUPT, Fabian ; BURSAC, Nikola: Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab. In: Dieter Krause, et al. (Hrsg.): *Design for X. Beiträge zum 27. DfX-Symposium Oktober 2016*. Hamburg: Tutech Verlag, 2016, S. 283–296.
- Walter er al. 2016b WALTER, Benjamin ; ALBERS, Albert ; HECK, Michael ; BURSAC, Nikola: ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor: Anpassung einer kollaborativen Innovationsplattform zur Realisierung eines communityorientierten Innovationsprozesses. In: Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): *12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*. Paderborn: Universitätsverlag, 2016.
- Zanker und Horvat 2015 ZANKER, Christoph ; HORVAT, Djerdj: Globale FuE-Aktivitäten deutscher Unternehmen. Modernisierung der Produktion, Nr. 68. In: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Hrsg.): *Modernisierung der Produktion. Mitteilungen aus der ISI-Erhebung*. Karlsruhe: 2015.

Forschungsperspektiven für die durchgängige digitale Modellierung des Produktlebenszyklus

Markus Till¹, Ralf Stetter¹, Stephan Rudolph²

¹Hochschule Ravensburg-Weingarten, Fakultät Maschinenbau, Weingarten, Deutschland
till@hs-weingarten.de; stetter@hs-weingarten.de

²Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und
Raumfahrtkonstruktionen, Stuttgart, Deutschland
rudolph@isd.uni-stuttgart.de

Abstract: Eine zentrale Herausforderung für produzierende Unternehmen ist das ganzheitliche Engineering immer komplexer werdender Produkte. Vielversprechende Ansätze entstehen aus der digitalen Abbildung von interdisziplinären Produkt- und Prozessmodellen über deren gesamten Lebenszyklus hinweg. Zur Erforschung solcher Ansätze wurde im Jahr 2015 in Baden-Württemberg an vier Hochschulen und der Universität Stuttgart das Zentrum für angewandte Forschung (ZAFH) "Digitaler Produktlebenszyklus (DiP)" eingerichtet; dieses wird zu einem Drittel aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und zu zwei Dritteln durch das Land Baden-Württemberg gefördert. Ziel dieses ZAFH-Forschungsvorhabens ist die vollständige digitale Abbildung und maschinelle Ausführbarkeit des Produktlebenszyklus. Der besondere Ansatz im beschriebenen Projekt ist die Anwendung eines Engineering-Frameworks mit sogenannten graphenbasierten Entwurfssprachen, welche die Automation und Wiederverwendung von bereits bestehenden Engineering-Modellen und Engineering-Know-how ermöglichen. Dieser Ansatz bietet eine große Anzahl von Forschungsperspektiven, welche im Forschungsprojekt anhand von drei Anwendungsfällen beleuchtet werden.

Keywords: Produktlebenszyklus, Entwurfssprachen, digitale Modellierung

1 Engineering Framework mit graphenbasierten Entwurfssprachen

Graphenbasierte Entwurfssprachen sind eine neue Sichtweise auf die ganzheitliche Beschreibung des Produktlebenszyklus, die sich am Aufbau natürlicher Sprachen orientiert und in welcher Vokabeln und Regeln eine Grammatik bilden (Kröplin & Rudolph, 2005). Dabei bedeutet der Begriff der Entwurfssprache, dass jeder in dieser Grammatik zulässige Satz (d. h. eine regelgerechte Kombination der Vokabeln) einen gültigen Produktentwurf darstellt. Durch Entwurfssprachen steht somit ein sehr leistungsfähiges Engineering-Framework zur Verfügung, das auf maschinelle Abarbeitung und Wiederverwendung von Entwurfs- und Fertigungswissen abzielt und den Ingenieur durch automatische Modellgenerierung und Berechnungsautomation von Routinearbeiten entlastet (Groß & Rudolph, 2012). Graphenbasiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Knoten eines Graphen als abstrakter Platzhalter für reale Objekte dienen und stellvertretend für das Entwurfsobjekt eine Graphenrepräsentation maschinell verarbeitet wird.

Das Konzept graphenbasierter Entwurfssprachen auf Basis der UML (Unified Modeling Language) hat sich in den letzten zehn Jahren in eines der führenden generischen Engineering Frameworks für die Definition und automatisierte Ausführung von computergestützten Entwurfsprozessen im Bereich Entwurf komplexer Systeme (Cyber-Physical Systems) weiterentwickelt, siehe hierzu auch das EU-Projekt IDEALISM im EUREKA-Cluster-Programm (<https://itea3.org/project/idealism.html>). Dabei bietet UML gegenüber weiteren Modellierungsmöglichkeiten wie SysML den Vorteil, dass die Inhalte kompiliert werden können und mittels aktueller Werkzeuge (z. B. Compiler 43) direkt automatisiert in Geometriedaten überführt werden können.

In diesem Engineering Framework stellen die Ingenieurobjekte (Produktmodelle, etc.) den Wortschatz (d.h. die **Vokabeln**) dar; die erforderlichen Modelltransformationen stellen die **Regeln**, d.h. die Gram-

matik der Entwurfssprache dar (Groß & Rudolph 2012). Bild 1 bietet einen Überblick über den generischen Entwurfsprozess, welcher aus Vokabeln und Regeln ein konsistentes Modell in der Modellierungssprache ULM erzeugt und damit u.a. Simulationen in verschiedenen domänenspezifischen Werkzeugen erlaubt.

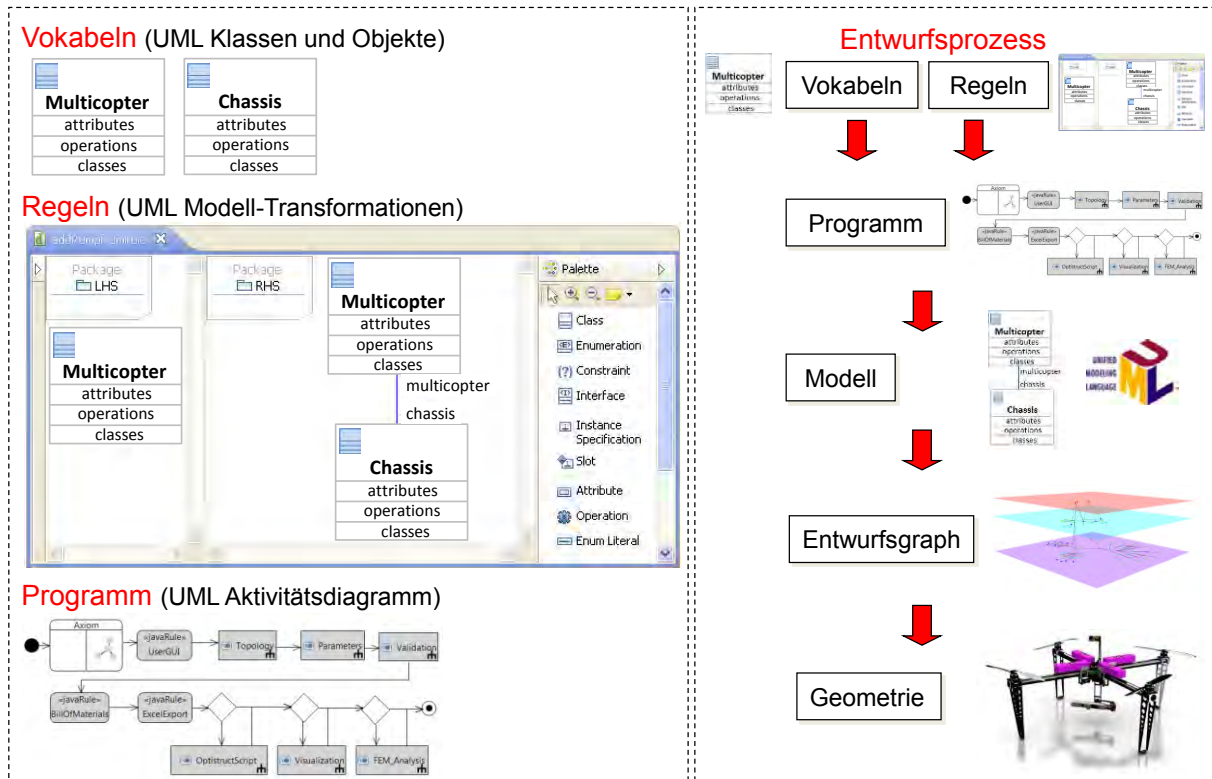


Bild 1: Elemente und Entwurfsprozess für die durchgängige digitale Modellierung

Vokabeln und Regeln einer Entwurfssprache werden in einem sogenannten "Produktionssystem" verknüpft. Durch einen hierfür entwickelten Compiler (in dieser Arbeit wird im Folgenden der Design Compiler 43 der IILS mbH (<http://www.iils.de>) verwendet) werden die Regeln ausgeführt, um die Klassen mit den Vokabeln zu instanziiieren. Dieser Kompilierungsprozess baut das zentrale Datenmodell auf. Von diesem zentralen Datenmodell aus generieren verschiedene Schnittstellen domänenspezifische, generische Modelle wie Geometrie-Modelle oder Simulationsmodelle in Bild 2.

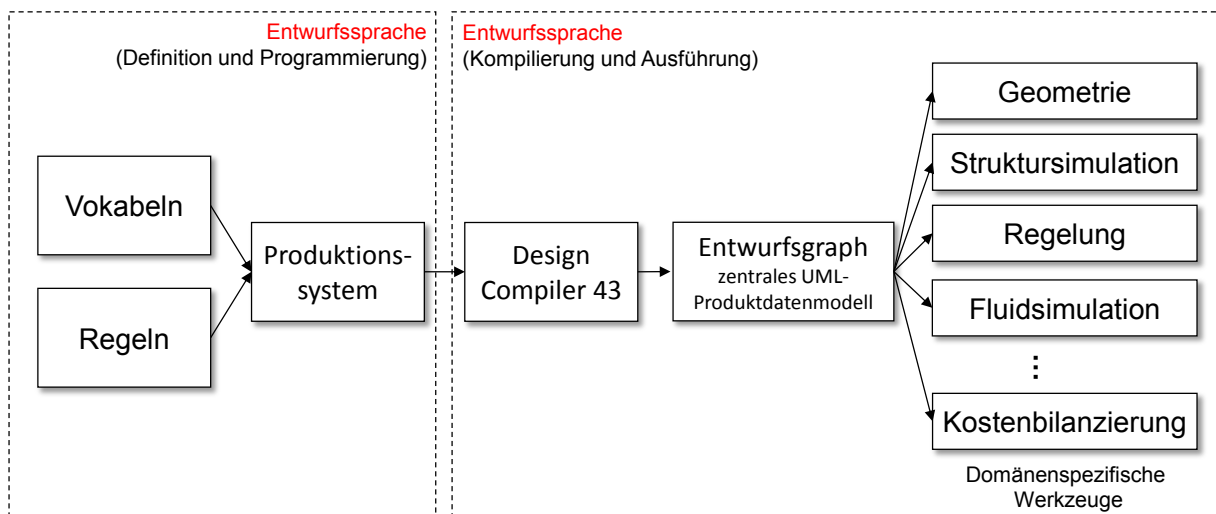


Bild 2: Einsatz graphenbasierter Entwurfssprachen

Die Informatik ist bekannt für ihre sehr schnellen Entwicklungszyklen und diese erfordern für den Softwareentwicklungsprozess sehr leistungsfähige abstrakte Beschreibungsformen (d.h. moderne graphische Modellierungssprachen, wie z.B. die UML) und stark automatisierbare Entwicklungswerkzeuge, um diese schnell getakteten Innovationszyklen zu erreichen. Die Unified Modeling Language ist eine international standardisierte Modellierungssprache, die objekt-orientiert und leicht erweiterbar ist und sehr flexible grafische Notationen und Sichten erlaubt (OMG 2015). Die UML ist in der Informatik weit verbreitet und wird von allen namhaften Entwicklungsplattformen unterstützt. Die UML enthält Basis-Komponenten (u.a. Klassen und Objekte, Eigenschaften und Methoden) und ermöglicht Relationen zwischen diesen Komponenten zu definieren (z.B. Vererbung, Assoziation,...). Der Hauptvorteil der UML ist die Integration und Standardisierung eines bestimmten Bereichs des Wissens und die Auswahl und Dokumentation der verschiedenen Modellierungskonzepte (Störrle 2005). Viele Software-Pakete sind verfügbar, welche die Erzeugung aller Arten von UML-Modellen und Meta-Modellen ermöglichen. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die Möglichkeit, UML-Modelle zu kompilieren und damit ausführbaren Code zu erzeugen (Stichwort: „Executable UML“). Diese Eigenschaften zusammen waren der Grund für die Entscheidung, UML als Basis für die Darstellung graphenbasierter Entwurfssprachen zu verwenden.

2 Stand der Technik

Weltweit wird insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie (Rockwell Corporation, The Boeing Company, Airbus Operations (vgl. Rudolph et al. 2013a und Rudolph et al. 2013b) intensiv an der Entwicklung leistungsfähiger Engineering-Frameworks für den Entwurf komplexer Systeme (z. B. Flugzeuge, Satelliten vgl. Groß & Rudolph 2012) gearbeitet. Diese Anstrengungen führten zu zahlreichen Publikationen, welche auf Aspekte der ganzheitlichen Produktmodellierung fokussieren. Hierbei wurden u.a. auch graphenbasierte Ansätze bereits seit Anfang der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts untersucht (vgl. Finger & Rinderle (1990)). Mehrere wissenschaftliche Publikationen fokussieren auf Produktlebenszyklen (z. B. Le Duigou & Bernard (2011)) und auf integrierte Produkt- und Prozessmodelle (für eine Übersicht siehe Eckert et al. (2015)). Der besondere Ansatz im beschriebenen Projekt ist die Anwendung eines Engineering-Frameworks mit graphenbasierten Entwurfssprachen, welche die Wiederverwendung von bereits bestehenden Engineering-Modellen und Engineering-Know-how ermöglichen. Hierbei wird die Modellierungssprache UML (Unified Modeling Language) verwendet, die im Bereich der Informatik sehr weit verbreitet ist und große Toolunterstützung erfährt und im Bereich des Systems Engineerings in Form des Dialekts SysML Verwendung findet. Aktuelle Forschungsarbeiten vertiefen und erweitern die zugrundeliegende Methodik sowie die eingesetzten Bibliotheken anhand verschiedener Anwendungsfälle in Richtung Digitale Fabrik und Rapid Prototyping (Arnold und Rudolph 2012, Groß und Rudolph 2012, Tonhäuser und Rudolph 2016; Ramsaier et al. 2016; Till et al. 2016).

3 Struktur der Forschungsarbeiten

Im Jahr 2015 wurde in Baden-Württemberg an vier Hochschulen und der Universität Stuttgart das Zentrum für angewandte Forschung (ZAFH) "Digitaler Produktlebenszyklus (DiP)" eingerichtet. Ziel des ZAFH-Forschungsvorhabens ist dabei die vollständige digitale Abbildung und maschinelle Ausführbarkeit des Produktlebenszyklus. Das bedeutet konkret: es sollen alle Stationen, angefangen vom Entwurf eines Produkts über die grundlegende Architektur und Geometrie, die Simulation und Validierung, die Produktion in der digitalen Fabrik und die übergreifende Kosten- und Energiebilanzierung in ein konsistentes digitales Gesamtmodell integriert werden. Die Umsetzung der digitalen Modellierung des Produktlebenszyklus erfolgt mittels eines sprachbasierten Engineering Frameworks aus graphenbasierten Entwurfssprachen. Die industrielle Umsetzung wird beispielhaft anhand dreier Anwendungsfälle demonstriert. Die Einbindung eines begleitenden Industriekreises namhafter Firmen aus Baden-Württemberg stellt dabei eine fortlaufende Evaluation der Ergebnisse und den direkten Anwendungsbezug sicher. Bild 3 zeigt die Grundstruktur der Forschungsarbeiten.

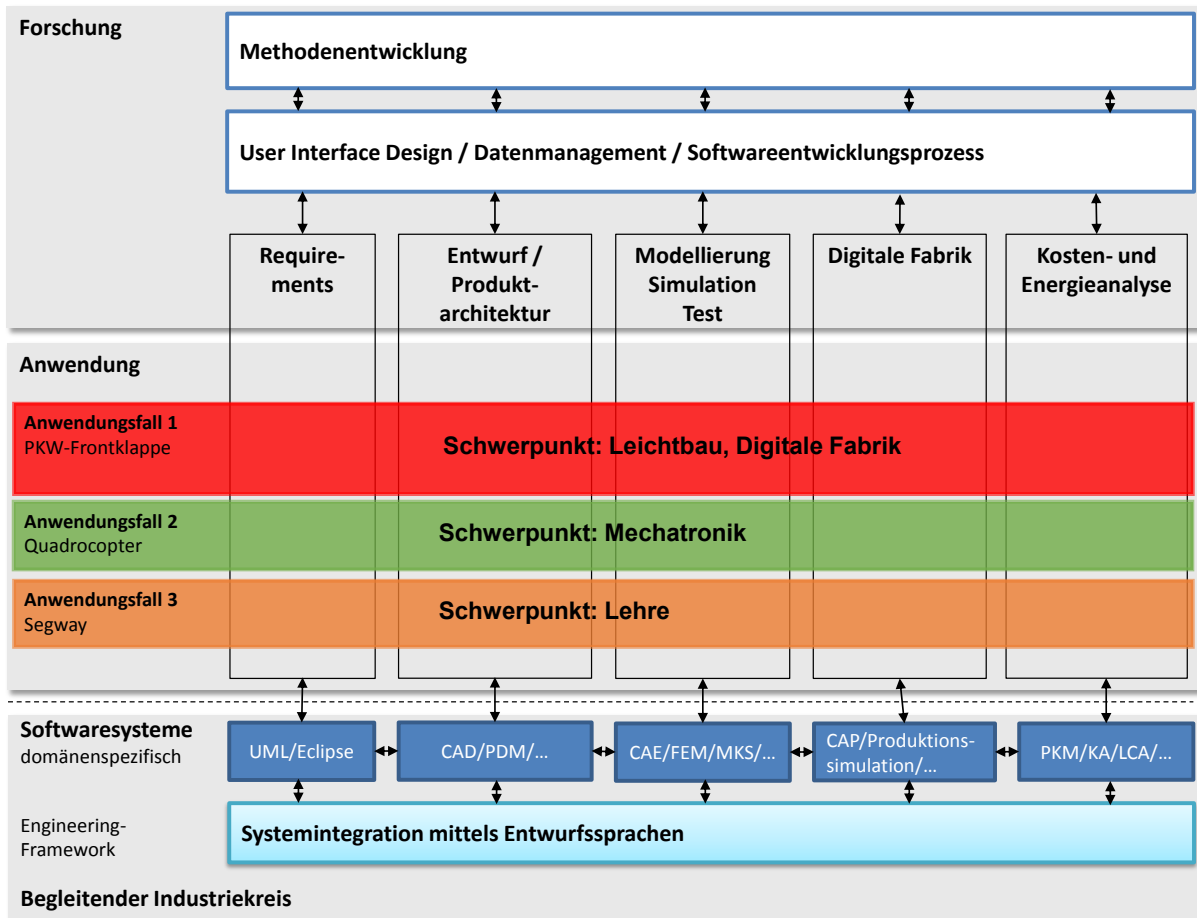


Bild 3: Struktur der Forschungsarbeiten

4 Anwendungsfälle im Forschungsprojekt

Bereits im Vorfeld konnte die Plausibilität der Anwendung graphenbasierter Entwurfssprachen für die durchgängige Verknüpfung des digitalen Entwurfs mit der digitalen Fabrik überzeugend dargestellt werden (vgl. z. B. Arnold und Rudolph 2012, Tonhäuser & Rudolph 2016). Die Anwendbarkeit für eine ganzheitliche digitale Abbildung kompletter Produktlebenszyklen soll im Projekt anhand von drei Anwendungsfällen gezeigt werden und damit konkrete Erkenntnisse für sinnvolle Vorgehensweisen und Hilfsmittel sowie Metamodelle und Bibliotheken erarbeitet werden.

Zentraler Anwendungsfall ist eine PKW-Frontklappe. Sie wird über alle Lebensphasen hinweg vollständig digital modelliert. Dabei werden verschiedene Phasen des Produktlebenszyklus detailliert analysiert, welche sich von Produktidee und Anforderungen über die eigentliche Produktentwicklung bis zur Produktion, Nutzung und Entsorgung erstrecken. Zentrale Forschungsperspektiven sind dabei auch die frühzeitige simulative Prognose entscheidender Produkteigenschaften (z. B. Kopfaufprall) und die zunehmenden digitalen Integrationsmöglichkeiten im Rahmen der Industrie 4.0. Auch die Prognose von Kosten und Energieaufwendungen ist Teil des Untersuchungsgebietes.

Der zweite Anwendungsfall "Multicopter" ist ein aus einer beliebigen Anzahl von Rotoren bestehendes, mechanisch relativ einfaches System, welches die Fähigkeit zum stabilen Flug vor allem durch komplexe Steuerungs- und Regelungstechnik erhält. Dabei sollen insbesondere Forschungsperspektiven der integrierten Entwicklung von Software-, Regelungs- und Diagnosefunktionalitäten betrachtet werden. Dritter Anwendungsfall ist ein elektrisch angetriebenes Einpersonen-Transportmittel (vgl. Segway®); dabei wird insbesondere auf ein Lehrkonzept fokussiert. Bild 4 zeigt einen Überblick der Anwendungsfälle zusammen mit den zentralen Herausforderungen.

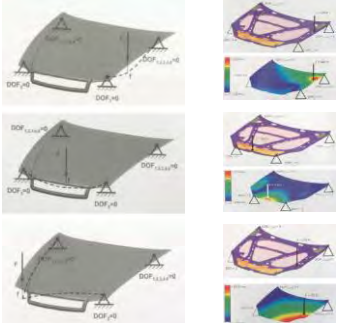


USE CASE	PKW-Frontklappe 	Quadrocopter 	Segway® 
HERAUSFORDERUNGEN	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexes Anforderungsprofil (Lastfälle, Fußgängerschutz, ...) • Bedeutung als Designelement (Class-A-Flächen, ...) • Aufwendige Simulationen • Komplexe Fertigung und Montage • Große Bedeutung der Bauweisen 	<ul style="list-style-type: none"> • Leichtbau • Topologieoptimierung • Verwendung von Standardkomponenten • Integration der Regelungstechnik • Integration von Diagnosefunktionalität 	<ul style="list-style-type: none"> • Integration der Regelungstechnik • Konfigurationsmanagement • Kostenmanagement • Montagefreundlichkeit • Produktsicherheit • Lehrkonzept

Bild 4: Anwendungsfälle und zentrale Herausforderungen

5 Forschungsperspektiven

In der Produktentwicklung aller drei Anwendungsfälle werden durchgehend graphenbasierte Entwurfssprachen verwendet. Zur detaillierten Diskussion der Potentiale dieser Art der Modellierung und der sich daraus ergebenden Forschungsperspektiven und -ansätze wird die Struktur der Forschungsarbeiten im Projekt herangezogen (vgl. Bild 3).

5.1 Requirements

Im Umfeld der Requirements bzw. Produkthanforderungen muss natürlich zunächst die umfangreiche Literatur in diesem Bereich berücksichtigt werden. Gute Zusammenfassungen der (auch internationalen Forschungsarbeiten) finden sich bei Darlington & Culley (2002), Jiao & Chen (2006) und Bühne & Herrmann (2015). Ebenfalls in die Betrachtung mit einzubeziehen sind die einschlägigen Normen der (ISO/IEC/IEEE 29148 (ISO 2011) „System- und Software-Engineering - Lebenszyklus-Prozesse – Anforderungsengineering“, ISO/IEC/IEEE 15288 (ISO 2015) „System- und Software-Engineering – System-Lebenszyklus-Prozesse“ und die DIN EN ISO 9001 (DIN EN ISO 2015) „Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen“). Schließlich sind die umfangreichen Software-Systeme für das Management von Anforderungen (Teamcenter Systems Engineering (Siemens 2016), Rational DOORS (IBM 2016) und Serena Dimensions RM (Serena 2016)) zu berücksichtigen.

Die zentrale Rolle der Anforderungen in der Produktentwicklung wird vielfach betont (vgl. z.B. Sudin et al. (2010)). Das Management von Anforderung über den gesamten Lebenszyklus hinweg stellt eine enorme Herausforderung dar, da sich Anforderungen über den Prozess hinweg vielfach verändern können und diese Tatsache sogar zum Scheitern von Projekten führen kann (Morkos et al. 2014). Auch Bernard & Irlinger (2016) berichten anhand aktueller Industrieerfahrungen, dass der Umgang mit und die Priorisierung von Anforderungen enormen Bedeutung für den Projekterfolg haben.

Im vorliegenden Projekt wurden bereits in allen Use-cases Anforderungen gesammelt und auf konventionelle Weise (Anforderungsliste, Lastenheft, Requirements Management Software (requirements editor RED der Technischen Universität Dänemark)) modelliert. Im Detail konnten auch industrielle

Anforderungen im Rahmen der Analyse einer Getriebeentwicklung untersucht werden (vgl. Holder et al. 2017).

Auf dieser Basis war es möglich, einen grundlegenden Ansatz zur Modellierung von Anforderungen in graphenbasierten Entwurfssprachen zu entwickeln (vgl. Bild 5).

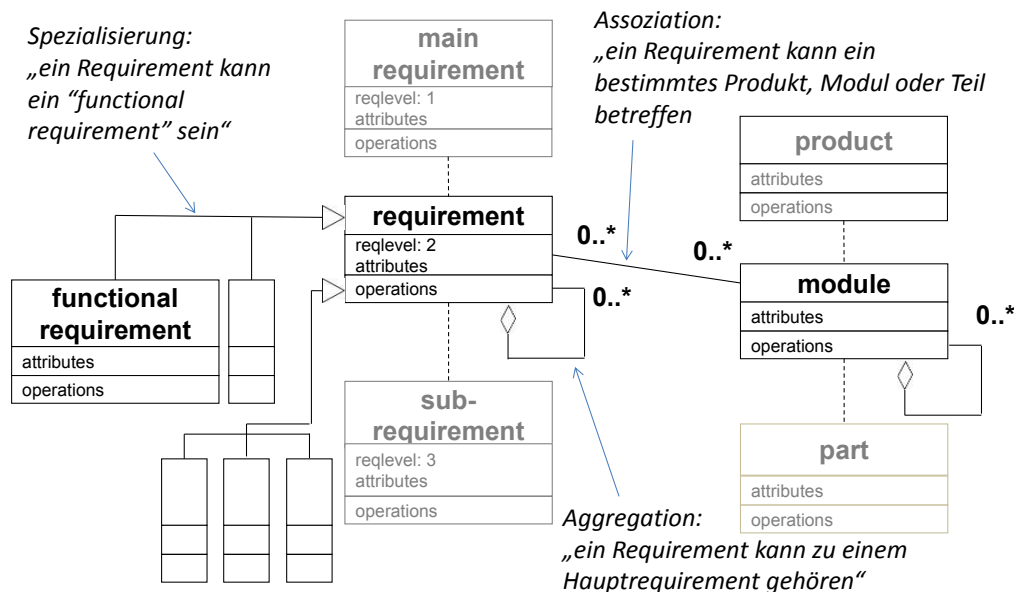


Bild 5: Grundsätzlicher Ansatz zu Modellierung von Anforderungen (vgl. Holder et al. 2017)

Darin wird zunächst berücksichtigt, dass Requirements bzw. Anforderungen verschiedenen Kategorien zugeordnet werden können (beispielsweise „functional requirement“). Zusätzlich kann abgebildet werden, dass Requirements zu übergeordneten Requirements („main requirement“) gehören können oder in untergeordnete Requirements aufgegliedert werden. Die besondere Qualität dieses Ansatz ist es, dass Requirements zusätzlich zu Produktmodulen und -komponenten zugeordnet werden können.

Für den weiteren Verlauf des Projekts ergeben sich folgende Forschungsperspektiven und -ansätze:

- Es wird untersucht, wie ein Anforderungsmodell in einer graphenbasierten Entwurfssprache das Management über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg unterstützt.
- Es wird untersucht, wie ein Anforderungsmodell in einer graphenbasierten Entwurfssprache die Suche nach noch fehlenden Anforderungen unterstützt.
- Es wird untersucht, wie ein Anforderungsmodell in einer graphenbasierten Entwurfssprache die Klassifizierung und Priorisierung von Anforderungen unterstützt.

Bei allen Forschungsperspektiven wird explizit auf die Anwenderakzeptanz abgehoben.

5.2 Entwurf und Produktarchitektur

In den letzten Jahren hat die Funktionsmodellierung als Hilfsmittel für den Entwurf erneut an Bedeutung gewonnen. Zu betonen sind insbesondere die Arbeiten von Eisenbart et al. (2016). Basierend auf einer sehr guten Übersicht der bisherigen Forschungsarbeiten erarbeiteten sie eine Modellierungsmethodik für Funktionen, die auch Aktoren und Zustände berücksichtigt. Da auch weitere Forschungsarbeiten die Vorteile der Modellierung von Zuständen ergaben (vgl. z. B. Stetter & Simundsson 2016), wurden in diese bei der Funktionsmodellierung in graphenbasierten Entwurfssprachen mit berücksichtigt (vgl. Ramsaier et al. 2017 – Bild 6).

Hierbei kann die Operation einer Funktion einem Akteur zugeordnet werden, beispielsweise einem Produktmodul oder einer Produktkomponente. Zudem können jeder Operation Ein- und Ausgangszustände sowie weitere Zustände (z. B. Bedingungszustände) zugeordnet werden, die Stationen einen Stoff-, Energie- oder Signalumsatzes repräsentieren. Für ein höheres Abstraktionsniveau der Funktionsmodellierung können Operationen als „Leiten“, „Ändern“, „Wandeln“, „Verzweigen“, „Vereinigen“ und „Speichern“ charakterisiert werden.

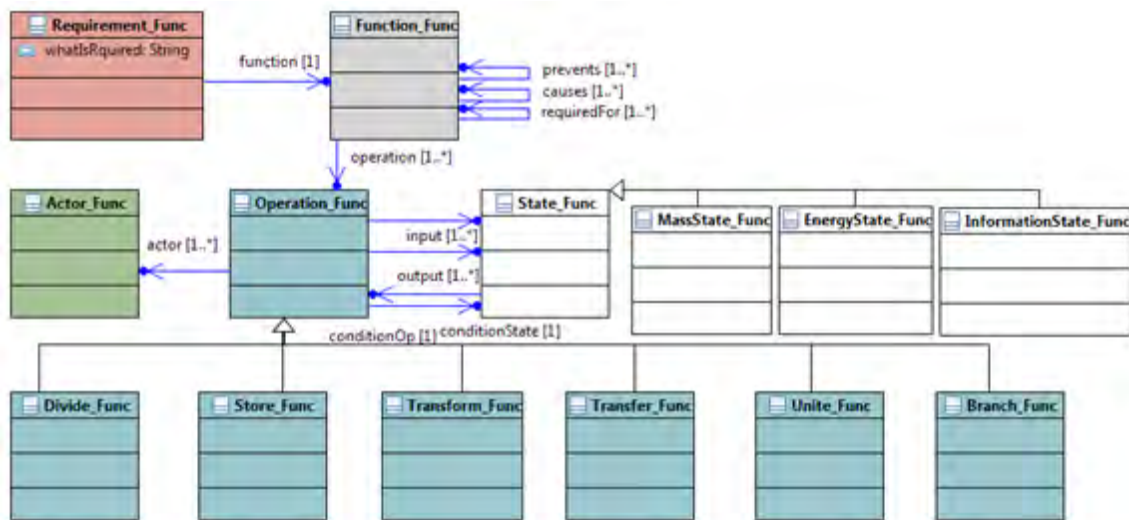


Bild 6: Klassendiagramm der Funktionsmodellierung (vgl. Ramsaier et al. 2017)

Die Funktionsmodellierung kann somit integraler Bestandteil der Produktmodellierung mit graphenbasierten Entwurfssprachen sein bzw. werden.

Für den weiteren Verlauf des Projekts ergeben sich folgende Forschungsperspektiven und -ansätze:

- Es wird untersucht, wie eine Funktionsmodellierung in einer graphenbasierten Entwurfssprache die Entwicklung der Produktarchitektur unterstützen kann.
- Es wird untersucht, wie eine Funktionsmodellierung in einer graphenbasierten Entwurfssprache an eine abstrakte Physikmodellierung gekoppelt werden kann und somit die Eingangsbasis für Simulationaufgaben darstellt.
- Es wird untersucht, wie eine Funktionsmodellierung in einer graphenbasierten Entwurfssprache als abstraktes, domänenübergreifende Produktmodell dienen kann.

5.3 Modellierung, Simulation und Test

Ein besonderer Vorteil des beschriebenen Engineering-Framework ist es, dass aus einem konsistenten Modell automatisiert weitere Modelle in verschiedenen generischen Formaten für die Simulation in verschiedenen Domänen generiert werden können (vgl. Bild 2), die in der Informatik als „Views“ bezeichnet werden. Hierdurch ergeben sich enorme Möglichkeiten für eine Exploration des Entwurfsraums. Zwar erlauben schon heute parametrische Systeme eine Exploration auf der Basis von Produktparametern. Bei Verwendung einer graphenbasierten Entwurfssprache können zusätzlich Variationen der Produktkonfiguration erzeugt werden und damit der Entwurfsraum drastisch erweitert werden.

Für den weiteren Verlauf des Projekts ergeben sich folgende Forschungsperspektiven und -ansätze:

- Es wird untersucht, wie durch Einsatz einer graphenbasierten Entwurfssprache eine effektive und effiziente Exploration des Entwurfsraums auf Basis von Produktparametern und Produktkonfigurationen ermöglicht wird.
- Es wird untersucht, wie an graphenbasierte Entwurfssprache angekoppelte Simulationen (FEM, MKS, CFD) mit entsprechenden Entwurfsbewertungsverfahren kombiniert werden können.
- Es wird untersucht, wie an eine graphenbasierten Entwurfssprache angekoppelte Simulationen mit Verfahren und Prozessen der statistischen Versuchsplanung kombiniert werden können.
- Es wird untersucht, wie Topologieoptimierungstools und -prozesse an eine graphenbasierte Entwurfssprache angekoppelt werden können.

5.4 Digitale Fabrik

Eine zentrale Forschungsperspektive im Bereich ergibt sich aus der Notwendigkeit, Produktmodule und -komponenten mit Schritten des Fertigungs- und Montageprozesses sinnvoll zu koppeln, da sich nur so ein konsistentes Produkt- und Prozessmodell in einer graphenbasierten Entwurfssprache realisieren lässt. Hierbei kann auf Vorarbeiten aus dem Konsortium (Arnold und Rudolph 2012) und in der Literatur zurückgegriffen werden, beispielhaft seien hier die Arbeiten von Vielhaber (2005) erwähnt.

Weitere zentrale Forschungsperspektiven ergeben sich aus den Möglichkeiten in der Grobplanung modell- und regelbasierte Konfigurationssysteme einzusetzen (vgl. Kiefer et al. 2016) und somit schneller verschiedenste Konfigurationen erstellen und bewerten zu können.

Im Bereich der Feinplanung ergeben sich durch Industrie 4.0 neue Anwendungsfelder für die Simulation (vgl. Beisheim & Kiesel 2014). Zudem spielt in diesem Bereich heute die virtuelle Inbetriebnahme eine zentrale Rolle.

Für den weiteren Verlauf des Projekts ergeben sich folgende Forschungsperspektiven und -ansätze:

- Es wird untersucht, wie die Modellierung von Fertigungs- und Montageprozessen in einer graphenbasierten Entwurfssprache an die Produktstruktur gekoppelt werden kann.
- Es wird untersucht, wie eine gekoppelte Produkt- und Prozessmodellierung in einer graphenbasierten Entwurfssprache zu einer Exploration des Entwurfsraum für die Grobplanung in der digitalen Fabrik genutzt werden kann.
- Es wird untersucht, wie eine gekoppelte Produkt- und Prozessmodellierung in einer graphenbasierten Entwurfssprache für Simulationen der Digital Fabrik genutzt werden kann und welche Datenformate dabei an die Entwurfssprache angekoppelt werden können.

5.5 Kosten- und Energieanalyse

Etwa 70 bis 80 Prozent der durch ein Produkt verursachten Kosten sowie der in Herstellung, Betrieb und Entsorgung verbrauchten Energie werden schon im Produktdesign festgelegt (vgl. Stetter et al. 2015). Daher wird auf diesen Schwerpunkt fokussiert; es ergeben sich folgende Forschungsperspektiven und -ansätze:

- Es wird untersucht, wie durch Einsatz einer graphenbasierten Entwurfssprache tiefgreifende Kosten- und Energieanalysen bereits in der Entwurfsphase ermöglicht werden.
- Es wird untersucht, wie durch Einsatz einer graphenbasierten Entwurfssprache Erkenntnisse aus dem Betrieb und der Nachkalkulation von Produkten in die Entwurfsphase strukturiert zurückgeführt werden können

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die im letzten Abschnitt aufgeführten Forschungsperspektiven in den verschiedenen Phasen bilden die Basis für die zukünftigen Arbeiten im Forschungsprojekt.

Danksagung

Die beschriebenen Arbeiten im Rahmen des ZAFH „Digitaler Produktlebenszyklus“ (Information unter <https://dip.reutlingen-university.de/>) werden gefördert mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Baden-Württemberg (Information unter: www.rwb-efre.baden-wuerttemberg.de).

Literatur

Arnold und Rudolph 2012

ARNOLD, Peter; RUDOLPH, Stephan: *Bridging the Gap between Product Design and Product Manufacturing by Means of Graph-Based Design Languages*. In: Proceedings of TMCE 2012.

- Beisheim und Kiesel 2014 Beisheim, N.; Kiesel, M.: Neue Anwendungsfelder für die Simulation. In: Forschungsreport ... für den Maschinenbau in Baden-Württemberg; Bingen : Public Verlag, 2014.
- Bernard und Irlinger 2016 BERNARD, R.; IRLINGER, R.: About watches and cars: winning R&D strategies in two branches. Presentation at the International Symposium "Engineering Design – The Art of Building Networks"; Garching, 2016.
- Bühne und Herrmann 2015 BÜHNE, S.; HERRMANN, A.: Handbuch Requirements Management nach IREB Standard. Aus- und Weiterbildung zum IREB Certified Professional for Requirements Engineering Advanced Level "Requirements Management". IREB e.V.: 2015.
- Darlington und Culley 2002 DARLINGTON, M. J.; CULLEY, S. J.: Current research in the engineering design requirement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 216(2002), 375-388.
- DIN EN ISO 2015 DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen, 2015.
- Eckert et al. 2015 ECKERT, C.; ALBERS, A.; BURSAC, N.; CHEN, H. X.; CLARKSON, P. J.; GERICKE, K.; GLADYSZ, B.; MAIER, J. F.; RACHENKOVA, G.; SHAPIRO D.; WYNN D.: *Integrated Product and Process Models: Towards an Integrated Framework and Review*. In: Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15), Milan, Italy, 27.-30.07.2015.
- Eisenbart et al. 2016 EISENBART, B., GERICKE, K., BLESSING, T. M., MCALOONE, T.C.: A DSM-based framework for integrated function modelling: concept, application and evaluation. In: Research in Engineering Design (2016).
- Finger und Rinderle 1990 FINGER, Susan; RINDERLE, James R.: *A transformational approach to mechanical design using a bond graph grammar*. Technical Report. Carnegie Mellon University. Engineering Design Center. 1990.
- Groß und Rudolph 2012 GROß, Johannes; RUDOLPH, Stephan: *Generating simulation models from UML – a FireSat example*. In: Proceedings of the 2012 Symposium on Theory of Modeling and Simulation – DEVS Integrative M&S Symposium. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2012.
- Holder et al. 2017 Holder, K.; Zech, A.; Ramsaier, M.; Stetter, R.; Niedermeier, H.-P.; Rudolph, S.; Till, M.: Model based requirements management in gear systems design based on graph-based design languages. Eingereicht bei der International Conference on Engineering Design ICED 17.
- IBM 2016 Rational DOORS. <http://www-03.ibm.com/software/products/de/ratidoor> (Zugriff 2016).
- ISO 2015 ISO/IEC/IEEE 15288: System- und Software-Engineering - System-Lebenszyklus-Prozesse, 2015.
- ISO 2011 ISO/IEC/IEEE 29148: System-und Software-Engineering - Lebenszyklus-Prozesse – Anforderungsengineering, 2011.
- Jiao und Chen 2006 JIAO, J.; CHEN, C.H.: Customer requirement management in product development: A review of research issues. Concurrent Engineering Research and Application, 14(3) (2006), pp. 173-185.
- Kiefer et al. 2016 Kiefer, J.; Allegrett, S.; Breckle, T.: Quality- and Lifecycle-oriented Production Engineering in Automotive Industry. In: Teti, R. (Ed.): Proceedings of the 10th Conference on Intelligent Computation Manufacturing Engineering (CIRP ICME '16).

- Kröplin und Rudolph 2005 KRÖPLIN, Bernd; RUDOLPH, Stephan: Entwurfsgrammatiken – Ein Paradigmenwechsel?. *Der Prüflingenieur*, 26, 34-43, 2005.
- Le Duigou und Bernard 2011 Le Duigou, Julien; Bernard, Alain: Product Lifecycle Management Model for Design Information Management in Mechanical Field. In: *Proceedings of the 21st CIRP Design Conference*, Mar 2011, Daejeon, pp.207-213, 2011.
- Morkos et al. 2014 MORKOS, B.; MATHIESON, J.; SUMMERS, J.D.: Comparative analysis of requirements change prediction models: manual, linguistic, and neural network. In *Research in Engineering Design* (2014) 25.
- OMG 2015 Object Management Group: UML Superstructure Specification. 2.5. 2015.
- Ramsaier et al. 2016 RAMSAIER, Manuel; SPINDLER, Claudius; STETTER, Ralf; RUDOLPH, Stephan, TILL, Markus: Digital representation in multicopter design along the product life-cycle. In: Teti, R. (Ed.): *Proceedings of the 10th Conference on Intelligent Computation Manufacturing Engineering (CIRP ICME '16)*.
- Ramsaier et al. 2017 Ramsaier, M.; Holder, K.; Zech, A.; Stetter, R.; Rudolph, S.; Till, M.: Digital representation of product functions in multicopter design. *Angenommen bei der International Conference on Engineering Design ICED 17*.
- Serena 2016 Serena Dimensions RM. <http://www.serena.com/index.php/de/products/more-products/dimensions-rm/> (Zugriff 2016)
- Siemens 2016 Siemens: Teamcenter systems engineering. https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/teamcenter/systems-engineering-software (Zugriff 2016).
- Stetter et al. 2015 STETTER, R.; WITCZAK, P.; WITCZAK, M.; KAUF, F.; STAIGER, B.; SPINDLER, C.: Development of a System for Production Energy Prognosis. In: Weber, C.; Husung, S.; Cascini, G.; Cantamessa, M.; Marjanovic, D.; Bordegoni, M. (Eds.): *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 1: Design for Life*, Milan, Italy, 27-30.07.2015, pp. 107-116.
- Stetter und Simundsson 2016 STETTER, R.; SIMUNDSSON, A.: Systematic Product Development of Control and Diagnosis Functionalities. In: *Proceedings of the Conference of Advanced Control and Diagnosis ACD 2016*, 17th and 18th November 2016, Lille, France.
- Störrle 2005 STÖRRLE, Harald; UML 2 für Studenten. München: Pearson 2005.
- Sudin et al. 2010 SUDIN, M.N.; AHMED-KRISTENSEN, S.; ANDREASEN, M.M.: The role of a specification in the design process: a case study. In: *Proceedings of the International Design Conference - Design 2010 in Dubrovnik*, 2010.
- Till et al. 2016 TILL, Markus; STETTER, Ralf; Rudolph, Stephan: Multi-disziplinäre digitale Repräsentation des Produktlebenszyklus auf der Basis graphenbasierter Entwurfssprachen. In: *Forschungsreport Baden-Württemberg 2016*. Bingen: Public, 2016. S. 3 – 6. ISSN 2196-8659.
- Tönhäuser und Rudolph 2016 TONHÄUSER, Claudia; RUDOLPH, Stefan: *Individual Coffee Maker Design Using Graph-Based Design Languages*. In: *Proceedings of the conference design computing and cognition (DCC '16)*, 27TH TO 29TH JUNE 2016.
- Vielhaber 2005 Vielhaber, M.: Assembly Oriented Design. Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus. *Disseration Universität des Saarlandes*, 2005

EIN BEITRAG ZUR MODELLIERUNG KONSTRUKTIVER LÖSUNGSRÄUME

Paul Christoph Gembarski¹, Roland Lachmayer¹,

¹Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Hannover, Deutschland
gembarski@ipeg.uni-hannover.de

Abstract: Heutige Werkzeuge zur rechnerunterstützten Konstruktion erlauben durch Parametrik und Feature-Technik die Beschreibung eines konstruktiven Lösungsraums, aus dem Varianten für definierte Anforderungen konfiguriert werden können. Im vorliegenden Beitrag wird die Entwicklung eines solchen konstruktiven Lösungsraumes diskutiert. Nach der Vorstellung von unterschiedlichen Konzepten und Sichtweisen auf konstruktive Lösungsräume wird ein Fallbeispiel aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung untersucht. Die Erstellung der parametrischen CAD-Modelle wird anschließend kurz dargestellt, wobei mit der Parameterraum-Matrix ein Hilfsmittel vorgestellt wird, mit dem die Planung und der Aufbau von CAD-Modellen und ihrer Parametrik unterstützt werden kann.

Keywords:

Konstruktive Lösungsräume, Wissensbasierte Konstruktion, Produktkonfiguration

1 Einleitung

Seit etwa 20 Jahren trägt die Verwendung von rechnerunterstützten Konstruktions- (CAD) und Entwicklungswerkzeugen (CAE) zur stetigen Steigerung der Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit vieler Unternehmen bei. Vor allem die Verwendung von parametrischen Konstruktionssystemen, bei der nicht nur die Gestalt eines Bauteils oder einer Baugruppe modelliert wird, sondern auch explizit die sie beschreibenden Parameter, führt prinzipiell zu großen Potenzialen in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion (Vajna 2009).

Insbesondere die Möglichkeit mathematische und logische Abhängigkeiten zwischen Parametern in einem CAD-System zu definieren erlaubt es, Wissen in expliziter Form in digitale Produktmodelle zu implementieren. Infolge dessen lassen sich abhängige und Führungsparameter voneinander unterscheiden. Bezogen auf die Variantenkonstruktion legt der Konstrukteur somit neben der Produktgestalt auch das Steuerungs- und Konfigurationskonzept für seine Komponente fest und beschreibt so einen Lösungsraum (Shah 2001).

1.1 Herausforderung

Beleuchtet man den Einsatz der Werkzeuge im betrieblichen Umfeld jedoch genauer, so stellt man fest, dass der Bedarf an einer neuen Produktvariante oder Änderungen am Produkt zu immer neuen CAD- und CAE-Modellen führen. Das CAD-Modell selbst wird im Hinblick auf eine einzelne Produktvariante erstellt, nicht mit Bezug zum Lösungsraum, der mögliche Varianten mit abdeckt. Häufiger Grund hierfür ist der Aufwand zur Planung von Parametrik und Modellstruktur. Je komplizierter die Geometrie und je größer die Baugruppen, desto bedeutender ist das Festlegen der Beziehungen zwischen Modellparametern und die Referenzierung von einzelnen Geometrieelementen, um robuste CAD-Modelle aufzubauen (Hirz 2013).

Betrachtet man jedoch Produkthanbieter, bei denen ein Geschäftsmodell aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung (engl. mass customization) die Grundlage des unternehmerischen Handelns ist, stellt die Entwicklung des konstruktiven Lösungsraums eines von drei Grundprinzipien dar. Als Werkzeuge werden unter anderem wissensbasierte Konstruktionssysteme im Allgemeinen und Produktkonfiguratoren im Speziellen benannt (Hvam 2008). Im folgenden Beitrag wird die Entwicklung eines solchen konstruktiven Lösungsraumes

anhand von einem Fallbeispiel untersucht. Anschließend wird diskutiert, welche grundsätzlichen Rückschlüsse dieses auf die Verwendung von parametrischen CAD-Systemen im heutigen Konstruktionsalltag ermöglicht. Darüber hinaus wird mit der Parameterraum-Matrix ein Hilfsmittel vorgestellt, mit dem Planung und Aufbau von CAD-Modellen und ihrer Parametrik unterstützt wird. Eine anschließende Diskussion von Abbildung und Verwaltung konstruktiver Lösungsräume in den heute üblichen Produktdatenmanagementsystemen würde den Rahmen dieses Beitrages sprengen und wird daher nicht fokussiert.

1.2 Struktur des Beitrags

Zunächst wird im folgenden Abschnitt 2 aus der Literatur das Verständnis für konstruktive Lösungsräume erarbeitet. In Abschnitt 3 wird dieses auf wiederkehrende Konstruktionsaufgaben angewendet und zur Wettbewerbsstrategie der kundenindividuellen Massenfertigung in Bezug gebracht. Abschnitt 4 beschreibt den Lösungsraum des Fallbeispiels „individualisierbare Teemaschine“. Darauf folgend wird in Abschnitt 5 diskutiert, welche Implikationen das Fallbeispiel auf die parametrische CAD-Konstruktion im Allgemeinen zulässt und wie die Parameterraum-Matrix die Planung der Parametrik eines Bauteils unterstützt. Der finale Abschnitt 6 fasst den Beitrag zusammen und stellt weiteren Forschungsbedarf dar.

2 Theoretischer Hintergrund

Der Begriff des Lösungsraums geht unter anderem auf Hubka zurück, der als solchen die Menge aller Maschinensysteme auffasst, die einen gegebenen Satz an Funktionen erfüllen (Hubka 1984). Ponn erweitert den Begriff in Bezug auf eine gegebene Aufgabenstellung und führt den Anforderungsraum als Menge aller Entwicklungsziele und geforderten Produkteigenschaften ein (Ponn 2016). Im Produktentwicklungsprozess werden durch Synthese-Analyseschleifen die geforderten Produkteigenschaften mit den Eigenschaften des Konstruktionsartefakts abgeglichen und angenähert (vgl. Bild 1).

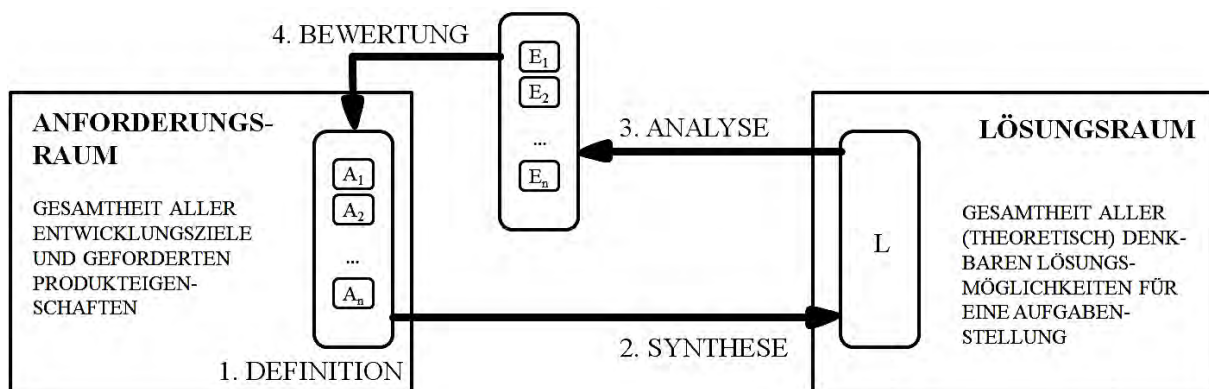
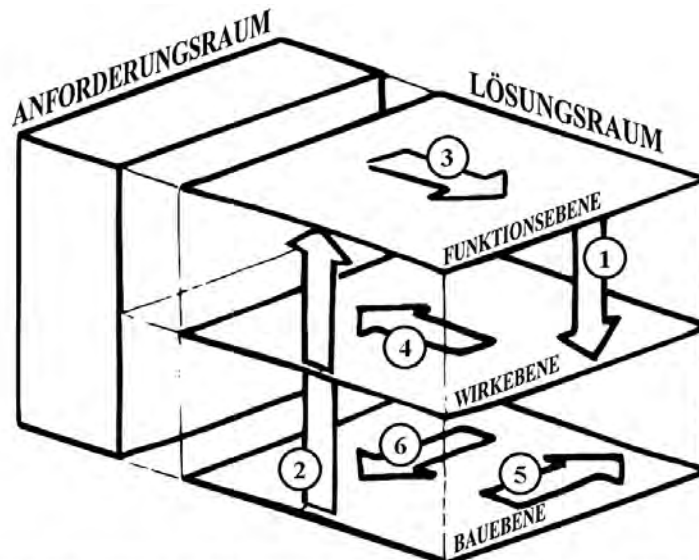


Bild 1: Anforderungsraum und Lösungsraum im Entwicklungsprozess (angepasst nach Ponn 2016)

Im Münchener Konkretisierungsmodell wird der Lösungsraum durch Ponn und Lindemann weiter strukturiert (vgl. Bild 2). Die Funktionsebene beinhaltet dabei eine Lösungsbeschreibung als abstrakte, zweckorientierte Darstellung von strukturierten Teilfunktionen. Diesen werden auf Wirkebene die passenden Konzepte und Lösungsprinzipien zugeordnet, während die Bauebene die Produktgestalt in Form von technischer Dokumentation beschreibt (Ponn und Lindemann 2011). Letzten Endes stellt das Münchener Konkretisierungsmodell den allgemeinen Konstruktionsprozess nach VDI 2221 bezogen auf den Lösungsraum dar. Interaktionen und Zusammenhänge zwischen Lösungsraum und Anforderungsraum werden im Münchener Konkretisierungsmodell lediglich im Rahmen des Anforderungsmanagements diskutiert, vorrangiges Ziel ist die Synthese der einen, die Anforderungen am besten erfüllenden Konstruktion.



- 1: KONKRETISIEREN (Z.B. ERMITTELN VON WIRKPRINZIPIEN ZU TEILFUNKTIONEN)
 2: ABSTRAHIEREN (Z.B. ERMITTELN DER FUNKTIONEN KONKRETER BAUTEILE)
 3: ZERLEGEN (Z.B. AUFTEILEN DER GESAMTFUNKTION IN TEILFUNKTIONEN)
 4: ZUSAMMENFÜGEN (Z.B. KOMBINIEREN VON LÖSUNGEN ZU EINEM GESAMTKONZEPT)
 5: VARIIEREN (Z.B. GENERIEREN ALTERNATIVER GESTALTUNGSIDEEN)
 6: EINSCHRÄNKEN (Z.B. AUSWAHL EINER GESTALTUNGSLÖSUNG)

Bild 2: Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten im Münchener Konkretisierungsmodell (angepasst nach Ponn und Lindemann 2011)

Im Rahmen seiner Konstruktionsmethode *Axiomatic Design* beschreibt Suh ebendiese Zusammenhänge detaillierter (Suh 2005). Der Ansatz beruht auf einem Domänenkonzept, das zwischen Kundendomäne, funktionaler Domäne, physischer Domäne und Prozessdomäne differenziert. Die Kundendomäne ist dabei als Menge aller Kundenanforderungen (KA) zu verstehen, während die funktionalen Anforderungen (FA) bereits deren lösungsneutrale Übersetzung in die Sprache der Konstruktion darstellen. Design Parameter (DP) sind die Repräsentation einer konstruktiven Lösung, die für eine funktionale Anforderung geeignet ist und stellen auf der obersten Hierarchieebene die Komponenten eines Systems dar. Diese lassen sich beispielsweise in Wirkräume/Wirkflächen und deren konkrete Parameter weiter dekomponieren. Als letztes Element stellen die Prozessvariablen (PV) die Kernparameter des Fertigungsprozesses dar, mit dem ein Design Parameter realisiert wird (vgl. Bild 3).

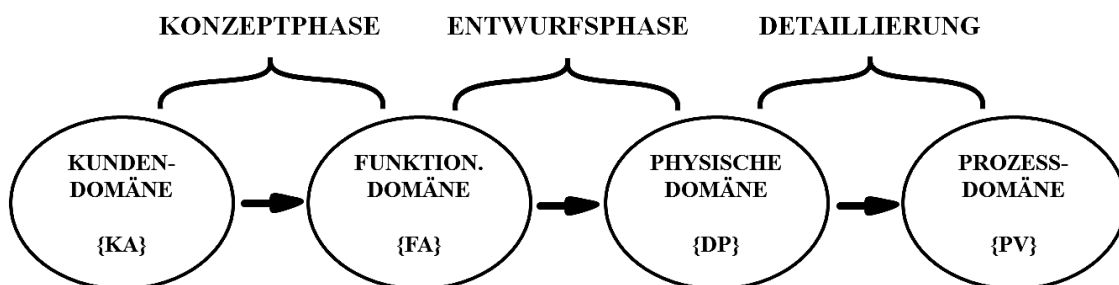


Bild 3: Domänen in Axiomatic Design (angepasst nach Suh 2005)

Der Entwicklungsprozess im Axiomatic Design wird durch die Domänen stark strukturiert und formalisiert. Es gilt hierbei das Grundprinzip, dass die Anforderungen einer Vorgängerdomäne mittels Entwurfsmatrizen auf die Lösungen der Folgedomäne abgebildet werden (dargestellt in Bild 4 am Beispiel von funktionalen Anforderungen zu Design Parametern eines Absetzkippers). Wichtiges Prinzip hierbei ist, dass das Konstruktionsproblem schrittweise in Teilprobleme dekomponiert wird. Im Domänenmodell führt dies zu iterativen Sprüngen zwischen zwei benachbarten Domänen, solange

bis exakt eine Lösung einer Anforderung zugeordnet werden kann. Für das Beispiel des Absetzkippers bedeutet dies, dass die Hydraulische Schwenkeinheit bis zu den einzelnen Parametern wie Größe der Ringfläche, Hub des Zylinders, etc. dekomponiert wird.

Hierbei sind zwei Axiome zu berücksichtigen, die der Methode ihren Namen gegeben haben: Zum einen besagt das *Unabhängigkeitsaxiom*, dass bei einer idealen Konstruktion nach der Dekomposition ein Design Parameter nur einer einzelnen funktionalen Anforderung zugeordnet werden kann. Auf diese Art und Weise wird sichergestellt, dass funktionale Anforderungen sich nicht gegenseitig bedingen und zyklische Abhängigkeiten entstehen.

Liegen alternative Entwurfsmatrizen vor, so besagt das *Informationsaxiom*, dass derjenige Entwurf zu favorisieren ist, der den geringsten Informationsgehalt besitzt. Diese Formulierung geht auf Shannons informationsbasierte Entropie zurück und gilt in der Informationstechnik als Maß für die strukturelle Komplexität. Franke verwendete dieses Maß beispielsweise in seinen Arbeiten zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses gleichbedeutend zu Suh, um Konstruktionsvarianten anhand ihrer strukturellen Komplexität zu vergleichen (Franke 1976).

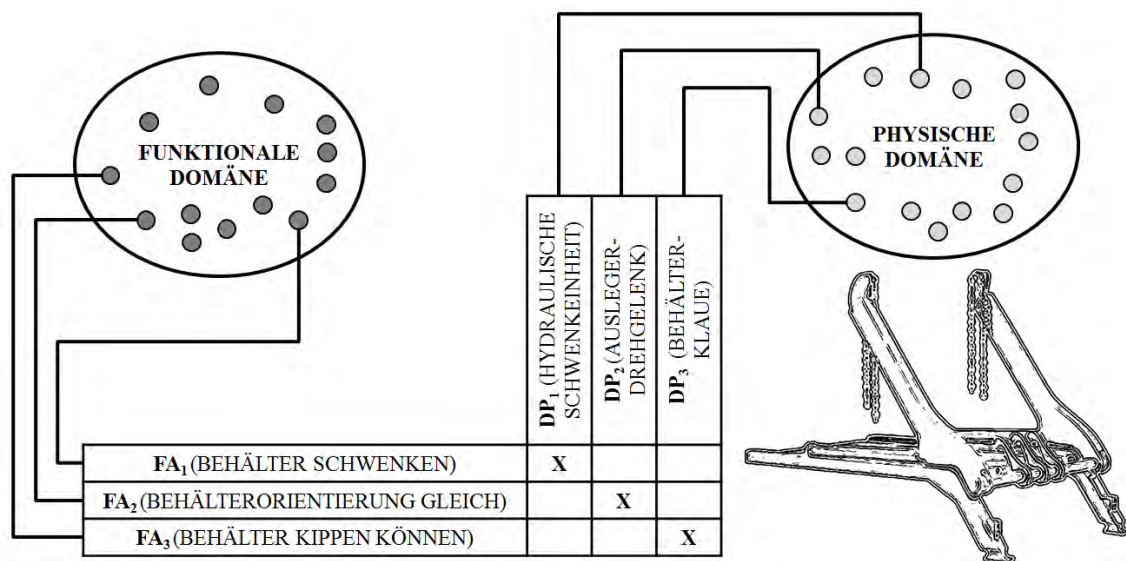


Bild 4: Abbildung von funktionalen Anforderungen auf Design Parameter in einer Entwurfsmatrix

Durch seinen Aufbau und den Prozess ist Axiomatic Design sehr gut geeignet, ungekoppelte, modulare Produkte hervorzubringen. Der Aufwand, die Notwendigkeit der quasi-mathematischen Modellierung und die für den Durchführenden nötige Expertise haben bisher jedoch einen breiten Durchbruch dieser Konstruktionsmethode behindert. Die Domänen lassen sich zwar als jeweilige Lösungsräume verstehen, das Ziel von Axiomatic Design ist aber ebenfalls die strukturierte Exploration, bis die eine, beste Konstruktion für eine Aufgabenstellung gefunden wurde. Im Vergleich zum Münchener Konkretisierungsmodell bezieht Suh jedoch die Produktion durch die Prozessvariablen ebenso wie die Beziehungen zwischen den einzelnen Domänen explizit mit ein.

3 Lösungsräume für wiederkehrende Konstruktionsaufgaben

Die vorgenannten Konzepte verstehen den Lösungsraum als Menge, in der eine Konstruktion zu finden ist, welche die gegebenen Anforderungen am besten erfüllt. Gero (1990) dreht diese Argumentation um und beschreibt in seinem Ansatz der *design prototypes* Räume, in denen bekannte Konstruktionen an andere Anforderungen angepasst werden können (vgl. Bild 5).

Demnach werden alle Konstruktionstätigkeiten, die ein vorhandenes Bauteil oder Produkt ausschließlich in ihren Parametern variieren, als *routine design* bezeichnet. Demgegenüber lassen sich *innovative design* und *creative design* als klassische Varianten- und Anpassungskonstruktion im Sinne der VDI2221 verstehen. Die Grenze von *creative design* markiert gleichzeitig das Ende der möglichen Variationsfähigkeit der Konstruktion.

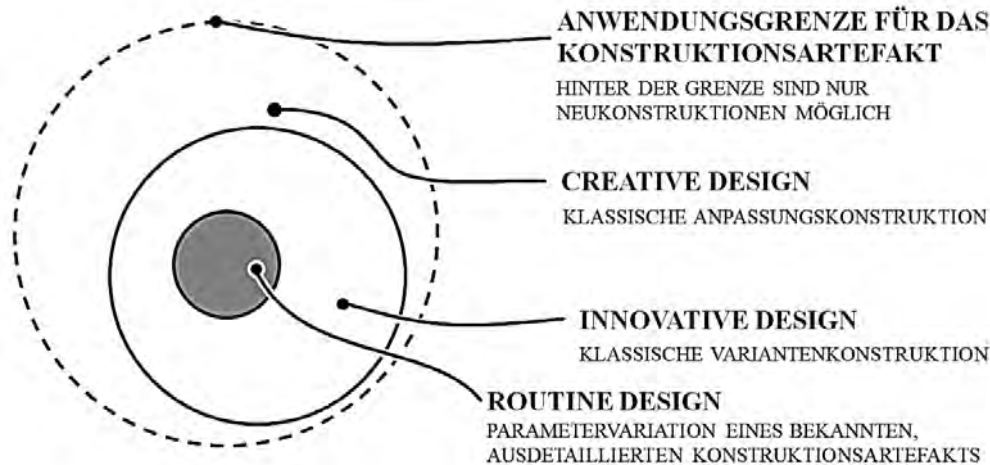


Bild 5: Design Prototypes (nach Gero 1990)

Gero postuliert damit ein wichtiges und anerkanntes Prinzip in der rechnerunterstützten Konstruktion, die Verwendung von Konstruktionsvorlagen, bzw. *design templates*. Ein solches *template* lässt sich im weitesten Sinne als parametrischer, updatefähiger und wiederverwendbarer Baustein in einem virtuellen Prototyp verstehen (Hirz 2013). Nach Cox (2000) sind in der Erstellung eines solchen *templates* die folgenden vier Schritte auszuführen:

1. Definition der Grenzen des Lösungsraums durch Erfahrung aus vergangenen Projekten
2. Umkehr des Konstruktionsprozesses vom Projekt in den Kontext des *templates*
3. Entwicklung eines generischen Parametermodells für das *template*
4. Festlegen des Konfigurationskonzepts für das *template*

Im Rahmen der technischen Produktkonfiguration wird dieses Grundgerüst durch die explizite Modellierung von Anforderungen und ihrer Übersetzung in die technische Spezifikation und zur Festlegung der Produktgestalt erweitert (Hvam et al. 2008). Durch den Einbezug von Methoden und Werkzeugen aus der wissensbasierten Konstruktion lassen sich hier einzelne Konstruktionsaufgaben im Rahmen des definierten Lösungsraums ggf. vollständig automatisieren, um so z.B. einem Endkunden die Konfiguration seines Produkts auf Basis eines Webkonfigurators zu ermöglichen. Um sicherzustellen, dass die gewählte Variante technisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar ist, wird der Lösungsraum eines solchen Konfigurators durch Restriktionen beschränkt. Dies sind zum einen Restriktionen, die sich aus dem Fertigungssystem ergeben, wie z.B. NC-Verfahrwege, Mindestwandstärken oder Größen von Transportbehältern (Gembariski et al. 2016). Weiterhin lassen sich wirtschaftliche Restriktionen formulieren, wie z.B. die Verwendung bestimmter Technologien nur bei definierten Preissegmenten, Gebinde- oder Losgröße, etc.

Zusammenfassend wird im Rahmen dieses Beitrags folgende Definition verwendet: *Der konstruktive Lösungsraum ist die Menge aller Lösungen oder Produktausprägungen, die für ein Anforderungsset gültig sind und die definierten Restriktionen aus Fertigung und Marketing genügen.*

4 Lösungsraum der Blende einer individualisierbaren Teemaschine

Im folgenden Abschnitt wird der Lösungsraum für eine individualisierte Teemaschine vorgestellt. Der Anbieter verfolgt ein Geschäftsmodell aus der kundenindividuellen Massenfertigung, bei dem der Endkunde durch einen Web-Konfigurator die Gestalt seiner Teemaschine mitbestimmen kann. Im vorliegenden Beispiel wird dies durch den Austausch von Blenden realisiert (vgl. Bild 6), die in das Gehäuse eingerastet und zum Austausch wieder freigegeben werden können. Auf diese Art und Weise lässt sich die Teemaschine an wechselnde Einrichtungskonzepte anpassen.



Bild 6: Individualisierbare Teemaschine mit verschiedenen Blenden

Der Vertrieb der Teemaschine ist auf zwei Kundengruppen ausgelegt: Zum einen Hoteliers, die sich von ihrem Wettbewerb zusätzlich abheben möchten, indem auch die elektrischen Geräte passend zum Einrichtungskonzept der unterschiedlichen Zimmerkategorien ausgewählt und abgestimmt sind. Hier wird ein weitgehend konstanter Bedarf mit Losgrößen bis zu 500 Stück geschätzt. Die zweite Kundengruppe besteht in Endverbrauchern, die bereit sind, für eine kundenindividuelle Teemaschine Premiumpreise zu bezahlen, jedoch in einer Durchschnittslosgröße von 2 Paar.

In beiden Fällen sind die Kunden in der Lage, das Profil der Blende sowie die obere und seitliche Kontur frei anpassen und zusätzlich die Farbe aus einem vorgegebenen Portfolio auswählen zu können. Da für die zweite Kundengruppe der Aufwand für die Werkzeuggestaltung unverhältnismäßige Kosten verursachen würde, wählt der Hersteller der Teemaschine als Fertigungsverfahren eine Laser-Sinter-Anlage. Als Werkstoff wird ABS bestimmt, was dazu führt, dass keine zusätzlichen Support-Strukturen für die Produktion berücksichtigt werden müssen, da das umliegende Pulverbett die Bauteile ausreichend abstützt.

Für die Gestaltung der Blenden müssen einzelne Restriktionen berücksichtigt werden. Das beinhaltet die minimale Wandstärke, die Größe der Prozesskammer und Form sowie Ausprägung der konstruktiven Schnittstellen zum Gehäuseträger. Da das Marketing einen Pauschalpreis für die Blende verlangen möchte, sind weiterhin Einschränkungen in der maximalen Tiefe der Blenden vorzusehen, so dass in einem Baujob mindestens 40 Blenden gefertigt werden können. Die Fertigungszeit beträgt ca. 72 Stunden, inklusive Reinigen der Bauteile, Tauchlackieren sowie Schleifen. Die einzelnen Blenden sind durchschnittlich innerhalb einer Woche versandfertig.

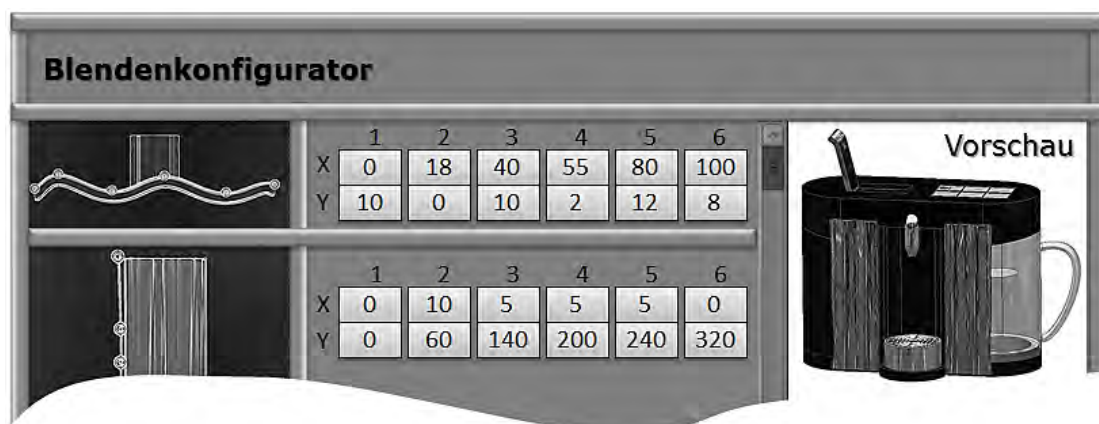


Bild 7: Auszug aus dem Blendenkonfigurator

Um dem einzelnen Kunden ein adäquates Kommunikationswerkzeug für die Gestaltung und Bestellung der Blenden zur Verfügung zu stellen, wurde ein online-Konfigurator implementiert (vgl. Bild 7). Profil und Konturen werden über die Eingabe von Interpolationspunkten alteriert, die Farbe aus einer Liste gewählt und ebenfalls visualisiert. Der Konfigurator stellt bei der Gestaltung automatisch die Einhaltung aller vorhandenen Restriktionen sicher und korrigiert ggf. Werte. Als zukünftige Erweiterung des Konfigurators wird der Anschluss eines Katalog- und Bewertungssystems an den Konfigurator vorgehalten. So können Nutzer ihre individuellen Designs mit andern Nutzern teilen und von ihnen bewerten lassen.

Die im Konfigurator eingegebenen Werte werden nach Fertigstellung der Blende an ein CAD-System übergeben, wo sie in einem parametrischen Modell weiterverarbeitet werden. Die Koordinatenpunkte der Konturen entsprechen hierbei den Interpolationspunkten innerhalb des CAD-Modells, ihre Anzahl lässt sich nur mit der Wahl eines alternativen *templates* ändern (z.B. planes Profil, Profil mit 4 Stützpunkten). Von dem CAD-Modell werden anschließend STL-Dateien erzeugt, die direkt an den Präprozessor der Laser-Sinter-Anlage weitergeleitet werden.

5 Lösungsraummodellierung in parametrischen CAD-Systemen

Vereint man den Entwicklungsprozess Axiomatic Design, die *design templates* sowie die Modellierung mittels Parametrik und Restriktionen, lassen sich konstruktive Lösungsräume geplant entwickeln, ohne dass es im Cox'schen Sinne bereits Erfahrungen aus Vorgängerprojekten gegeben haben muss. Wichtige Voraussetzung hierfür ist, dass im CAD-System, in dem der Lösungsraum dargestellt werden soll, unterschiedliche Formen der Parametersteuerung vorhanden sind. Die betrifft z.B. das Anlegen von Benutzerparametern, die Einbindung von Tabellenkalkulation oder Logikprogrammiersprachen. Für eine Übersicht von entsprechenden Möglichkeiten im CAD-System Autodesk Inventor wird auf Gembariski et al. 2015 verwiesen.

5.1 Erfassen von Anforderungen, Modellparametern und Restriktionen

Um die Parametrik eines Bauteils im Vorfeld zu planen, muss der Zusammenhang zwischen Anforderungen, Restriktionen und Modellparametern bekannt sein. Um die nötigen Informationen für ein Bauteil verdichtet darzustellen, wird von den Autoren die Parameterraum-Matrix verwendet (vgl. Bild 8).

Zentrales Element der Matrix stellt die Parameterliste des Bauteils dar. Hier werden die Modellparameter des Teils (also Bemaßungen und Feature-Parameter) buchgeführt. Bei komplizierteren Bauteilen mit einer Vielzahl von Parametern bietet sich eine Trennung zwischen Konfigurationsparametern und abhängigen oder sonstigen Parametern an (das „P:“ in der unten abgebildeten Matrix deutet auf Konfigurationsparameter hin, die nur auf das Bauteil beschränkt sind). In der dargestellten Matrix wird auf die Notation von Autodesk Inventor zurückgegriffen (Name, Einheit, Wert, Kommentar). Links von den Parametern werden die Anforderungen und ihr Einfluss auf die Modellparameter dargestellt. Je nach Kompliziertheit und Bedarf werden die Bezüge entweder als Zuordnung gekennzeichnet (wie dargestellt) oder es werden Formelzusammenhänge dokumentiert. Im rechten Teil erfolgt die Dokumentation der Restriktionen aus dem Fertigungsprozess (analog zu Suhs Prozessvariablen) und Nachbarbauteilen.

So lässt sich aus der Matrix herauslesen, dass der Parameter $P:aB_3X$ (äußerer Beschnitt 3. Punkt X) für die Erfüllung von den Anforderungen „Gestalt durch Anpassen des äußeren und oberen Beschnitts verändern“ und „Sichere Verbindung zum Gehäuseträger herstellen“ relevant ist. Die zweite Anforderung wird durch eine Nachbarbauteil-Restriktion verursacht, da der Interpolationspunkt in der Regel in Höhe des Dorns der Blende liegt. Weiterhin ergeben sich aus der Bauraum-Restriktion und der Restriktion für die Mindestanzahl an Blenden je Baujob zwei Wertebereiche, in denen die X-Position des Interpolationspunktes liegen darf. Für dieses Modell ist der kleinere Wertebereich entscheidend. Nimmt man diese Einschränkungen zusammen, so darf der Wertebereich des Parameters zwischen 82 und 125 mm liegen.

ANFORDERUNGEN					MODELLPARAMETER VON BLENDE LINKS									
Gestalt durch Anpassen des äußeren und oberen Beschnitts verändern	Gestalt durch Anpassen des Profils verändern	punktförmige Drucklast von 100 N an den Ecken ertragen	Sichere Verbindung zum Gehäuseträger herstellen	..	NAME	EINHEIT	WERT	KOMMENTAR						
x		x			P:MS	mm	5	Materialstärke						
					P:oB_1X	mm	120	oberer Beschnitt 1. Punkt X		0-250			0-125	
										
x			x		P:aB_3X	mm	120	äußerer Beschnitt 3. Punkt X	min. 82	0-250			0-125	
x			x		P:aB_3Y	mm	160	äußerer Beschnitt 3. Punkt Y		0-320				
										
				x	P:Dorn1_X	mm	60	Mittelpunkt Aufnahmedorn 1 X						
										
				x	P:Dorn_D	mm	16	Durchmesser Aufnahmedorn	16					
				x	P:Dorn_T	mm	20	Tiefe des Aufnahmedorns im Gehäuse	20					
										
					r	mm	1,5	Rundungsradius						
									Nachbarbauteile	Bauraum Maschine	Auflösung Maschine	Mindestanzahl Baujobs	..	
									RESTRIKTIONEN					

Bild 8: Parameterraum-Matrix der Blende (Auszug)

Um die Verknüpfung zwischen Blende und Gehäuseträger interaktiv zu gestalten, ließe sich der Positionsparameter der Aufnahmebohrung aus dem Gehäuseträger anstelle des Wertes in die Parameter-Raum-Matrix eintragen und ggf. automatisiert aus dem Gehäuse auslesen. Wird das Gehäuse im Nachhinein geändert, passt sich die entsprechende Restriktion mit an.

Gleiches gilt für die Fertigungsprozessrestriktionen: Sollte der Anbieter der Teemaschine eine Laser-Sinter-Anlage mit größerer Prozesskammer anschaffen, sind die Restriktionen für Bauraum und Mindestzahl je Baujob zu aktualisieren.

5.2 Variantengerechter Modellaufbau

Im Idealfall lassen sich die Parameter der Parameterraum-Matrix direkt als Satz, z.B. durch eine Excel-Kopplung, in das zu konstruierende Bauteil importieren. Prinzipiell wird dadurch zwar ein erhöhter Speicherplatzbedarf der einzelnen Bauteile erzeugt, weil neben den Modellbemaßungen die importierten Parameter mit verwaltet werden müssen. Bei den bisherigen Implementierungen ist dieser Effekt und die Erhöhung der Neuaufbauzeit des CAD-Modells jedoch vernachlässigbar klein.

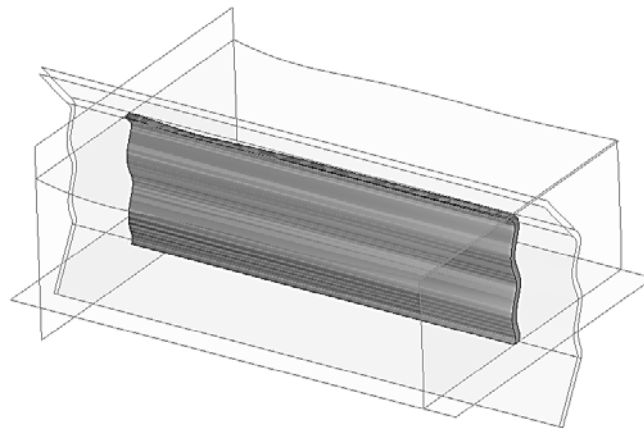


Bild 9: Parametrisches Halbraummodell der Blende

Je nachdem, wie und was variiert werden soll, muss eine entsprechende Aufbaustrategie gewählt werden. Ist z.B. absehbar, dass eine Geometrie durch Unterdrücken oder Einschließen von Konstruktionselementen alteriert wird, müssen Bezüge und Referenzen entsprechend gesetzt werden, so dass diese nicht bei einer Unterdrückung verloren gehen. Im Fall der Blende musste sichergestellt werden, dass die Formgebung unter keinen Umständen zu einem Aufbaufehler führt, z.B. durch sich selbstschneidende Konturen. Daher wurde entschieden, das Modell als Halbraummodell zu erzeugen (vgl. Bild 9). Die anschließende Formenoperation ist damit unabhängig von der Anzahl der beteiligten Flächenverbünde und würde theoretisch auch Aussparungen erlauben.

Für die Modellierung der Bauteile im CAD ist weiterhin essentiell wichtig, dass alle Bemaßungen in Abhängigkeit von den Parametern der Parameterraum-Matrix gesetzt werden. So wird verhindert, dass durch nicht aufeinander abgestimmte Wertebereiche Neuaufbaufehler, z.B. ebenfalls durch sich selbst schneidende Konturen, auftreten.

5.3 Restriktionsprüfung und Parametersteuerung

Bei einfachen Zusammenhängen wie bei der Geometrie der Blende kann die Restriktionsprüfung im Konfigurator unabhängig vom CAD-Modell durchgeführt werden. Sind im CAD-System Funktionen der wissensbasierten Konstruktion zugänglich, stehen für eine Restriktionsprüfung weitere Optionen zur Verfügung. So können z.B. Eigenschaften der konfigurierten Variante abgeprüft werden, beispielsweise die Verletzung eines externen Bauraum-Modells durch eine Kollisionsanalyse, oder die Ermittlung der Steifigkeits- und Modaleigenschaften von Strukturbauteilen in einem verknüpften FEM-System. Im Fall einer Restriktionsverletzung kann ein Schlussfolgerungsmechanismus (z.B. implementierte Konstruktionsregeln oder eine Fallbasis) die Änderung am Modell veranlassen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden Stand der Technik und die Entwicklung von konstruktiven Lösungsräumen diskutiert. Nach der Vorstellung unterschiedlicher Konzepte zu konstruktiven Lösungsräumen wurde ein Fallbeispiel aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung untersucht. Die Erstellung der parametrischen CAD-Modelle wurde anschließend kurz dargestellt, wobei ein Fokus auf der Parametrikplanung mit der Parameterraum-Matrix gelegt wurde. Auch wenn der Lösungsraum des vorgenannten Beispiels der individualisierbaren Blende zunächst einfach erscheint, weil keine topologischen Änderungen durch das Ein- oder Ausschließen von Konstruktionselementen oder anderen Komponenten am Modell auftreten, so ließen sich einzelne Implikationen auf die Modellierung des Lösungsraums in heutigen CAD-Systemen schlussfolgern.

Auf den ersten Blick erscheint die Modellerstellung durch die Parameterraum-Matrix eher komplizierter als vereinfacht. Dies ist jedoch nur scheinbar so, da der Modellplanungsaspekt bei der parametrischen CAD-Konstruktion variantenreicher Produkte in der Regel vorhanden ist, aber nur selten bewusst dokumentiert wird. Ein Beispiel hierfür stellen die verschiedenen Skelett-Techniken dar, die für die jeweiligen CAD-Systeme angewendet werden. Die Parameterraum-Matrix kann hier eine sinnvolle Ergänzung darstellen, weil sie die einzelnen Abhängigkeiten zwischen den Parametern transparent beschreibt und durch die Spiegelung auf die jeweiligen Anforderungen eine Entscheidungshilfe bietet, wenn es zu Konflikten bei der Modellierung kommt (z.B. weil Wertebereiche nicht miteinander vereinbar sind).

Weitergehend ist zu prüfen, inwieweit die Planung einer komplizierteren Erzeugnisparametrik mit der Parameterraum-Matrix wirkungsvoll unterstützt werden kann. Das manuelle Befüllen der Matrix ist bei steigender Teileanzahl mühsam und fehleranfällig, hier sind ggf. softwareseitige Unterstützungen direkt in den CAD-Systemen eine Abhilfe.

Darüber hinaus impliziert dieses Vorgehen, das bereits eine konkrete Vorstellung der Produktgestalt und seiner Funktionsweise besteht. In den frühen Phasen der Produktentwicklung ist dieses üblicherweise noch nicht vorhanden. Spezifikationstechniken, mit denen die Freiheitsgrade eines Produktes bereits beim Entwurf definiert und unterschiedliche Konzepte hierzu miteinander verglichen werden können, würden weitere Potenziale erschließen.

Literatur

- Cox 2000 COX, Jordan J.: Product Templates - A Parametric Approach to Mass Customization. In: *CAD Tools and Algorithms for Product Design*. Heidelberg: Springer, 2000, S. 3-15.
- Franke 1976 FRANKE, Hans-Joachim: *Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1976.
- Gembarski et al. 2015 GEMBARSKI, Paul Christoph ; LI, Haibing ; LACHMAYER, Roland: KBE-Modeling Techniques in Standard CAD-Systems: Case Study – Autodesk Inventor Professional. In: Bellemare, Jocelyn ; Carrier, Serge ; Nielsen, Kjeld ; Piller, Frank Thomas (Hrsg.): *Managing Complexity*. Berlin : Springer, 2015, S. 215-233.
- Gembarski et al. 2016 GEMBARSKI, Paul Christoph ; SAUTHOFF, Bastian ; BROCKMÖLLER, Tim ; LACHMAYER, Roland: Operationalization of Manufacturing Restrictions for CAD and KBE-Systems. In: Marjanović, Dorian; Štorga, Mario; Pavković, Neven; Bojčetić, Nenad; Škec, Stanko (Hrsg.): *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*. Zagreb: Sveucilisna tiskara, 2016, S. 621-630.
- Gero 1990 GERO, John S.: Design prototypes: a knowledge representation schema for design. In: *AI magazine* 11, Nr. 4, 1990, S. 26-36.
- Hirz 2013 HIRZ, Mario: *Integrated Computer-aided design in automotive development*. Heidelberg: Springer, 2013.
- Hubka 1984 HUBKA, Vladimir: *Theorie Technischer Systeme: Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. Heidelberg: Springer, 1984.
- Hvam et al. 2008 HVAM, Lars ; MORTENSEN, Niels Henrik ; RIIS, Jesper: *Product Customization*. Heidelberg: Springer, 2008.
- Ponn und Lindemann 2011 PONN, Josef ; LINDEMANN, Udo: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Heidelberg: Springer, 2011.
- Ponn 2016 PONN, Josef: Systematisierung des Lösungsraums. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 715-742.
- Shah 2001 SHAH, Jami J.: Designing with parametric cad: Classification and comparison of construction techniques. In: *Geometric Modelling*. Springer US, 2001, S. 53-68.
- Suh 2005 SUH, Nam Pah: *Complexity: theory and applications*. Oxford: Oxford University Press on Demand, 2005.
- Vajna 2009 VAJNA, Sandor: *CAX für Ingenieure: eine praxisbezogene Einführung*. Heidelberg: Springer, 2009.

Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen

Sven Matthiesen¹, Thomas Gwosch¹, Sebastian Mangold¹, Patric Grauberger¹, Michael Steck¹, Stefan Cersowsky²

¹KIT, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland
Sven.Matthiesen@kit.edu

²Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, 88161 Lindenberg, Deutschland
Stefan.Cersowsky@liebherr.com

Abstract: Derzeit geschieht Frontloading, also der frühe Erkenntnisgewinn, in der Produktentwicklung häufig simulativ über Berechnungstools, durch Rapid-Prototyping und durch den Einsatz von Hardware-Prüfständen. Während Simulationen oft komplexe Modelle erfordern, ist der Einsatz von Prototypen aus Rapid-Prototyping Verfahren bislang oft auf Grund der limitierten Beanspruchbarkeit sowohl in Prüfständen, als auch frühen Funktionstests nur eingeschränkt möglich. Ziel der hier vorgestellten IPEK-sCiL-Methode ist es, eine Validierungsmethode für Prototypen mit geringer Beanspruchbarkeit bereitzustellen. Der Einsatz von leistungsskalierten Prototypen soll im Vorgängerprodukt durch eine Skalierung des Leistungsflusses auf HiL-Plattformen ermöglicht werden. Die Methode wird am Beispielsystem Akkubohrschrauber zur Untersuchung von leistungsskalierten Prototypen der Sperrkörperkupplung gezeigt.

Keywords:

Frontloading, Testing, Akkubohrschrauber, Power-Tools, Leistungsskalierung, Prototypen, HiL, IPEK-XiL, IPEK-sCiL, Methodenentwicklung

1 Motivation

Die Verlagerung von Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in frühere Entwicklungsphasen wird als Frontloading bezeichnet (Albers et al. 2016a). Frontloading geschieht derzeit im Entwicklungsprozess häufig simulativ über Berechnungstools, auf Bauteilebene durch Rapid-Prototyping und auf Teilsystemebene durch den Einsatz von Komponentenprüfständen. Allen Methoden des Frontloadings ist hierbei gemein, dass der Erkenntnisgewinn durch eine vorgelagerte Validierung möglichst früh im Entwicklungsprozess herbeigeführt wird. Das Testing oder die frühe Validierung hat hierbei das Ziel, neu entwickelte Ideen möglichst frühzeitig auf deren Umsetzbarkeit in einem Produkt und dessen Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Dadurch werden Wissenslücken geschlossen und damit die Sicherheit der zukünftigen Funktionserfüllung erhöht (Albers et al. 2016a). So schlägt Meboldt et al. vor, dass Iterationen in den frühen Stadien des Entwicklungsprozesses durch Validierung provoziert werden sollten (Meboldt et al. 2012).

In der Entwicklung ist oft die Simulation der günstigste und schnellste Schritt zur frühen Überprüfung der Anforderungserfüllung. Berechnungstools können jedoch oftmals das Systemverhalten nicht ausreichend genau abbilden. Im Speziellen die Interaktion zwischen Bauteilen, wie beispielsweise die Schwingungsanregung im System durch tribologische Kontakte, lassen sich oft nicht mit der notwendigen Detaillierung darstellen oder nur durch sehr hohen Modellierungsaufwand. Das frühe Testing leistet deshalb neben der Simulation einen wichtigen Beitrag zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Produkten. Häufig finden solche Untersuchungen in XiL-Prüfständen statt, in denen noch nicht vorhandene angrenzende Teilsysteme oder Umwelteinflüsse hinzusimuliert werden können (Albers et al. 2008; Matthiesen et al. 2013; Albers et al. 2016a). Diese XiL-Prüfstände finden sowohl in der Automobilindustrie als auch der Flugzeugindustrie für die Untersuchung von Teilsystemen schon breite Anwendung. Für die Verwendung in HiL-Umgebungen sind jedoch mechanisch belastbare und funktionsfähige Prototypen notwendig. Dies steht im Spannungsfeld zur eher niedrigen mechanischen Beanspruchbarkeit kostengünstiger früher Funktionsmuster und Prototypen,

die beispielsweise durch additive Fertigungsverfahren oder in der Musterfertigung mit alternativen Fertigungsverfahren entstehen. Diese Funktionsmuster sind in ihrer Beanspruchbarkeit gegenüber dem Serienfertigungsverfahren oft stark reduziert, was ihren Einsatz in XiL-Prüfständen sowie frühen Funktionstests der Gesamtsysteme erschwert. Diese Prototypen können nur mit skaliertem Leistungsaufschlag beaufschlagt werden, da ihre Beanspruchbarkeit geringer ist. Sie werden deshalb im Weiteren als skalierte Prototypen bezeichnet.

Ziel dieses Beitrags ist es, einen Ansatz vorzustellen, welcher die Validierung von skalierten Prototypen, die in ihrer Beanspruchbarkeit reduziert sind, durch Prüfstände ermöglicht. Kern des Ansatzes ist die Nutzung einer Leistungsskalierung unter dem Einbezug von Vorgängerprodukten. Durch die dabei eingesetzte Methode wird es erstmals möglich, mechanisch noch nicht voll belastbare Komponenten unter dem Einsatz von Hardware-Prüfständen und der Simulation des Leistungsflusses in Vorgängerprodukte zu integrieren. Dies ermöglicht insbesondere bei der Produktgenerationsentwicklung (vgl. Albers et al. 2015) die Überprüfung von Produktfunktionen in sehr frühen Phasen der Produktentwicklung.

2 Stand der Forschung

Validierung stellt eine zentrale Aktivität in der Produktentwicklung dar. Durch sie wird ein stetiger Abgleich zwischen den Zielen und dem Zweck des Produktes sowie dem jeweils erreichten Entwicklungsstand durchgeführt. Sie wird bislang methodisch noch nicht ausreichend unterstützt (Albers et al. 2016a; Matthiesen et al. 2016).

Hardware-in-the-Loop-Methoden werden seit einigen Jahren bei der Entwicklung und Validierung von Reglern für Flugsteuerungen eingesetzt. Beispiele hierfür sind in (Karpenko und Sepelri 2006) und (Kaden et al. 2012) vorgestellt. Hierbei werden Regelalgorithmen nicht nur in rein virtuellen Validierungsumgebungen mit Hilfe einer virtuellen Regelstrecke untersucht, sondern durch Hardwarekomponenten ergänzt. Beispielsweise kann das Originalsteuergerät inkl. Motor durch Aktoren und Sensoren in Ersatzsystemen getestet werden.

Das HiL-Konzept, das im ursprünglichen Sinne für die Validierungsaktivitäten von Steuergeräten eingesetzt wird, wurde zum IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz nach Albers (Albers et al. 2008a; Albers et al. 2016a) weiterentwickelt und kann auch auf andere zu entwickelnde Teilsysteme (als X bezeichnet) angewendet werden. Die Kopplung des zu entwickelnden Teilsystems mit dem Restsystem geschieht über Koppelsysteme in Form von Hardwareschnittstellen mithilfe von Sensoren und Aktoren. Der IPEK-XiL-Ansatz ermöglicht es, die bestehenden Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Systemen zu berücksichtigen und unterstützt bei der Validierung eines Teilsystems seine Einbindung in das Gesamtsystem.

Die verschiedenen Teilsysteme können dabei rein virtueller, rein physischer oder auch gemischt physisch-virtueller Ausprägungen sein. Das „X“ ist hierbei definiert als das physische und/oder virtuelle (Teil)-System, welches als System-in-Development im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität steht und über welches Erkenntnisse gewonnen werden sollen (Albers et al. 2016a).

Bei der Entwicklung eines handgehaltenen Gerätes (Power-Tool) muss das Gesamtsystem, bestehend aus Anwender, Gerät und Anwendung ganzheitlich betrachtet werden. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass Wechselwirkungen von Anwendung, Anwender und Gerät die Funktionalität stark beeinflussen (Matthiesen et al. 2013).

Ein Erfolgsfaktor der Produktentwicklung ist das so genannte Frontloading, in dem Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in frühere Entwicklungsphasen verlegt, dadurch Wissenslücken geschlossen und damit Unsicherheiten begrenzt werden (Albers et al. 2016a; Thomke und Fujimoto 2000). Es existiert Bedarf an Methoden zur Einbindung von skalierten Prototypen in den IPEK-XiL-Ansatz für die frühen Phasen der Produktentwicklung, da gerade in den frühen Phasen neben Simulationsstudien oftmals nur Prototypen mit geminderter Belastbarkeit für die Validierung vorhanden sind. Diese Prototypen ermöglichen es, einen Eindruck für das Produkt zu erhalten und bilden die äußere Gestalt gut ab. Aktuell werden Prototypen aus additiver Fertigung vorwiegend für die Bauraumabschätzung oder für die Visualisierung des Funktionsprinzips eingesetzt. Solche Prototypen können die geforderte Funktion aufgrund ihrer niedrigen Belastbarkeit aber nicht ausreichend abbilden, weshalb sie für das Testing in Prüfständen als Teil der Validierung bisher ungeeignet sind.

Eine Kombination aus Simulation, Rapid-Prototyping-Verfahren zur Prototypenerstellung und Testing im Vorgängerprodukt durch entsprechende Prüfstände kann das Frontloading unterstützen. Daraus leitet sich die folgende Forschungsfrage ab: „Wie können leistungsskalierte Prototypen in das Vorgängerprodukt integriert und auf Prüfständen untersucht werden?“

Um diese Forschungsfrage zu unterstützen wird in diesem Beitrag ein Validierungsansatz vorgestellt, welcher den Einsatz von leistungsskalierten Prototypen für die funktionale Prüfung und frühe Validierung in IPEK-XiL-Prüfständen erlaubt. Hierzu ist eine Methode zur Leistungsskalierung notwendig, mit der die Prototypen zur Funktionsvalidierung in den IPEK-XiL-Prüfstand integriert werden können.

3 Die IPEK-sCiL-Validierungsmethode

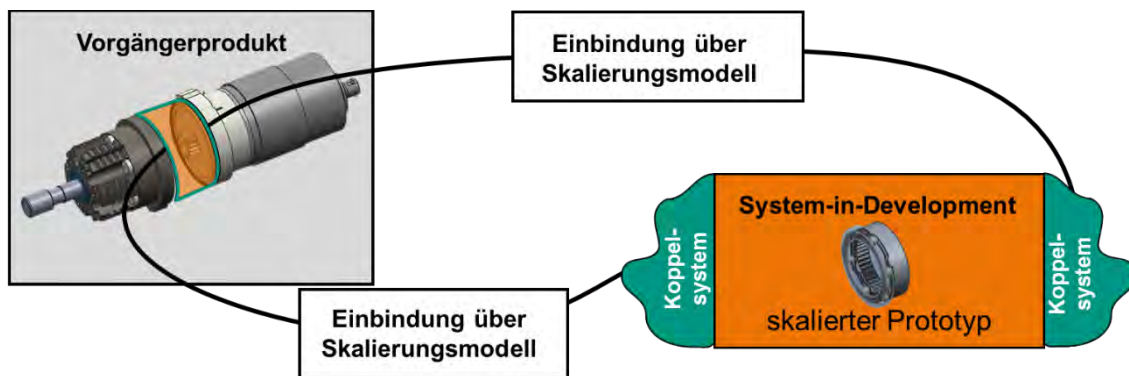


Bild 1: Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in das Vorgängerprodukt

In Bild 1 ist der Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in das Vorgängerprodukt schematisch dargestellt (vgl. Matthiesen et al. 2017). Die Systembegriffe basieren auf dem IPEK-XiL-Ansatz und werden im Folgenden in diesem Kontext beschrieben:

- **System-in-Development:** Das zu entwickelnde Teilsystem, dessen Funktionsfähigkeit überprüft werden soll. Es beinhaltet Prototypenteile, welche durch ihr Herstellverfahren in ihrer Beanspruchbarkeit gemindert sein können. Es bildet den skalierten Prototyp, der beispielsweise additiv gefertigt wurde.
- **Vorgängerprodukt:** Es bildet die angrenzenden Teilsysteme des zu entwickelnden Systems ab. Es liegt hierbei physisch oder virtuell auf Basis der vorangegangenen Produktgeneration vor und bildet das Restsystemmodell. Eine Einbindung des Vorgängerprodukts ist hilfreich, um bestehende Wechselwirkungen auf das zu entwickelnde Teilsystem abbilden zu können, auch wenn die weiteren Teilsysteme für die nächste Produktgeneration noch nicht entwickelt sind.
- **Skalierungsmodell:** Das Skalierungsmodell übersetzt die Systemgrößen zwischen Vorgängerprodukt und System-in-Development.
- **Koppelsysteme:** Sie verbinden das Vorgängerprodukt und das System-in-Development miteinander. Sie übersetzen in diesem Fall physische Leistungsgrößen in virtuelle Systemgrößen und andersherum und ermöglichen mit Hilfe von Skalierungsmodellen (vgl. Albers et al. 2016b) eine Anpassung der Belastung.

Basierend auf dem Validierungsansatz zur Einbindung von leistungsskalierten Prototypen in Prüfstände wird eine Methode – die IPEK-sCiL-Methode (scaled-Components-in-the-Loop) – für den Einsatz an einem IPEK-XiL-Prüfstand vorgestellt. Die IPEK-sCiL-Methode ist mit ihren fünf aufeinander aufbauenden Schritten in Bild 2 dargestellt.

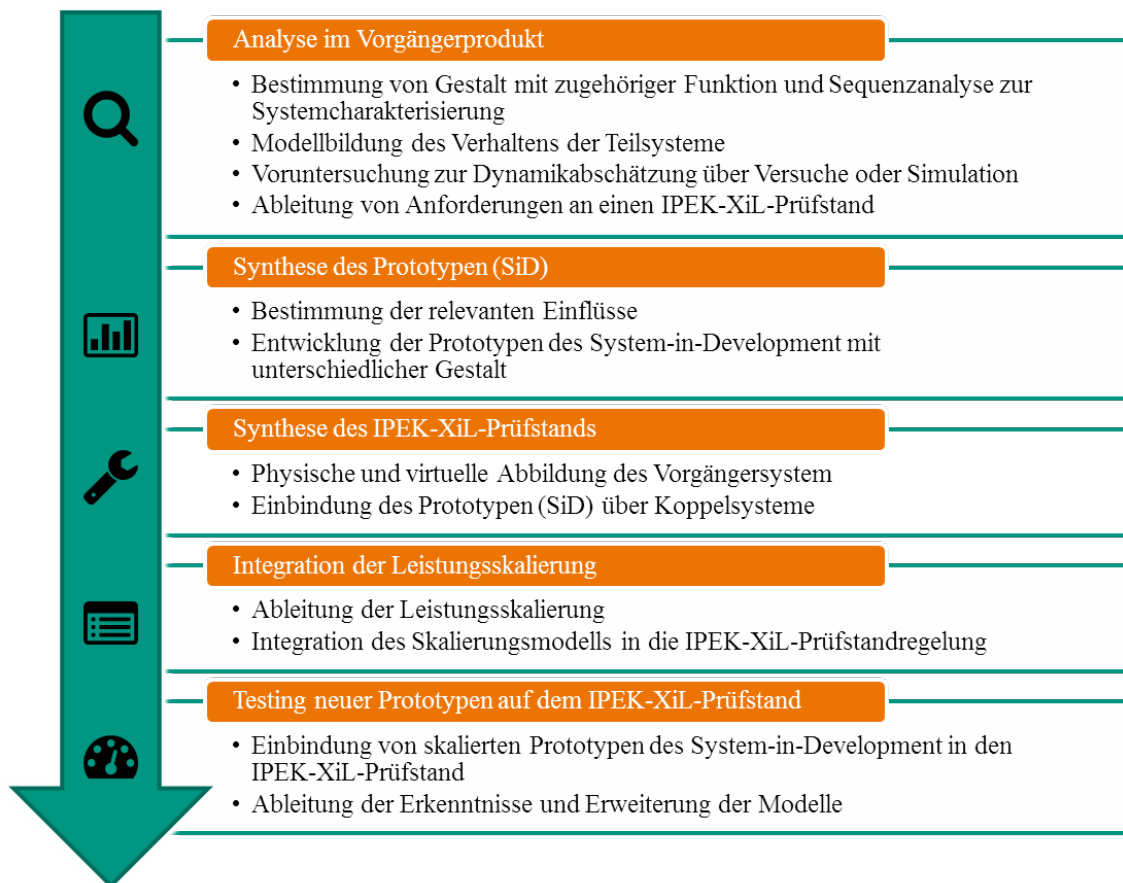


Bild 2: Darstellung der 5 Schritte der IPEK-sCiL-Methode

Im **ersten Schritt** erfolgt die Analyse des zu entwickelnden Teilsystems im Vorgängerprodukt der letzten Produktgeneration hinsichtlich der kritischen Funktion. Ziel ist die Ableitung von Anforderungen an die aufzubauende Validierungsumgebung und die benötigten Koppelsysteme. Über eine Analyse der Gestalt werden die Orte der Funktionserfüllung und die relevanten Leistungsflüsse identifiziert. Hierbei kann die Analyse verschiedener Zustände und eine darauffolgende Überführung in ein Sequenzmodell (Albers et al. 2008b) unterstützen. Auf Basis dieser Analyse erfolgt die Modellbildung des Vorgängerprodukts. Mithilfe des erlangten Wissens wird für das zu entwickelnde Teilsystem (System-in-Development) ein angepasstes Modell erstellt. Die Simulationsergebnisse werden zur Ableitung der Anforderungen an die Validierungsumgebung verwendet. Zusätzlich können Voruntersuchungen in physischer und virtueller Form zur Abschätzung der Dynamikanforderungen an die Koppelsysteme beitragen.

Im **zweiten Schritt** werden die Ergebnisse zur Synthese der verschiedenen Varianten des System-in-Development als skalierte Prototypen genutzt. Auf Basis der Versuche und Simulationsergebnisse aus dem ersten Methodenschritt werden die relevanten Einflüsse bestimmt, die im skalierten Prototyp abgebildet werden müssen. Aus dem Vorgängerprodukt werden für das zu entwickelnde Teilsystem verschiedene Varianten abgeleitet und Prototypen mit verminderter Beanspruchbarkeit erstellt.

Im **dritten Schritt** wird der IPEK-XiL-Prüfstand aufgebaut. Hierzu wird das Vorgängerprodukt aus früheren Produktgenerationen als physisches Restsystem in den Prüfstand integriert oder in Form von virtuellen Modellen aus früheren Entwicklungen in Echtzeitmodellen aufbereitet.

Im **vierten Schritt** erfolgt die Integration des Skalierungsmodells in den Prüfstand, durch die eine entsprechende Kopplung des System-in-Development mit dem Vorgängerprodukt ermöglicht wird. Das zu entwickelnde Teilsystem wird über diese Koppelsysteme, bestehend aus Sensoren und Motoren, in das virtuelle oder physische Vorgängerprodukt eingebunden. Die Leistungsskalierung, als Bestandteil der Prüfstandregelung beinhaltet Verrechnungsmodelle, die innerhalb der Koppelsysteme die Messgrößen in Vorgabegrößen der Aktoren umrechnen. Bestehende Ähnlichkeitskennzahlen und etablierte Modellbildungsansätze werden zur Erstellung der Skalierungsmodelle eingesetzt.

Im **fünften** und letzten **Schritt** der Methode werden mithilfe des entwickelten IPEK-XiL-Prüfstands und der skalierten Prototypen verschiedene Validierungsversuche durchgeführt. Mit den Versuchsergebnissen ist es möglich, die Funktionserfüllung der zu entwickelnden Komponente im Gesamtsystem zu bewerten, auch wenn die Beanspruchbarkeit der Komponenten noch reduziert ist. Weiterhin können die Ergebnisse genutzt werden, um die bisherigen bestehenden Modelle der Systemkomponenten zu erweitern und verfeinern. Damit hilft die IPEK-sCiL-Methode auch bei der Verkürzung der Entwicklungszeit von zukünftigen Produktgenerationen.

4 Anwendung der IPEK-sCiL-Methode zur Validierung einer Power-Tool Komponente

Die Anwendung der IPEK-sCiL-Methode (vgl. Bild 2) wird am Beispiel einer Weiterentwicklung eines 18-Volt-Akkubohrschraubers für Profianwendungen vorgestellt. Innerhalb der Produktgenerationsentwicklung dieses Akkubohrschraubers soll die drehmomentbegrenzende Kupplung für die nächste Produktgeneration durch eine Gestaltvariation optimiert werden. Das Auslöseverhalten der drehmomentbegrenzenden Kupplung soll durch eine geänderte Gestalt der Kupplungsteile verbessert werden. Eine rein simulationsgestützte Auslegung ist auf Grund des schwer zu simulierenden tribologischen Kontaktes und der Schwingungsfähigkeit des Systems begrenzt möglich. Eine Vielzahl an Varianten der neu zu entwickelnden Kupplung liegt nur als skaliertes Prototyp mit geminderter Beanspruchbarkeit vor, da seriennahe Prototypen in dieser Entwicklungsphase aufgrund deren aufwendigen Herstellung noch nicht zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Varianten der drehmomentbegrenzenden Kupplung sollen auf einem IPEK-XiL-Prüfstand als skalierte Prototypen auf ihre Funktionserfüllung im Gesamtsystem untersucht werden und die Auswahl der geeignetsten Geometrie ermöglichen. Für die restlichen Teilsysteme des Akkubohrschraubers können die Komponenten aus dem bestehenden Akkubohrschrauber (Vorgängerprodukt) verwendet werden. Diese werden zusätzlich durch bereits fertig entwickelte Bauteile oder Zukaufteile vervollständigt.

In den folgenden Abschnitten wird das Vorgehen zur Erstellung eines Prüfstandes, welcher eine in der Beanspruchbarkeit geminderte Drehmomentkupplung durch Leistungsskalierung in das Vorgängermodell des Akkubohrschraubers einbindet, entlang des in Kapitel 3 vorgestellten Vorgehens diskutiert.

4.1 Analyse im Vorgängerprodukt

Im ersten Schritt erfolgt nach der vorgestellten IPEK-sCiL-Methode (vgl. Bild 2) die Analyse des Vorgängerprodukts. Dies hat zum Ziel, das Systemverständnis für die Modellbildungsaktivitäten in Simulation- und Prüfstandentwicklung aufzubauen und Anforderungen an den IPEK-XiL-Prüfstand zu generieren.

Zunächst werden im Rahmen einer Systemanalyse im Vorgängerprodukt die Zusammenhänge der vorliegenden Gestalt mit der erfüllten Funktion erfasst. Durch das so gewonnene Systemverständnis können im weiteren Verlauf die relevanten Gestaltmerkmale des Systems berücksichtigt werden – beispielsweise beim Aufbau eines Simulationsmodells. Diese Analyse wird mit dem C&C²-Ansatz (Albers und Wintergerst 2014; Matthiesen 2002) durchgeführt, der Gestalt und Funktion eines technischen Systems in einem Modell verknüpft.

Am Beispiel des Akkubohrschraubers ist der Zweck des Modells eine Identifikation der Abläufe bei der Funktionserfüllung *Drehmoment am Abtrieb begrenzen*. Dazu wird der Leistungsfluss von Motor zu Abtrieb betrachtet, wobei die weiter zu entwickelnde Funktion die *Begrenzung des Abtriebsmoments* ist. Eine Darstellung des Antriebsstrangs ist in Bild 3 gezeigt. Die Begrenzung des Drehmoments erfolgt in einer Kupplung (vgl. Bild 3), die in das Hohlrad der letzten Stufe des Planetengetriebes integriert ist. Die Kupplung begrenzt das Drehmoment mechanisch und besteht aus sechs im Kunststoffgehäuse gelagerten Kugeln, die über Federn auf eine Laufbahn, die im Hohlrad integriert ist, gedrückt werden und über Erhebungen auf der Laufbahn die Drehmomentübertragung ermöglichen.

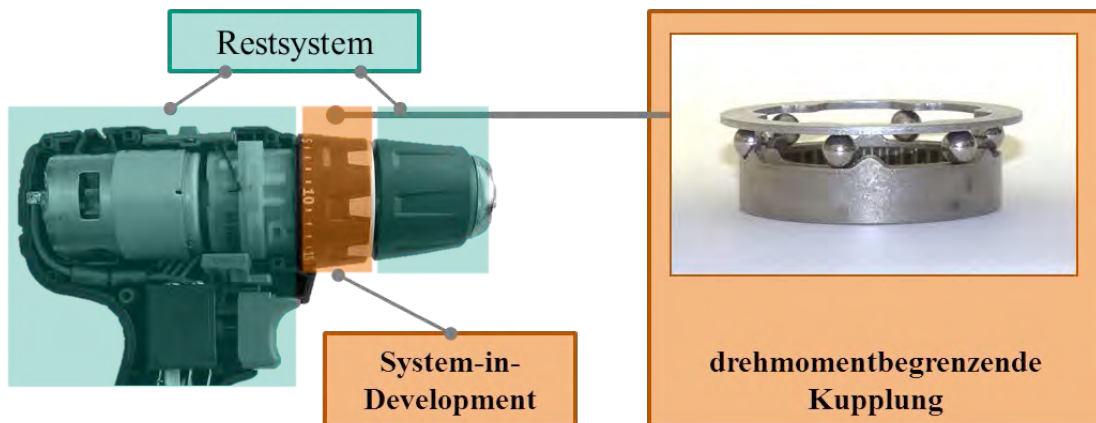


Bild 3: Antriebstrang eines Akkuboehrschraubers (links) und Darstellung der Komponenten (nicht vollständig) der drehmomentbegrenzenden Kupplung (rechts)

Die qualitative Systemanalyse zeigt, dass sich verschiedene Zustände während der Aktivität der Drehmomentbegrenzung einstellen. Dies erfordert verschiedene C&C²-Modelle, da sich der Zustand des Systems ändert. Die Verknüpfung dieser C&C²-Modelle geschieht durch ein Sequenzmodell, das in Bild 4 dargestellt ist. Bild 4 zeigt eine Kugel (vgl. Ausschnitt aus Bild 3), die vertikal beweglich ist und durch eine Feder auf die Laufbahn vorgespannt wird. Die Laufbahn bewegt sich in der eingezeichneten Richtung. Der Zweck des Modells ist eine Identifikation der Abläufe bei der Funktionserfüllung *Drehmoment am Abtrieb begrenzen*. Wenn die an der Funktionserfüllung beteiligten Teilfunktionen und Gestaltparameter bekannt sind, können sie verändert und die Funktion optimiert werden. In Zustand 1 dreht sich die Laufbahn frei, bis die Kugel eine Erhebung erreicht und Zustand 2 eintritt. In Zustand 2 entsteht ein Wirkflächenpaar zwischen der Erhebung der Laufbahn und der Kugel. Damit wird eine Momentübertragung erzielt und zusätzlich wird durch die Kugel eine Kraft auf das Gehäuse übertragen. In Zustand 3 bewegt sich die Kugel gegen die Federkraft auf die Erhebung der Laufbahn, es kommt zu einer Relativbewegung zwischen Gehäuse und Laufbahn. In Zustand 4 erreicht die Kugel das Ende der Erhebung, die abstützende Kraft fällt ab und die Laufbahn dreht sich wieder frei.

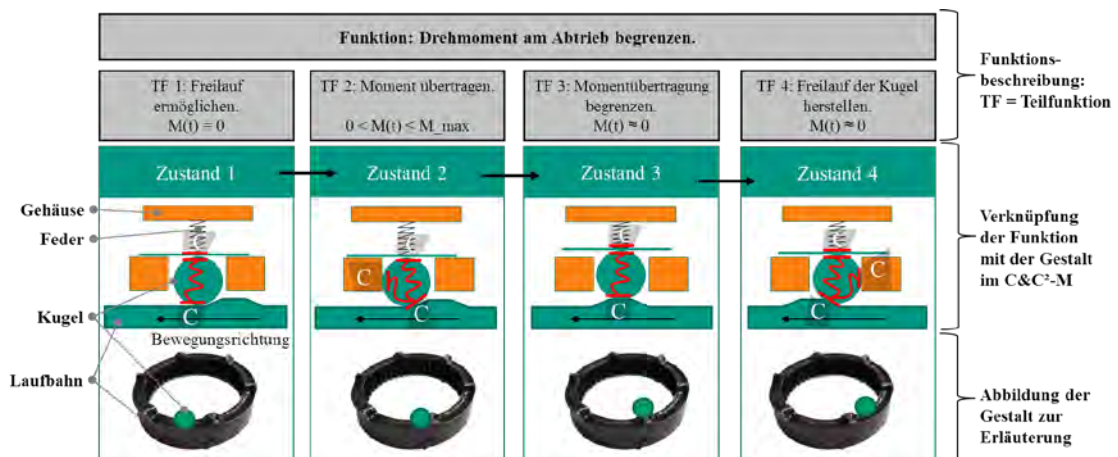


Bild 4: Sequenzmodell der Kugelbewegung im Auslösemoment der Kupplung

Das durch die Analyse erlangte Systemverständnis wird anschließend zum Aufbau einer virtuellen Validierungsumgebung des Antriebstrangs des Akkuboehrschraubers (System-in-Development und Restsystemmodell) genutzt. Ziel der virtuellen Simulation ist die schnelle Überprüfung von Anforderungen an den IPEK-XiL-Prüfstand und die benötigten Koppelsysteme.

Für die Abbildung der Komponenten des Vorgängerprodukts in der Simulation können bereits bestehende Komponentenmodelle genutzt werden, wenn diese vorhanden sind.

Da in diesem Fall die gewünschte Modellgüte des System-in-Development mit bestehenden Modellen nicht erreicht wurde, wird es mit Hilfe des zuvor erstellten Sequenzmodells (vgl. Bild 4) in ein neues

Komponentenmodell überführt. Zur Erstellung des Komponentenmodells wird auf Basis des Sequenzmodells eine mathematische Beschreibung der einzelnen Zustände der Kupplung erstellt und das Systemverhalten in Form von algebraischen Formeln und Gleichungen beschrieben. Diese mathematische Beschreibung wird anschließend im Komponentenmodell implementiert.

Durch die Integration des erstellten Kupplungsmodells in die Simulationsumgebung wird eine vollständige Simulation der Leistungsflüsse innerhalb des in den IPEK-XiL-Prüfstand integrierten Systems (Restsystem und System-in-Development) erzielt.

Durch Messungen am Vorgängerprodukt wird anschließend die bislang qualitative Modellierung verifiziert und quantitative Größen wie beispielsweise Höhe des Abtriebsmoments oder Zustandszeiten erfasst. Dazu werden Versuche mit dem Vorgängerprodukt (Akkuboehrschrauber) durchgeführt, in denen die real auftretenden Effekte in der Kupplung durch geeignete Sensorik erfasst werden. Sind die Effekte nicht direkt messbar, können diese durch indirekte Messmethoden ermittelt werden (vgl. Matthiesen et al. 2016). In diesem Fall wird das Abtriebsmoment des Akkuboehrschraubers mit einem Messaufbau mittels Drehmomentmesswelle erfasst. Aus dem erfassten Verhalten lassen sich Rückschlüsse auf die Zustände des Kupplungsbetriebs ableiten. Beispielsweise zeigt sich im Übergang von Zustand 1 zu Zustand 2 (vgl. Bild 4) ein Stoßeffect, dessen Wirkung auf das Abtriebsmoment von der Vorspannung der Federn abhängt. Solche beobachteten Effekte werden zur Verbesserung der Simulationsmodelle genutzt und erweitern diese kontinuierlich.

Mit Hilfe dieser Simulationsmodelle und der durchgeführten Experimente lässt sich eine effiziente Vorauslegung des IPEK-XiL-Prüfstands durchführen. Beispielsweise wird ein maximales Moment von 5,5 Nm bei aktivierter Kupplung festgestellt. Weiter können nun die auftretenden Messgrößen quantifiziert werden, woraus sich die Anforderung an den zu erstellenden IPEK-XiL-Prüfstand in Schritt 3 ableiten lassen. Zusätzlich lassen sich die notwendigen Leistungsbereiche und Dynamikanforderungen an die benötigten Koppelsysteme ableiten.

4.2 Synthese des Prototypen (SiD)

Im zweiten Methodenschritt (vgl. Bild 2) werden die relevanten Einflüsse und Parameter der Skalierung ermittelt und die skalierten Prototypen konstruiert.

Das System-in-Development ist als skaliertes Funktionsprototyp im Prüfstand ausgeführt und in seiner Beschaffenheit (Material, Geometrie und Form der Reibpartner etc.) der neu zu entwickelnden Komponente ähnlich, weist jedoch noch nicht dessen Drehmomentübertragbarkeit auf.

Die zuvor durchgeführten Experimente und Simulationsstudien werden in diesem Schritt zur Ermittlung der relevanten Einflüsse auf die Skalierung genutzt. Wichtig ist zu hinterfragen, welche Parameter auf dem Prüfstand skaliert werden und wie sich das System-in-Development in seiner Gestalt und Belastbarkeit vom Vorgängerprodukt unterscheidet.

Mithilfe des erlangten Systemverständnisses werden die Varianten des System-in-Development konstruiert und die Gestalt so angepasst, dass eine Optimierung der gewünschten Funktion realisiert wird. Die unterschiedlichen Varianten werden im weiteren Verlauf als skalierte Prototypen auf dem IPEK-XiL-Prüfstand auf ihre Funktionsfähigkeit untersucht.

4.3 Synthese des IPEK-XiL-Prüfstands

Im dritten Schritt der Methode wird, entsprechend des abzubildenden Anwendungsfalls eine Prüfstandkonfiguration aufgebaut sowie das betrachtete System-in-Development und das Vorgängerprodukt als Restsystem darin integriert. Im vorliegenden Fall wird die drehmomentbegrenzende Kupplung aus dem Gesamtsystem herausgelöst. Dementsprechend werden die Koppelsysteme zu beiden Seiten der skalierten Kupplung und des Restsystems benötigt. Zur Auslegung dieser Koppelsysteme werden die Ergebnisse der Simulation und der experimentellen Ermittlung (Systemidentifikation) verwendet.

In Bild 5 ist die konkrete Umsetzung der Prüfstandkonfiguration für die vorliegende Validierungsaufgabe nach der in Kapitel 3 vorgestellten IPEK-sCiL-Methode dargestellt.

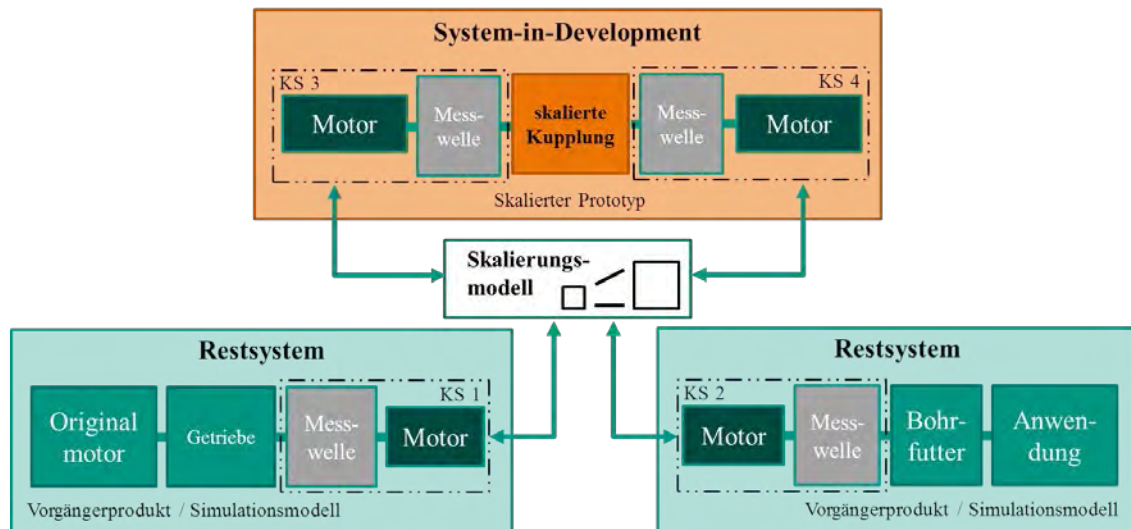


Bild 5: Prüfstandkonfiguration mit Leistungsskalierung eines Akkuboehrschraubers mit prototypischer Drehmomentkupplung

Aus dem Vorgängerprodukt wird die drehmomentbegrenzende Kupplung (vgl. Bild 3, links) physisch entfernt, sodass neue Schnittstellen entstehen. Die Akkuboehrschrauberkomponenten ohne Kupplung bilden im Sinne der IPEK-sCiL-Methode das Restsystemmodell. An den durch die fehlende Kupplung entstehenden Schnittstellen werden die Koppelsysteme KS1 und KS2 angebunden (vgl. Bild 5). Diese Koppelsysteme bestehen jeweils aus Elektromotoren und Sensoren. Die Sensoren der Koppelsysteme ermöglichen die Drehzahl- und Drehmomenterfassung an der Schnittstelle, während die Elektromotoren Drehzahlen und Drehmomente aufprägen können. Über das Skalierungsmodell und die beiden Koppelsysteme KS3 und KS4 ist der skalierte Prototyp der neu entwickelten Kupplung mit seinen in der Belastbarkeit geminderten Komponenten in das Restsystem eingebunden.

4.4 Integration der Leistungsskalierung

Im vierten Schritt wird eine Leistungsskalierung implementiert, die eine Anpassung der Leistung an die verwendeten Prototypen ermöglicht. Zwischen den beiden Motoren (z.B. von KS1 und KS3, Bild 5) befindet sich die Leistungsskalierung in einer Echtzeitregelung.

Die Leistungsskalierung als Bestandteil der Prüfstandregelung beinhaltet Verrechnungsmodelle, die innerhalb der Koppelsysteme die Messgrößen, wie beispielsweise Drehzahl und Drehmoment, auf der einen Seite in die passenden Vorgabegrößen der Motoren auf der anderen Seite der Koppelsysteme umrechnen. Die Verrechnungsmodelle sind dabei stark problemspezifisch, wobei etablierte Modellbildungsansätze, wie beispielsweise in (Dresig und Holzweißig 2012) vorgestellt sind, Verwendung finden können. Die von Dresig und Fidlin (Dresig und Fidlin 2014) vorgestellte Normierung von Parametern und Variablen sowie Bildung von Ähnlichkeitskennzahlen helfen bei der Aufstellung des Skalierungsmodells, wenn hierdurch die Unabhängigkeit der skalierten Größe zu den Parametern erreicht wird.

Dieses Skalierungsmodell wird in die Prüfstandregelung integriert und erlaubt die einfache Anpassung der relevanten Systemparameter wie Drehmoment und Drehzahl an die zu entwickelnde Komponente.

4.5 Testing neuer Prototypen auf dem IPEK-XiL-Prüfstand

Im letzten Methodenschritt werden, über die Einbindung von leistungsskalierten Prototypenvarianten der zu entwickelnden Komponente in den IPEK-XiL-Prüfstand, Versuche durchgeführt. Mit den Versuchsergebnissen werden sowohl die Fragestellung zum Systemverhalten im untersuchten Testfall beantwortet, als auch die Erweiterung der bisher bestehenden Modelle der Systemkomponenten erreicht. Mithilfe einer Kopplung des skalierten Prototyps mit dem Vorgängerprodukt wird das Testing unterschiedlicher Prototypen mit den relevanten Wechselwirkungen ermöglicht. Die verschiedenen Varianten der leistungsgeminderten Kupplung werden auf dem IPEK-XiL-Prüfstand auf ihre

Funktionserfüllung im Gesamtsystem untersucht und so die Auswahl der geeignetsten Geometrie ermöglicht. Verschiedene Kupplungen mit alternativen Geometrien können so, beispielsweise durch additive Fertigungsverfahren, schnell hergestellt und auf ihre Funktionsfähigkeit im Vorgängerprodukt vergleichend getestet werden. Auf eine Fertigung vieler Varianten mit zeit- und kostenintensiven Herstellverfahren wie Schmieden oder Feingießen kann durch diese Validierungsumgebung verzichtet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Validierungsansatz ermöglicht Frontloading in der Produktentwicklung durch Nutzung skalierter Prototypen (zum Beispiel aus additiver Fertigung) in XiL-Prüfständen mit Hilfe einer entsprechenden Leistungsskalierung. Die vorgestellte IPEK-sCiL-Methode beschreibt mögliche Schritte zum Aufbau eines auf dem Ansatz basierenden IPEK-XiL-Prüfstand zur Untersuchung von Prototypen in Vorgängerprodukte mit leistungsreduzierten Systemgrößen. Im nächsten Schritt soll der nach der vorgestellten IPEK-sCiL-Methode entwickelte Prüfstand auf seine Funktionsfähigkeit überprüft und weitere skalierte Prototypen auf ihre Eignung zur Drehmomentbegrenzung im Gesamtsystem untersucht werden.

Im Anschluss wird die Methode auf die Entwicklung einer Validierungsumgebung eines Flugzeugaktuators übertragen und dabei die Methodvalidierung durchgeführt. In der Luftfahrt erschwert die hohe Leistungsdichte zusätzlich die Verwendung von additiv gefertigten Prototypen in der Konzeptabsicherung. Der betrachtete Flugzeugaktuator verfügt über vergleichbare Baugruppen zur mechanischen Drehmomentbegrenzung, besitzt jedoch ein erheblich größeres Leistungsniveau. Eine besondere Herausforderung besteht somit in der aufwendigeren Leistungsskalierung. Mithilfe der vorgestellten IPEK-sCiL-Methode soll der Methodentransfer auf Systeme höherer Leistung untersucht werden. Darüber hinaus soll auch dort die Validierung von skalierten Prototypen mit Hilfe einer Leistungsskalierung ermöglicht werden und damit eine einfache Konzeptabsicherung in frühen Entwicklungsphasen erreicht werden. Die hier vorgestellte Methode wird somit an zwei unterschiedlichen Systemen angewendet.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20Y1509B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Unterstützung dieses Vorhabens.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- | | |
|---------------------|--|
| Albers et al. 2016a | Albers, Albert ; Behrendt, Matthias ; Klingler, Simon ; Matros, Kevin: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München : Hanser, 2016a |
| Albers et al. 2016b | Albers, Albert ; Pinner, Tobias ; Yan, Steven ; Hettel, Rolf ; Behrendt, Matthias: Koppelsysteme: Obligatory Elements within Validation Setups. In: Proceedings of DESIGN 2016, 2016b |
| Albers et al. 2015 | Albers, A. ; Bursac, N. ; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (2015) |

- Albers und Wintergerst 2014 Albers, A. ; Wintergerst, E.: The Contact and Channel Approach (C&C2-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations. London : Springer, 2014
- Albers et al. 2008a Albers, A. ; Düser, T. ; Ott, S.: X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen. In: 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 2008
- Albers et al. 2008b Albers, A. ; Alink, T. ; Matthiesen, S. ; Thau, S.: Support of system analyses and improvement in industrial design through the contact & channel model. In: International Design Conference - Design 2008. Dubrovnik, Croatia, 2008
- Dresig und Fidlin 2014 Dresig, Hans ; Fidlin, Alexander: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme : Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. 3., überarb. u. erw. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- Dresig und Holzweißig 2012 Dresig, Hans ; Holzweißig, Franz: Maschinendynamik. 11. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012
- Kaden et al. 2012 Kaden, A. ; Walde, G. ; Bocher, B. ; Luchner, R.: Hardware-in-the-Loop - Simulation als Bestandteil des Entwicklungsprozesses für das automatische Flugsteuerungssystem der STEMME S15. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (2012)
- Karpenko und Sepehri 2006) Karpenko, Mark ; Sepehri, Nariman: Hardware-in-the-Loop Simulator for Research on Fault Tolerant Control of Electrohydraulic Flight Control Systems : Mineapolis, Minnesota, USA, June 14-16, 2006. In: Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA (2006)
- Matthiesen und Steck 2017 Matthiesen, S. ; Steck, M. ; Validierung von leistungsskalierten Prototypen. In: WiGeP News 01/2017,
- Matthiesen et al. 2016 Matthiesen, S. ; Gwosch, T. ; Schäfer, T. ; Dültgen, P. ; Pelshenke, C. ; Gittel, H.-J.: Experimentelle Ermittlung von Bauteilbelastungen eines Power Tool Antriebsstrangs durch indirektes Messen in realitätsnahen Anwendungen als ein Baustein in der Teilsystemvalidierung. In: Forschung im Ingenieurwesen (2016) Nr 1-2/2016
- Matthiesen et al. 2013 Matthiesen, Sven ; Schaefer, Tobias ; Mangold, Sebastian ; Durow, Wasili: X-in-the-Loop in der Gerätebranche - Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung. In: SSP 2013. Stuttgart : Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013
- Matthiesen 2002 Matthiesen, Sven: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Karlsruhe, KIT. Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, 2002
- Meboldt et al. 2012 Meboldt, M. ; Matthiesen, S. ; Lohmeyer, Q.: The dilemma of managing iterations in time-to-market development processes. In: 2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes MMPEP, 2012
- Thomke und Fujimoto 2000 Thomke, Stefan ; Fujimoto, Takahiro: The effect of "front-loading" problem-solving on product development performance. In: Journal of Product Innovation Management 17 (2000), Nr. 2, S. 128-142

Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess

Alexander Laukemann¹, Hansgeorg Binz², Daniel Roth³,

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland
alexander.laukemann@iktd.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland
hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de

³Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland
daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: In diesem Beitrag wird ein Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess vorgestellt. Motiviert durch aktuelle Herausforderungen hinsichtlich der zielgerichteten Unterstützung von Produktentwicklungsmitarbeitern, wird ein prozessorientierter Katalog vorgestellt, der neben konventionellen Produktentwicklungsmethoden auch relevante Wissensmanagementmethoden beinhaltet. Neben dem Aufbau und dem Inhalt des Katalogs ist vor allem die auf digitalen Prozessmodellen basierende Funktionsweise als Alleinstellungsmerkmal hervorzuheben. Der an die Systematik und den Aufbau von Konstruktionskatalogen angelehnte Katalog berücksichtigt im Gliederungsteil prozessbedingte Problemfelder und verknüpft diese mit den Grundlagen des Wissensmanagements. Dies ermöglicht, Methoden der Produktentwicklung und des Wissensmanagements als mögliche Lösung eines identifizierten Problems anzubieten. Darüber hinaus fördert der Katalog die Entwicklung neuartiger Kombinationen von Wissensmanagementlösungen. Ziel des Beitrags ist es, diesen Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess als Unterstützungsmaßnahme detailliert zu beschreiben.

Keywords:

Prozessorientiertes Wissensmanagement, Wissensmanagementmethoden, Produktentwicklungsprozess

1 Einleitung

Von 1965 bis 2005 ist die Themenvielfalt im Forschungsbereich „Design Research“ exponentiell angestiegen (Birkhofer 2014). Ob dieses exponentielle Wachstum und die damit verbundene Unübersichtlichkeit der Forschungsthemen jedoch einen praktischen Mehrwert für das industrielle Umfeld bilden, ist Gegenstand aktueller Diskussionen (Ehrlenspiel und Meerkamm 2016). Die mit der Themenvielfalt in Relation stehende Wissensentwicklung steigt in ähnlichem Umfang. Aus diesem Grund stehen immer mehr Wissensinhalte in unterschiedlichen Formen (explizit, implizit, analog, digital etc.) den involvierten Mitarbeitern im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung. Mit Hilfe von Maßnahmen wie beispielsweise „Big Data Analysen“ oder „Lean Development“ wird versucht, eine mögliche Informationsflut einzugrenzen (Binz et al. 2016). Aktuelle Studien (Haufe 2014) zeigen auf, dass Unternehmen mittlerweile erfolgskritisches Wissen systematisch erkennen und zuordnen können, allerdings mangelt es daran, diese Erkenntnis produktiv in den Geschäftsprozessen umzusetzen. Eine weitere Studie (BMW 2013) konnte im Bereich der Informationslogistik erfassen, dass Ingenieuren bei der Produktentwicklung nur in etwa der Hälfte der Fälle die richtigen Informationen zur richtigen Zeit in der richtigen Form zur Verfügung stehen. Es mangelt also trotz zahlreicher Wissensinhalte und scheinbar anwendbarer ganzheitlicher Wissensmanagementansätzen an einer nützlichen und praxisbezogenen Unterstützung für die involvierten Mitarbeiter des Produktentwicklungsprozesses. Der aktuelle Trend der Digitalisierung, der momentan sowohl im Forschungsfeld der Produktentwicklung, als auch in der industriellen Praxis als disruptive Veränderung gilt, bietet Lösungen für sämtliche pro-

zessbedingten Herausforderungen (Streibich 2016). Die Basis der Digitalisierung bilden dabei vor allem die Modellierungssprachen, da mit deren Einsatz digitale Prozessmodelle entstehen, welche je nach Modellierungszweck verschiedene Analysemöglichkeiten anbieten. Die Anzahl der verfügbaren Modellierungssprachen ist ähnlich vielfältig wie die Menge an gesprochenen Sprachen. Ungeachtet aller technischen Möglichkeiten begünstigt die Digitalisierung nicht automatisch eine einfache Lösung des eingangs erwähnten Problems der wissensmanagementspezifischen Produktentwicklungsunterstützung. Das personengebundene Wissen bleibt eine der wichtigsten Voraussetzungen, wenn die Vorteile der Digitalisierung umgesetzt werden wollen (Dörfler 2015). Hinzu kommt, dass die digital abgebildeten Prozesse die realen Informationsflüsse und Wissensumwandlungen mit einer hohen Abbildungsgüte darstellen müssen. Dabei stoßen Modellierungssprachen mit definierter Syntax und Notation an systeminhärente Grenzen.

Die einleitend benannten Herausforderungen der mangelnden Unterstützung im Produktentwicklungsprozess durch Wissensmanagement und die Schwierigkeiten der digitalen Prozessmodellierung werden im folgenden Kapitel näher erläutert, miteinander verknüpft und eine gemeinsame Zielsetzung abgeleitet.

2 Problembeschreibung und Zielsetzung

Wissensmanagementmethoden haben den Zweck, ein Problem im Umgang mit Wissen zu lösen. Um dieses Problem und die dafür zu entwickelnde Lösung besser charakterisieren zu können, ist es empfehlenswert, das Problem den sechs Kernaktivitäten des Wissensmanagements zuzuordnen (Probst et al. 2012). Mit Hilfe dieser Kategorisierung, in welcher ein Problem einer oder mehreren Kernaktivitäten (Wissen identifizieren, bewahren, nutzen, (ver-)teilen, erwerben und entwickeln) zugewiesen werden kann, wird eine zielgerichtete Auswahl an passenden Wissensmanagementmethoden mittels einer Methodenmatrix (Binz et al. 2016) begünstigt. Die für den Produktentwicklungsprozess relevante prozessorientierte Zuordnung der Wissensmanagementmethoden anhand von Produktentwicklungsschritten oder -aktivitäten findet allerdings weder in der Literatur noch in der Praxis statt. Aus diesem Grund werden Wissensmanagementmethoden, wie bspw. Lessons Learned, Best Practices, Story Telling oder Wiki, im Kontext der Produktentwicklung oft falsch oder gar nicht angewendet. Als Kernaussage aus aktuellen Studien sowie zuvor beleuchteter Literatur kann zusammengefasst werden, dass Unternehmen Unterstützung benötigen, wenn neben konventionellen Produktentwicklungsproblemen zusätzlich Herausforderungen des Wissensmanagements gelöst werden müssen (BMW 2015).

Ein Ansatz, diese Herausforderung zu bewältigen, ist die Vorteile der Digitalisierung in Form der digitalen Geschäftsprozessmodellierung zu nutzen. Die Knowledge Modelling and Description Language (KMDL) ist eine semiformale Modellierungssprache, mit welcher wissensintensive Geschäftsprozesse modelliert werden können (Gronau 2009). Im Vergleich zu anderen Modellierungssprachen bietet die KMDL hinsichtlich der Darstellung von Informationsflüssen und Wissenstransformationen erhebliche Vorteile. In den digitalen Prozessmodellen ist erkennbar welche Informationen, wann und wie verwendet werden. Darüber hinaus wird die Art und Weise der Nutzung von personengebundenem Wissen dargestellt. Wenn die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung nach Becker et al. (2012) hinsichtlich Richtigkeit, Relevanz, Wirtschaftlichkeit, Klarheit, Vergleichbarkeit und des systematischen Aufbaus während der KMDL-Modellierung eingehalten wurden, hat das digitale Prozessmodell des unterstützenden Produktentwicklungsprozesses eine hohe Abbildungsgüte und kann als valide angesehen werden (Becker et al. 2012).

Dieses digitale Prozessmodell stellt die Basis umfangreicher Analysemöglichkeiten dar. Um dieses digitale Prozessmodell zweckmäßig und zielgerichtet unterstützen zu können, werden zusätzlich konventionelle Produktentwicklungsmethoden sowie gängige Wissensmanagementmethoden ebenfalls mit der KMDL modelliert und als digitale Prozessmodelle zur Verfügung gestellt. Demzufolge sind der unterstützende Prozess und die dafür anzuwendenden Methoden (Wissensmanagement- und Produktentwicklungsmethoden) mit derselben Modellierungssprache darzustellen. Die lösungsfördernden Methoden sind als Sammlung in einem Katalog aufgelistet. Der Aufbau und die Handhabung des Katalogs sind an die Systematik von Konstruktionskatalogen nach Roth (1994) angelehnt, da diese im Bereich der Produktentwicklung bekannt und etabliert sind. Bevor der Katalog im Detail vorgestellt

wird, werden im folgenden Kapitel die für die Entwicklung des Katalogs notwendigen theoretischen Grundlagen kurz erläutert.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zum einen das Forschungsgebiet Produktentwicklungsmethoden mit dem Fokus „Konstruktionskataloge“ kontextspezifisch analysiert. Zum anderen wird auf die besonderen Merkmale von Wissensmanagementmethoden mit Fokussierung der Modellierungssprache „Knowledge Modelling and Description Language“ (KMDL) eingegangen, um die digitale Prozessmodellierung besser nachvollziehen zu können. Das Kapitel schließt mit einer Schlussfolgerung und Verknüpfung beider Themengebiete.

3.1 Produktentwicklungsmethoden

Im Gegensatz zu den allgemein anwendbaren Wissensmanagementmethoden können Produktentwicklungsmethoden prozessorientiert zugeordnet und angewendet werden. Die Richtlinie VDI 2221 gibt für einen generischen Produktentwicklungsprozess modulare und iterative Prozessschritte vor, welche unterschiedliche Arbeitsergebnisse hervorbringen (VDI 2221). Diese Arbeitsergebnisse können methodisch unterstützt werden. Auf besondere Merkmale und den systematischen Umgang mit Produktentwicklungsmethoden wird an dieser Stelle verzichtet, da diese in der einschlägigen Literatur bereits detailliert beschrieben sind (vgl. (Feldhusen und Grote 2013)). Die analysierten und modellierten Produktentwicklungsmethoden sind im Folgenden aufgelistet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Sammlung an konventionellen Produktentwicklungsmethoden

ABC-Analyse	Morphologischer Kasten
Anforderungsliste	Nutzwertanalyse
Auswahlliste	Paarweiser Vergleich
Brainstorming	Portfolioanalyse
Checkliste	Produkt-Markt-Matrix
Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse	Quality Function Deployment (QFD)
Funktionenanalyse	Qualitative/quantitative Fehlerbaum-analyse
Kano-Modell	SWOT-Analyse
Konstruktionskataloge	Technische und wirtschaftliche Bewertung
Lastenheft und Pflichtenheft	Theorie des erfinderischen Problemlösens
Mind Map	Walt Disney Methode

Diese Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist modular erweiterbar sowie anpassbar. Im Folgenden wird auf die Produktentwicklungsmethode „Konstruktionskatalog“ im Detail eingegangen, da diese Kenntnisse genutzt werden, um den Katalog für Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess abzuleiten.

3.1.1 Konstruktionskataloge

Konstruktionskataloge erfüllen den Zweck, den Konstrukteur beim methodischen Konstruieren zu unterstützen und diesem ein breiteres Spektrum an möglichen Lösungen zu bieten. Roth (1994) beschreibt in Konstruktionskatalogen wiederkehrende Lösungen sowie Baugruppen innerhalb des Konstruktionsprozesses und ordnet diesen Basisfunktionen sowie vordefinierte Effekte zu. Diese wiederkehrenden Lösungen stellen externalisierte und formalisierte Wissensinhalte von Konstruktionswissen dar. Der Einsatz eines Katalogs löst den Konstruktionsprozess von der Abhängigkeit des impliziten Fachwissens des jeweiligen Konstrukteurs und führt zu einer reproduzierbareren Gestaltung des Prozesses (VDI 2222). Zudem ermöglichen die Kataloge dem Nutzer einen gezielten Zugriff auf seine Inhalte. Der Aufbau eines Katalogs ist im Hinblick auf die Benutzerfreundlichkeit stets einheitlich gestaltet und begrifflich präzise ausgeführt. Kataloge mit eindimensionalem Gliederungsteil sind am gängigsten und haben sich bei der Erstellung eines neuen Katalogs bewährt. Der Konstruktionskatalog

mit eindimensionalem Gliederungsteil setzt sich aus einem Gliederungs-, einem Haupt- und einem Zugriffsteil sowie optional einem Anhang zusammen. (Roth 1994)

Der Gliederungsteil beeinflusst die Handhabbarkeit und den schnellen Zugriff auf die Kataloginhalte, er bestimmt den systematischen Aufbau des Konstruktionskatalogs durch die Gliederung in ordnende Gesichtspunkte. Der Hauptteil eines Konstruktionskatalogs enthält den eigentlichen Informationsinhalt, bei diesem handelt es sich je nach Art des Katalogs um Objekte, Operationen oder Lösungen. Der Zugriffsteil ist im Speziellen für Konstruktionskataloge charakterisierend und soll dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechend optimal angepasst werden. Die Zugriffsmerkmale sollen den jeweiligen Inhalt des Hauptteils so kennzeichnen, dass der Katalognutzer bei Vorgabe einer bestimmten Eigenschaft stets die besten Lösungen identifizieren und nicht in Frage kommende Lösungen unmittelbar ausschließen kann. Insgesamt werden zwischen vier Klassen von Katalogen bezüglich des Verwendungszwecks unterschieden, dabei handelt es sich um Objekt-, Operations-, Lösungs- und Beziehungskataloge. Lösungskataloge sind spezielle Konstruktionskataloge, die stets die Lösung einer Aufgabenstellung innerhalb eines Konstruktionsabschnitts enthalten. (Roth 1994)

3.2 Wissensmanagementmethoden

Wie in der Problembeschreibung erläutert, sind Wissensmanagementmethoden im Gegensatz zu Produktentwicklungsmethoden nicht spezifisch für Probleme der Produktentwicklungsaktivitäten konzipiert. Ungeachtet dessen können Wissensmanagementmethoden bei zweckmäßiger Anwendung die Lösungsfindung für Produktentwicklungsprobleme unterstützen. Sämtliche Wissensmanagementmethoden lassen sich auf die zwei wesentlichen Grundlagen des Wissensmanagement zurückführen. Zum einen die sogenannte Wissensspirale von Nonaka und Takeuchi (1995), welche erläutert, wie Wissen im Unternehmensumfeld entsteht, genutzt und verteilt wird. Zudem werden die Wissensumwandlungsprozesse in Form des SECI-Modells (Akronym für **S**ocialization, **E**xternalization, **C**ombination, **I**nternalization) erläutert und erlauben eine Differenzierung zwischen impliziten und expliziten Wissensinhalten. Die andere wesentliche Grundlage sind die von Probst et al. (2012) definierten Kernaktivitäten des Wissensmanagements. Diese wurden durch die Kategorisierung sich wiederholender Aktivitäten von wissensmanagementspezifischen Problemstellungen abgeleitet. Die Kernaktivitäten Wissen bewahren, identifizieren, erwerben, entwickeln, (ver-)teilen und nutzen werden oftmals als Auswahlkriterium für eine anschließende Methodenauswahl verwendet (Lehner 2014).

Jede Wissensmanagementmethode adressiert mindestens eine Kernaktivität und beschreibt eine Wissensumwandlung zwischen impliziten und expliziten Wissensinhalten. Dennoch unterscheiden sich bestimmte Wissensmanagementmethoden in Form der Ablauf- und Aufbauorganisation erheblich voneinander.

Da Wissensmanagementmethoden im Allgemeinen problemspezifisch sind und sich an keinem vorgegebenen Geschäftsprozess orientieren, übersteigt die Anzahl verfügbarer Methoden diejenigen der Produktentwicklungsmethoden in einem hohen Maße. In Vorbereitung für den zu entwickelnden Katalog für Wissensmanagementlösungen wurden folgende vorläufige Wissensmanagementmethoden als praxisrelevant eingestuft und detaillierter analysiert (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Sammlung an Wissensmanagementmethoden (Binz et al. 2016)

Best Practice	Think Tanks
Communities of Practice	Virtual Knowledge Center
E-Learning	Wiki
Knowledge Modelling and Description Language - Methode	Wissenskarten
Lessons Learned	Yellow Pages
Story Telling	

Diese Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist modular erweiterbar sowie anpassbar. Nachfolgend wird auf die Wissensmanagementmethode und Modellierungssprache „Knowledge Modelling and Description Language“ (KMDL) im Detail eingegangen, da das analysierbare KMDL-Prozessmodell des Produktentwicklungsprozesses und die mit KMDL modellierten Methoden des Katalogs, maßgeblich die Funktionalität und den Aufbau des Katalogs prägen.

3.2.1 Knowledge Modelling and Description Language (KMDL)

Die von Gronau (2009) entwickelte semiformale Modellierungssprache „Knowledge Modelling and Description Language“ (KMDL) ermöglicht eine digitale Abbildung von wissensintensiven Geschäftsprozessen. Das Alleinstellungsmerkmal dieser Modellierungssprache ist die Berücksichtigung der verschiedenen Arten der Wissensumwandlungen (vgl. (Nonaka und Takeuchi 1995) und die daraus resultierende Nachvollziehbarkeit, wie personengebundenen Wissen organisiert werden kann. Ein weiterer Vorteil ist das Sichtenkonzept. Die übergeordnete Prozesssicht stellt den Rahmen des digitalen Prozessmodells dar. Die detailliert modellierte Aktivitätssicht bildet sämtliche Aktivitäten und die hierfür notwendigen Informationen und personengebundenen Wissensinhalte ab. Auf eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Objekte, Notationen und Modellierung von KMDL wird an dieser Stelle verzichtet und auf Gronau (2009) verwiesen. In Bild 1 ist ein Ausschnitt der Aktivitätssicht der Produktentwicklungsmethode „System-FMEA“ beispielhaft mit KMDL modelliert.

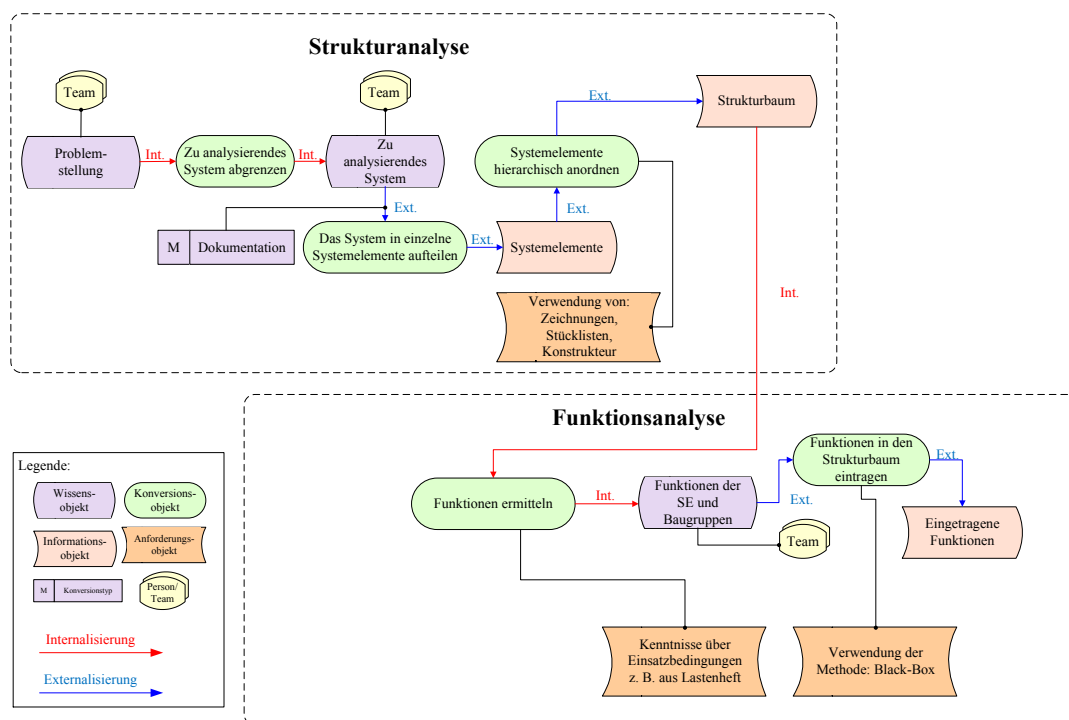


Bild 1: Ausschnitt aus KMDL-Prozessmodell der Aktivitätssicht der System-FMEA

3.3 Schlussfolgerung aus dem Stand der Technik

Produktentwicklungsmethoden sind prozessorientiert und ergeben im Normalfall eine für den Produktentwicklungsprozess zweckmäßige Lösung, allerdings sind die wissensmanagementspezifischen Anteile einer solchen Methode in der Regel unbekannt. Im Gegensatz hierzu sind allgemeine Wissensmanagementmethoden prozessungebunden und konkrete Handlungsempfehlungen für den Produktentwicklungsprozess sind in diesen nicht vorhanden. Das abgeleitete Ziel ist es, eine Sammlung an Methoden des Wissensmanagements und des Produktentwicklungsprozesses anzubieten, welche in Kombination mit einem zugrundeliegenden digitalen Prozessmodell eine zweckmäßige Lösung für ein durch Analysemöglichkeiten identifiziertes Problem anbietet. Der Aufbau und die Handhabung dieser Methodensammlung sind an die Systematik von eindimensionalen Konstruktionskatalogen angelehnt. Um die zum Teil komplexen Produktentwicklungsprobleme lösen zu können, bietet es sich an, die konventionellen Produktentwicklungsmethoden mit Methoden des Wissensmanagements zu vereinen. Diese Verknüpfung kombinierbarer Methoden kann terminologisch als Wissensmanagementlösung bezeichnet und hinsichtlich Einzelmethoden der Produktentwicklung bzw. des Wissensmanagements abgegrenzt werden. Der Katalog soll die Entwicklung von neuartigen Wissensmanagementlösungen fördern, um somit die Vorteile von etablierten Produktentwicklungsmethoden mit den Vorteilen von umfassenden Wissensmanagementmethoden zu vereinen.

4 Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess

Alleinstellungsmerkmal des Katalogs ist der zugrundeliegende modellierte Produktentwicklungsprozess und die damit verbundene Verknüpfung zu der Methodensammlung. Hierfür wird der unternehmensspezifische Produktentwicklungsprozess mit KMDL in ein digitales Prozessmodell überführt. Der wesentliche Kern des Prozessmodells sind die modellierten Aktivitäten (Arbeitsschritte, Entscheidungen) innerhalb des Produktentwicklungsprozesses. Dieses Prozessmodell visualisiert und beschreibt Informationsflüsse sowie die Umwandlung von bestimmten Wissensinhalten. Der vorzustellende Katalog entspricht einem Lösungskatalog (siehe Kapitel 3.1.1) und basiert auf diesem Prozessmodell. Im Vergleich zu anderen Ansätzen (Orth et al. 2011; Viotor et al. 2015; Albers et al. 2015) enthält jede Einzelmethode bzw. Wissensmanagementlösung ein modelliertes Prozessmodell, welches mit dem Produktentwicklungsprozessmodell abgeglichen werden kann. Der Katalog dient als Unterstützungsmaßnahme in einem produktentwicklungsspezifischen Wissensmanagementverfahren (WM^{KMU}) (Laukemann et al. 2015) und wird in der Synthesephase eingesetzt (siehe Bild 2).

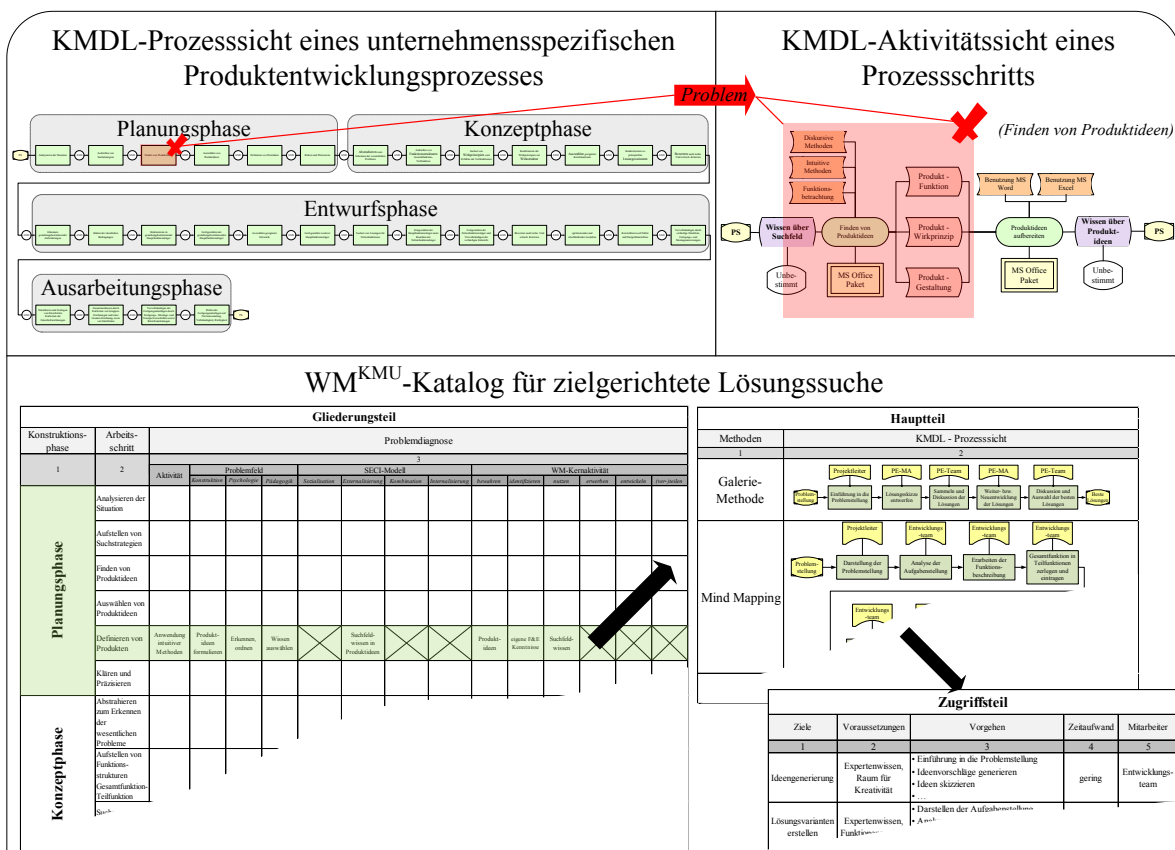


Bild 2: Einbindung und Funktionsweise des Katalogs in WM^{KMU}

In den vorherigen Arbeitsschritten wurde der unternehmensspezifische Produktentwicklungsprozess umfassend analysiert und mit KMDL in ein digitales Prozessmodell überführt (siehe Bild 2, KMDL-Prozesssicht). Die von KMDL bereitgestellten Analysemöglichkeiten basieren auf Prozessmusteranalysen (Gronau 2009) und resultieren in ersten Unterstützungspotenzialen (siehe Bild 2, rote Markierungen). Für die Beantwortung der Fragen **Wie** (Welche Methode bzw. Methodenkombination soll angewendet werden?) und **Was** (Welche Aktivität muss optimiert werden?) bietet der Katalog eine Unterstützung an. Im aktuellen Stand des Katalogs besteht der Gliederungsteil aus drei Spalten (siehe Bild 3). Der Einstieg in den Katalog wird über die Konstruktionsphasen (Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten) nach (VDI 2221) eingeleitet. Da die Unterstützungspotenziale mit Hilfe der KMDL Analysemöglichkeiten identifizierbar sind und einem Prozessschritt zugeordnet werden, geben die jeweiligen Analyseresultate die Konstruktionsphasen vor (siehe Bild 3, grüne Markierungen). Die

nächste Spalte und somit eine weitere Detaillierung ist die Zuordnung des Arbeitsschrittes. Die Arbeitsschritte sind unternehmensspezifisch anpassbar, orientieren sich allerdings in der generischen Ausführung an den Erkenntnissen der Konstruktionslehre von Pahl und Beitz (2007). Nachdem der Arbeitsschritt mit Hilfe der KMDL-Aktivitätssicht eingegrenzt wurde, kann die Problemdiagnose begonnen werden. Diese Spalte hat wiederum vier Unterspalten. Zuerst wird die problembehaftete Aktivität innerhalb des Arbeitsschrittes identifiziert. Das bedeutet, dass die in der Aktivitätssicht modellierten Aufgaben auf Objektebene nach möglichen Problemen untersucht werden. Zusätzlich kann das mögliche Problem mit den Problemfeldern „Konstruktion“, „Psychologie“ und „Pädagogik“ nach Pahl (1994) weiter präzisiert werden. Wenn die für das Problem verursachenden Objekte identifiziert wurden, wird das SECI-Modell (vgl. Kapitel 3.2) zur weiteren Analyse hinzugezogen werden. Auf diese Weise werden die Probleme mit den Konversionstypen der Wissensschaffung und der Informationsverarbeitung detaillierter beschrieben. Die letzte Spalte der Problemdiagnose baut auf den Erkenntnissen des SECI-Modells auf und adressiert eine oder mehrere Kernaktivitäten des Wissensmanagements.

Erläuterung des Beispiels (vgl. hierzu Bild 2):

Die KMDL-Analyse hat ergeben, dass in der Planungsphase die Aktivität „Finden von Produktideen“ mangelhafte Arbeitsergebnisse liefert. In der Aktivitätssicht (siehe Bild 2, KMDL-Aktivitätssicht) konnten das Anforderungsobjekt „intuitive Methode“ sowie die als Informationsobjekte modellierten Produktideen als Ursache für den Mangel identifiziert werden. Der Katalog unterstützt bei diesem Problem wie folgt:

Die Konstruktionsphase und der betroffene Arbeitsschritt sind durch die KMDL-Analyse bekannt. Die problembehaftete Aktivität konnte in der Aktivitätssicht erkannt werden. Die Problemfelder charakterisieren das Problem im Detail. Die Wissensschaffung wird durch eine Externalisierung dargestellt. Aufbauend auf den vorherigen Erkenntnissen lassen sich die relevanten WM-Kernaktivitäten zuordnen. Mit Hilfe der Problemdiagnose und der Zuweisung von Konstruktionsphase sowie Arbeitsschritt, lässt sich durch einen Metadatenvergleich mit dem Zugriffsteil eine zweckmäßige Sammlung an passenden Methoden zur Lösung des Problems anbieten (siehe Bild 4 und 5).

Gliederungsteil															
Konstruktionsphasen	Arbeitsschritt	Problemdiagnose													
		Aktivität	Problemfeld			SECI-Modell					WM-Kernaktivität				
1	2		Konstruktion	Psychologie	Pädagogik	Sozialisation	Externalisierung	Kombination	Internalisierung	bewahren	identifizieren	nutzen	erwerben	entwickeln	(ver-)teilen
Planungsphase	Analysieren der Situation														
	Aufstellen von Suchstrategien														
	Finden von Produktideen	Anwendung intuitiver Methoden	Produktideen formulieren	Erkennen, ordnen	Wissen auswählen		Suchfeldwissen in Produktideen				Produktideen	eigene F&E Kenntnisse	Suchfeldwissen		
	Auswählen von Produktideen														
	...														

Bild 3: Ausschnitt des Gliederungsteils mit einem Beispiel (Finden von Produktideen)

Der an den Gliederungsteil anschließende Hauptteil beinhaltet eine ausführliche Sammlung an Einzelmethoden der Produktentwicklung sowie des Wissensmanagements (vgl. Kapitel 3.1 & 3.2). Der Hauptteil besteht aus zwei Spalten. In der ersten Spalte wird die Methode benannt, während in der zweiten Spalte die KMDL-Prozesssicht der Methode dargestellt ist. Dies entspricht einer Prinzipskizze beim konventionellen Konstruktionskatalog und soll dem Konstrukteur einen Überblick der anzuwendenden Methode geben (siehe Bild 4).

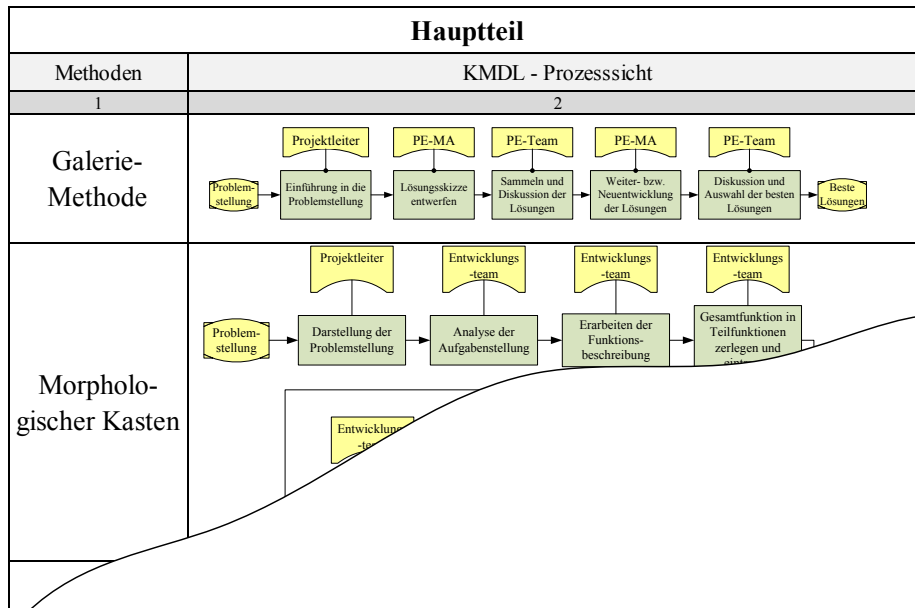


Bild 4: Ausschnitt des Hauptteils mit einem Beispiel (Morphologischer Kasten)

Der Zugriffsteil vervollständigt die im Hauptteil aufgeführten Methoden mit zusätzlichen Informationen (siehe Bild 5). Diese Informationen werden in Form eines Methodensteckbriefs aufbereitet und ermöglichen somit eine einfache Vergleichbarkeit, falls mehrere Methoden in Betracht gezogen werden.

Zugriffsteil				
Ziele	Voraussetzungen	Vorgehen	Zeitaufwand	Mitarbeiter
1	2	3	4	5
Ideengenerierung	Expertenwissen, Raum für Kreativität	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung in die Problemstellung • Ideenvorschläge generieren • Ideen skizzieren • ... 	gering	Entwicklungs-team
Lösungsvarianten erstellen	Expertenwissen, Funktionenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellen der Aufgabenstellung • Analyse der Aufgabenstellung • Erarbeitung der... • ... 		

Bild 5: Ausschnitt des Zugriffsteils mit einem Beispiel (Morphologischer Kasten)

Die Funktionsweise des Katalogs wird durch den Aufbau des Gliederungsteils vorgegeben. Die stetige Detaillierung des Problems anhand der Spalteneinträge des Gliederungsteils ermöglicht eine zweckmäßige Auswahl an Einzelmethode. Darüber hinaus kann die Systematik des Katalogs, Gemeinsamkeiten und Vorteile einzelner Produktentwicklungs- und Wissensmanagementmethoden zweckmäßig kombinieren und als Wissensmanagementlösung vorstellen. Somit können ganz neue Unterstützungsmaßnahmen entwickelt werden, wie beispielsweise die Durchführung des Morphologischen Kastens mit paralleler Aufbereitung eines Story Telling Dokuments zur Wissensbewahrung (siehe Bild 6).

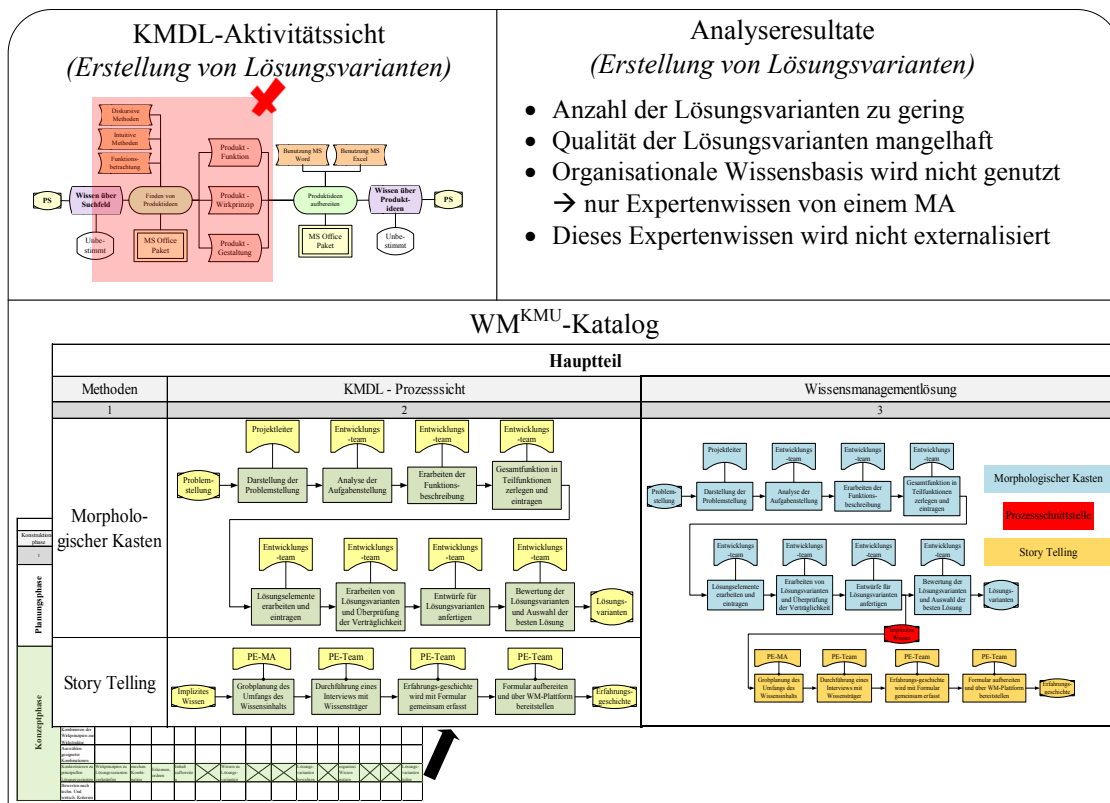


Bild 6: Kombination von Produktentwicklungs- und Wissensmanagementmethode zur Wissensmanagementlösung

5 Diskussion

Der in diesem Beitrag vorgestellte Katalog dient als Unterstützungsmaßnahme, um zweckmäßige Methoden für zuvor identifizierte und auf einer KMDL-Analyse beruhende Problemstellen im Prozess anzubieten. Der Katalog ist Bestandteil eines produktentwicklungsspezifischen Wissensmanagementverfahrens und ständigen Iterationen unterworfen. Anhand von verfügbaren Prozessmodellen von Methoden aus der Literatur sowie aus der Praxis konnte die Anwendbarkeit des Gliederungsteils initial überprüft werden. Die Anwender konnten für vorgegebene Fallbeispiele, anhand der Navigation des Gliederungsteils eine oder mehrere zweckmäßige Methoden für das identifizierte Problem auswählen. Das bedeutet, dass die im Gliederungsteil aufgeführten Spalteneinträge eine zweckmäßige und zielorientierte Methodenauswahl begünstigen. Die Entwicklung von neuartigen Unterstützungsmaßnahmen in Form von Wissensmanagementlösungen (siehe Bild 6) wird durch den Katalog begünstigt, erfolgt aber noch nicht automatisiert. Eine umfassende Unterstützungsevaluation des Katalogs im industriellen Umfeld steht noch aus.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Katalog basiert auf fundierten Recherchen des Stands der Technik in den Forschungsfeldern „Produktentwicklungsmethoden“ und „Wissensmanagementmethoden“. Die in aktuellen Studien hervorgebrachten Defizite im Umgang mit Wissensmanagementmethoden wurde auf den Geschäftsprozess „Produktentwicklungsprozess“ abstrahiert und eine Lösung in Form des präsentierten Katalogs erarbeitet. Basierend auf den KMDL-Analyseergebnissen wird der mit der Problemlösung beauftragte Konstrukteur bei Benutzung des Katalogs geführt und bei der Auswahl einer geeigneten Lösung unterstützt.

In Zukunft wird ein vorhandenes Simulationstool in die Funktionalität des Katalogs miteingebunden, um ausgewählte Lösungen auf digitaler Prozessmodellebene zu simulieren, bevor diese in den realen Produktentwicklungsprozess integriert werden.

Literaturverzeichnis

- Albers et. al 2015 Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.: InnoFox – Situationsspezifische Methodeneempfehlung im Produktentstehungsprozess. In: Binz, H. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015. Stuttgart : Fraunhofer Verl., 2015.
- Becker et. al 2012 Becker, J.; Probandt, W.; Vering, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Springer, Berlin Heidelberg, 2012.
- Binz et. al 2016 Binz, H.; Roth, D.; Laukemann, A.: Wissensmanagement. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser, 2016, S. 247–271.
- Birkhofer 2014 Birkhofer, H.: Are we aware what we are doing in Design Research? In: ICDES, International Conference on Design Engineering and Science, 2014.
- BMWi 2013 Studie des BMWi: Fit für den Wissenswettbewerb, 2013.
- BMWi 2015 Kurzfassung der Studie des BMWi: Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand, 2015.
- Dörfler 2015 Dörfler, M.: Warum das Geschäft mit den Produktionsdaten nicht automatisch eine Goldgrube ist. In: Innovationsmanager (2015), Heft 35, S. 32–34.
- Ehrlenspiel und Meerkamm 2016 Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integration versus Spezialisierung. In: Konstruktion (2016), 1/2 - Januar/Februar.
- Feldhusen und Grote 2013 Feldhusen, J.; Grote, K-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer, 2013.
- Gronau 2009 Gronau, N.: Wissen prozessorientiert managen. Oldenbourg, 2009.
- Haufe 2014 Studie von Haufe im Wissensmanagement: Produktiver Umgang mit Wissen in Unternehmen: Studie. 2014.
- Laukemann et. al 2015 Laukemann, A.; Binz, H.; Roth, D.: Konzept eines produktentwicklungsspezifischen Wissensmanagementverfahrens. In: Binz, H. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015. Stuttgart : Fraunhofer Verl., 2015.
- Lehner 2014 Lehner, F.: Wissensmanagement, München: Hanser, 2014.
- Nonaka und Takeuchi 1995 Nonaka, I.; Takeuchi, H.: The knowledge-creating company, New York: Oxford University Press, 1995.
- Orth et. al 2011 Orth, R.; Voigt, S.; Kohl, I.: Praxisleitfaden Wissensmanagement, Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2011.
- Pahl 1994 Pahl, G.: Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren, Köln: Verl. TÜV Rheinland, 1994.
- Pahl und Beitz 2007 Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Springer, 2007.
- Probst et. al 2012 Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen, Gabler, 2012.
- Roth 1994 Roth, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Springer, 1994.
- Streibich 2016 Streibich, K-H.: Digitalisierung macht vor keiner Branche halt. In: VDI Nachrichten 2016, 29/30, S. 5.
- Vietor et. al 2015 Vietor, T.; Inkermann, D.; Bavendiek, A.: Methodos – Interaktives Methodenlernportal. In: Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP (2015), Ausgabe 1, S. 13–15.
- VDI 2221 1993 Richtlinie VDI 2221 Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
- VDI 2222 1982 Richtlinie VDI 2222 Februar 1982. Konstruktionsmethodik: Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen.

Die neue VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 „Wissensbasierte Konstruktion“

Thomas Luft¹, Daniel Roth², Sandro Wartzack¹, Hansgeorg Binz²

¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk), Deutschland

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Deutschland

luft@mfk.fau.de

Abstract: Ein entscheidender Faktor innerhalb des Produktentwicklungsprozesses ist der zielgerichtete und systematische Umgang mit Wissen. Das konstruktionsrelevante Wissen zu erfassen, zu formalisieren und in CAD-Systeme zu integrieren ist dabei von hohen Anforderungen geprägt. Verschiedene Methoden und Werkzeuge des „Wissensbasierten Konstruierens“ (Knowledge Based Engineering, kurz: KBE) können Konstrukteure dabei unterstützen, diese Herausforderungen erfolgreich zu bewältigen. Bislang existiert jedoch keine allgemeingültige Beschreibung zur Realisierung von KBE-Anwendungen. Daher ist die Zielsetzung des Beitrags die Vorstellung einer Vorgehensweise zur Umsetzung von KBE-Anwendungen, die sich aus den vier Phasen Planung, Entwicklung, Test sowie Betrieb einer KBE-Anwendung zusammensetzt. Zudem werden beteiligte Rollen und das Thema Wissensschutz betrachtet. Im abschließenden Kapitel erfolgen die Vorstellung grundsätzlicher (software-)technischer Lösungen zum wissensbasierten Konstruieren sowie eine konkrete Implementierung einer KBE-Systemanwendung.

Keywords:

Wissensmanagement, Wissensbasierte Konstruktion, CAD, Konstruktionsmethodik, Richtlinienarbeit

1 Problembeschreibung und Motivation

Produktentwickler und Konstrukteure in den Entwicklungsabteilungen produzierender Unternehmen sehen sich branchenunabhängig einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber. Die fortschreitende Globalisierung der Märkte, steigender Innovationsdruck und eine hohe Individualität der weltweiten Absatzregionen sind nur einige übergeordnete Beispiele. Dies stellt nicht nur an die Produkte sondern auch an den Produktentwicklungsprozess selbst hohe Anforderungen in Bezug auf die Erfassung, Formalisierung und Integration von konstruktionsrelevantem Wissen in CAD-Systeme als zentrales Softwarewerkzeug des Konstrukteurs.

Das „Wissensbasierte Konstruieren“ (engl. Knowledge Based Engineering, kurz KBE) stellt hilfreiche Methoden und Werkzeuge bereit, auf die Konstrukteure zurückgreifen können. Obwohl im Forschungsbereich des wissensbasierten Konstruierens bereits seit den 1980er Jahren verschiedene Forschungsansätze entwickelt wurden, existiert für das industrielle Umfeld bislang keine einheitliche und allgemeingültige Beschreibung, mit der eine KBE-Anwendung geplant, entwickelt und in Unternehmen eingeführt und betrieben werden kann. Speziallösungen einzelner Firmen lassen sich, sofern sie veröffentlicht werden, nur mit großem Aufwand auf andere Anwendungen übertragen.

Eine Notwendigkeit und damit einhergehend die Motivation für Forschungsarbeiten in diesem Bereich stellen einige nachfolgend genannte Vorteile dar, die durch eine Einführung von KBE in Unternehmen entstehen. Beispielsweise kann die notwendige Analyse der Produkte und Prozesse auf KBE-Tauglichkeit frühzeitig *Standardisierungspotenzial* identifizieren und mit der damit zugrunde liegenden Wiederverwendung vorhandener Baugruppen und Einzelteile zu beschleunigten Prozessen in Entwicklung, Fertigung und Montage führen. Der hohe Grad an *Automatisierung* wiederkehrender Routinetätigkeiten (z. B. Auslegen von Maschinenelementen) durch KBE-Technologien ermöglicht assoziativ angepasste und änderbare Konstruktionen. Die rechnerunterstützte Anwendung formalisierter Expertenregeln und die gesicherte Wiederverwendung freigegebener Baugruppen führen zu einer

gesteigerten *Funktionssicherheit* der Produkte und zu einem Höchstmaß an *Prozessstabilität*. Das stetige Dokumentieren des gegenwertigen Produktwissens innerhalb KBE-Anwendungen sichert nachvollziehbare Entscheidungen bezüglich der Produktkonfiguration für alle Prozessbeteiligten sowie den Zugriff auf das den richtigen Produkten und Prozessen zugeordnete Wissen in allen Unternehmensbereichen. Diese *Schaffung von Transparenz* reduziert die Problematik der Mitarbeiterfluktuation für Unternehmen, da das Basiswissen stets gespeichert wird und damit für nachfolgende Mitarbeiter zugänglich ist. Von großer Bedeutung für den Unternehmenserfolg ist die ebenfalls durch KBE erzielbare Erhöhung der *Kunden- und der Mitarbeiterzufriedenheit*. Eine größere Zufriedenheit der Kunden wird erreicht, indem zum einen die Subjektivität von Lösungen reduziert, zum anderen der Kunde über webbasierte Produktkonfigurationen angebunden wird. Letzteres führt zu einer beschleunigten kundenspezifischen Angebotserstellung und einer präziseren Preisbestimmung. Zur Zufriedenheit der Mitarbeiter zählt u. a. die Entlastung des Konstrukteurs, indem Verwaltungsprozesse (z. B. die Freigabe oder Suche von Bauteilen) in den Auslegungsprozess integriert werden.

2 Ziel des Beitrags und zentrale Forschungsfrage

Im Fachausschuss „Wissensbasierte Konstruktion“ ist eine VDI-Richtlinie entstanden, die die zuvor benannten Bedarfe adressiert. Der Anwender dieser Richtlinie soll bei der Umsetzung von KBE-Anwendungen die Gewissheit erhalten, nichts Grundlegendes falsch zu machen, konkrete und anwendungsbezogene Handlungsempfehlungen sowie fundierte, wissenschaftliche Inhalte an die Hand zu bekommen. Daher ist die Hauptzielsetzung des Beitrags, die in dieser Richtlinie erarbeitete allgemeingültige Vorgehensweise für die Umsetzung einer KBE-Anwendung, wie sie dem Leser und Anwender künftig zur Verfügung steht, vorzustellen. Daher sollen mit der hier präsentierten Richtlinie Leser aus universitärer und industrieller Forschung eine Antwort auf folgende **Forschungsfrage** erhalten:

Wie lässt sich eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Durchführung von KBE-Projekten mit allen erforderlichen Rollen sowie hilfreichen Handlungsanweisungen und Empfehlungen beschreiben?

Zur Beantwortung der formulierten Forschungsfrage werden im Folgenden zunächst die Grundlagen der Wissensbasierten Konstruktion und anschließend die Vorgehensweise zur Einführung von KBE im Unternehmen in Anlehnung an die genannte Richtlinie erläutert. Da es ein besonderes Anliegen ist, dass der Anwender auf konkrete und anwendungsbezogene Empfehlungen und Beispiele zurückgreifen kann, wird die Umsetzung einer KBE-Anwendung als Projekt verstanden, in dem die Theorie des Projektmanagements mit KBE-Grundlagen kombiniert wird. Insbesondere für KBE-Inhalte bietet die hier vorgestellte Richtlinie ein wichtiges Fundament, das als Erweiterung zur VDI Richtlinie 5610 „Wissensmanagement im Ingenieurwesen“ [VDI5610, 2009] aufzufassen ist. Im Rahmen dieses Beitrags wird auch ein konkretes Implementierungsbeispiel einer KBE-Anwendung kurz vorgestellt.

3 Grundlagen der wissensbasierten Konstruktion

Für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel sollen getroffene Festlegungen sowie allgemeine Sichtweisen dargelegt werden. Einen zentralen Aspekt stellt die Abgrenzung der beiden Begriffe Konstruieren und Konfigurieren dar. **Konstruieren** beinhaltet alle in der Vorstellung der konstruierenden Person existierenden Arbeitsschritte, um technische Artefakte (z. B. Einzelteile, Baugruppen, Anlagen) eindeutig zu beschreiben und darzustellen. Demgegenüber fokussiert das oft auch mit Produktkonfiguratoren gleichgesetzte **Konfigurieren** vor allem das Zusammensetzen eines Produkts auf der Basis von standardisierten Komponenten und geprüften Konfigurationsregeln (nach[Conrad 2008]).

Da die Ressource Wissen eine wesentliche Rolle in diesem Beitrag wie auch in der Richtlinie einnimmt, gilt es diese besonders zu betrachten. In der Literatur lassen sich eine Vielzahl an verschiedenen Definitionen und Ansichten hinsichtlich der Begriffe, der Strukturierungsarten, Klassifikation usw. bezüglich des Wissens auffinden. Der Richtlinie liegt die in [Roth et al. 2010] entwickelte Unterscheidung zugrunde, nach der sich **Wissen** durch folgende fünf Strukturparameter beschreiben lässt: Wissenstyp (z. B. Fachwissen), Wissensart (z. B. implizit), Wissensform (z. B. Formel), Wissensort (z. B. Datenbank) und Wissensqualität (z. B. Vollständigkeit).

Gilt es, Wissen aus verschiedenen Wissensquellen zu formalisieren, also in eine explizite Wissensrepräsentationsform zu überführen, wird von der Wissensakquisition gesprochen. Der Prozess der Wissensakquisition setzt sich wiederum aus den Phasen „Wissenserhebung“ sowie „Wissensinterpretation“ zusammen [Wartzack 2001]. Die **Wissensakquisition** dient somit der Extraktion und Sammlung von Wissen aus verschiedenen Wissensorten, wohingegen die **Wissensinterpretation** zur Analyse und Strukturierung des erhobenen Wissens sowie dessen Überführung in ein formales, allgemeingültiges Modell des Problemlösungsprozesses der jeweiligen KBE-Anwendung beiträgt.

Im Allgemeinen lassen sich drei Arten der **Wissensakquisition** unterscheiden: indirekt, direkt und automatisch. Die indirekte Wissensakquisition basiert dabei auf dem Dialog zwischen Experten und Wissensingenieur. Bei der direkten Wissensakquisition formuliert der Experte mit Unterstützung von rechnerunterstützten Akquisitionstools sein Wissen selber. Mittels automatisierter Wissensakquisition erfolgt die Überführung von textuellem in rechnerverarbeitbares Wissen sowie die Extraktion von Wissen aus Fallbeispielen, jeweils ohne Eingreifen des Experten oder Wissensingenieurs.

Typische Repräsentationsformen für Wissen im Umfeld von KBE-Anwendungen stellen hierbei Regeln, Constraints oder auch Frames dar. Der Begriff **Wissensrepräsentation** umfasst somit eine Menge von syntaktischen (Regeln der Anordnung) und semantischen (Regeln der Bedeutung) Vorschriften zur Beschreibung von Dingen und Sachverhalten. Regeln setzen sich aus einem Bedingungsteil und einem Aktionsteil zusammen. Ein Constraint entspricht der Beschreibung eines mathematischen Zusammenhangs. Frames werden formal als Analogien zum „klassischen“ Karteikartensystem verstanden, welche sich zur Repräsentation sich wiederholender Objekte, wie Bauteilen oder Baugruppen, eignen. Einer erfolgreichen Wissensakquisition folgt die Wissensimplementierung.

4 Vorgehensweise zur Einführung von KBE- Projekten

Um die pragmatische Durchführung eines KBE-Projekts zu ermöglichen, wurde im Rahmen der VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 eine systematische Vorgehensweise erarbeitet (vgl. Abbildung 1).

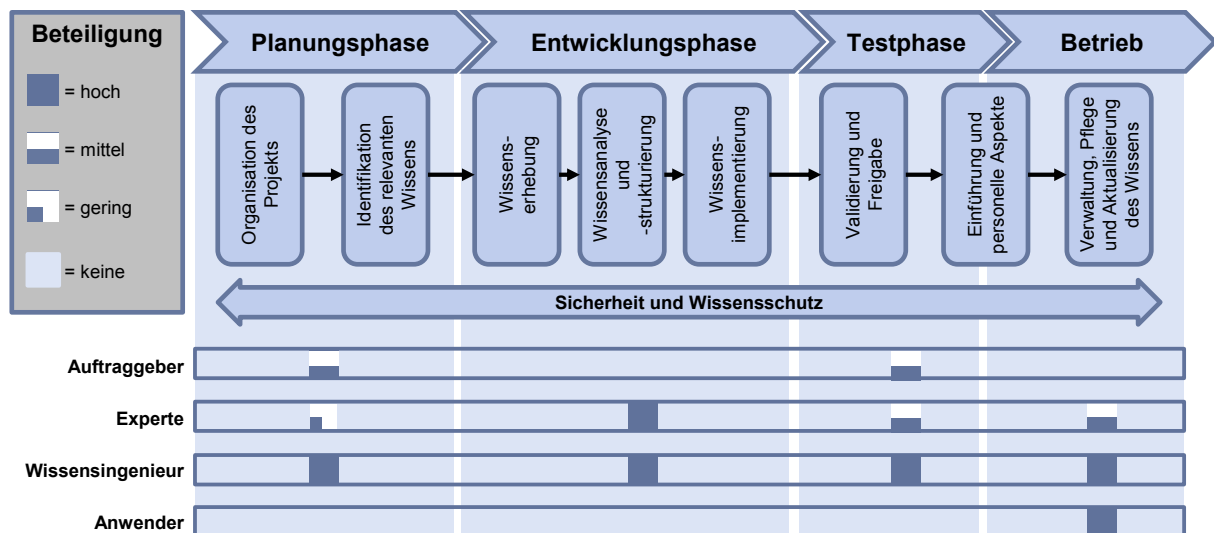


Abbildung 1: Gesamtverfahrensweise im Phasenmodell eines KBE-Projekts (vgl. [Luft et al. 2012])

Wie daraus hervorgeht, lässt sich ein KBE-Projekt in die vier Phasen Planung, Entwicklung, Test und Betrieb untergliedern. Hauptbestandteil der Planungsphase ist die Organisation von KBE-Projekten sowie die Identifikation des relevanten Wissens. Die daran anschließende Entwicklungsphase beinhaltet insbesondere Strategien und Techniken der Wissenserhebung, Methoden zur Wissensanalyse und -strukturierung sowie verschiedene Möglichkeiten der Wissensimplementierung. Im Mittelpunkt der Testphase steht das Vorgehen zur Validierung und Freigabe. In der Betriebsphase stehen Aufgaben zur Verwaltung, Pflege und Aktualisierung des Wissens im Vordergrund.

Zur Ausführung der Aufgaben innerhalb der einzelnen Phasen des KBE-Projekts werden verschiedene Rollen definiert, die unterschiedlich stark in die genannten Phasen involviert sind. Auf die Rollen eines KBE-Projekts, das sich über alle Phasen erstreckende Querschnittsthema „Sicherheit und Wissensschutz“ sowie die einzelnen Projektphasen wird in den nachfolgenden Kapiteln verkürzt eingegangen.

4.1 Rollen in einem KBE-Projekt

Für die Durchführung eines KBE-Projekts bedarf es verschiedener Kompetenzen und Verantwortlichkeiten. Das vom „Denken in Personen“ abweichende „Denken in Rollen“ ermöglicht es, einer Person auch mehrere Rollen aufzutragen [Luft et al. 2012]. Bereits bestehende Rollen (z. B. CAD-Konstrukteur, Berechnungsingenieur) sollen durch die Rollen eines KBE-Projekts jedoch nicht ersetzt werden. Vielmehr werden diesen Rollen weitere, KBE-spezifische Aufgaben zugewiesen. Typische Rollen eines KBE-Projekts stellen dabei der Auftraggeber, der Experte, der Wissensingenieur und der Anwender dar, wobei die Rolle des Wissensingenieurs die höchste Beteiligung über alle Phasen hinweg aufweist und damit eine zentrale Stellung einnimmt (siehe auch Abbildung 1).

Der **Auftraggeber** (z. B. Konstruktionsleiter) kümmert sich im Wesentlichen um die Initiierung des KBE-Projekts, die Festlegung der Projektziele sowie die Festlegung der Ressourcenzuteilung (z. B. Mitarbeiter). Im weiteren Verlauf übernimmt die Rolle eine eher untergeordnete Funktion, da die Projektleitung in den Aufgabenbereich des Wissensingenieurs fällt. Der Auftraggeber ist noch in der Testphase an der Validierung der KBE-Anwendung und der Überprüfung der Zielerreichung beteiligt.

Der **Experte** (z. B. Entwicklungsingenieur) ist während allen Phasen aktiv. In der Planungsphase unterstützt er aktiv die Identifikation des relevanten Wissens. In der Entwicklungsphase hilft er zudem dem Wissensingenieur, Wissen zu erheben, zu analysieren, zu strukturieren und in der KBE-Anwendung zu implementieren. Außerdem wirkt er in der Testphase bei der Validierung der KBE-Anwendung mit, bevor er in der Betriebsphase beim Betrieb der KBE-Anwendung unterstützt.

Durch die Nutzung von KBE-Systemen ist der **Anwender** (z. B. CAD-Konstrukteur) insbesondere in der Betriebsphase tätig, um ein bestimmtes Konstruktions- oder Berechnungsziel zu erreichen. Er übernimmt in den vorhergehenden Phasen keine aktive Rolle, sollte jedoch in die Testphase ebenfalls mit eingebunden werden.

Der **Wissensingenieur** stellt die zentrale Rolle in einem KBE-Projekt dar, da er über den gesamten Lebenszyklus der KBE-Anwendung aktiv ist. Er nimmt dabei u. a. eine wichtige Vermittlerrolle ein, indem er eine Brücke zwischen den strategischen Zielen der Unternehmensführung bzw. Wissensmanagern und den operativ an den Geschäftsprozessen arbeitenden Anwendern schlägt [Luft et al. 2012]. Neben dem gesamten Planungs-, Entwicklungs- und Betriebsprozess eines wissensbasierten Systems ist eine weitere Aufgabe, das menschliche Expertenwissen durch geeignete Methoden zu sammeln und anschließend in einer KBE-Anwendung abzulegen. Das Motivieren der Mitarbeiter, die Vermittlung zwischen verschiedenen Interessengruppen und der Abbau von Wissensmanagementbarrieren verlangen vom Wissensingenieur neben dem breiten ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenwissen auch solide Kenntnisse in Informations- und Kommunikationswissenschaften und eine umfassende Allgemeinbildung [Luft et al. 2012]. KBE-Projekte werden in der Praxis häufig mit externer Unterstützung (z. B. Anbieter eines KBE-Systems) durchgeführt, weshalb die Rolle des Wissensingenieurs in diesem Fall zum Teil durch unternehmensexterne Mitarbeiter übernommen werden kann.

4.2 Konzeptionelle Beschreibung der Vorgehensschritte

In diesem Kapitel werden die vier Phasen der Planung, der Entwicklung, des Tests sowie des Betriebs einer KBE-Anwendung detaillierter beschrieben.

4.2.1 Planungsphase

In der Planungsphase wird das KBE-Projekt zunächst projiziert und vorbereitet. Beispielhaft sei die in der Richtlinie vorgestellte Vorgehensweise CommonKADS [Schreiber und Akkermans 2002] zu nennen, welche sich gut für wissensbasierte Systeme eignet.

Im ersten Schritt hat die Einbettung des KBE-Projekts in die Unternehmensorganisation sowie die Identifizierung des relevanten Wissens zu erfolgen. Hierzu sind Geschäftsprozesse und Wissensträger zu analysieren, eine Ist-/Soll-Analyse durchzuführen sowie involvierte Mitarbeiter und Ressourcen zu identifizieren. Ziel der Ist-Analyse ist das Erkennen von Problemen und das Identifizieren von Chancen. In der Soll-Analyse gilt es, die Aufgaben des KBE-Systems zu identifizieren [Rude 1998] sowie eine Kosten-Nutzen-Analyse und eine Machbarkeitsanalyse durchzuführen [Lovett et al. 2000].

Im Rahmen der Richtlinie wird ein konkretes Rahmenwerk angeboten, dass in den zuvor genannten Aufgaben unterstützt. Dieses sogenannte Organisationsmodell (OM1-OM5) gliedert sich in folgende 5 Schritte [Schreiber und Akkermans 2002]: Mittels einer *Problembeschreibung* (OM1) werden die verschiedenen Rollen bestimmt, bevor anschließend die Identifikation der Probleme innerhalb der Organisation erfolgt. Anschließend werden potentielle Lösungen ermittelt und die Entscheidung für die Entwicklung einer KBE-Anwendung durch das Management gefällt. Im zweiten Schritt wird der betroffene *Geschäftsprozess* (OM2) visuell beschrieben. Im Rahmen einer *detaillierten Prozessbeschreibung* (OM3) wird der Prozess bis auf einzelne Aufgaben (v. a. wissensintensive Aufgaben) detailliert. Dies ist wichtig, da das KBE-System meist nur ausgewählte Prozessbausteine des (Konstruktions-)Prozesses unterstützt. Im vierten Schritt erfolgt die *Beschreibung des Wissensbestands* (OM4), welches wichtig für das nachfolgende Analysieren des Wissensbestands ist. Dabei ist die Identifizierung von Wissensbeständen und deren Zuweisung zu einem Wissensträger (Mitarbeiter bzw. IT-System und Aufgabe) notwendig. Zudem ist es wichtig, die Wissensbasis oder Wissens Elemente auf Korrektheit zu überprüfen und das Wissen anzupassen, falls es nicht die benötigte Form aufweist oder am richtigen Ort, zur richtigen Zeit und zur richtigen Qualität vorliegt. Im letzten Schritt der *Erarbeitung einer Machbarkeitsanalyse* (OM5) erfolgt die Aufbereitung und Bereitstellung eines Entscheidungsdokuments für den Auftraggeber des KBE-Projekts. Basierend auf diesem Dokument entscheidet die Unternehmensleitung über die Entwicklung des KBE-Systems.

4.2.2 Entwicklungsphase

Nach der Bewilligung des KBE-Projekts, folgt in der Entwicklungsphase zunächst die **Wissenserhebung**, die in der Regel durch den Wissensingenieur erfolgt. Als Basis dienen vorher identifizierte Wissensquellen und -träger, wie beispielsweise Experten, Bücher oder andere Dokumente. Es ist zu beachten, dass eine Quelle nicht verfügbar oder unmotiviert sein kann sowie Kommunikationsprobleme zwischen dem Experten und dem Wissensingenieur auftreten können. Darüber hinaus kann Wissen zufällig, unbewusst, nicht verbalisierbar, veraltet, unvollständig oder für einen gegebenen Fall nicht anwendbar sein, worüber sich der Wissensingenieur im Klaren sein muss. Für die Wissenserhebung als Teil der in Kapitel 3 vorgestellten Wissensakquisition können beispielsweise *Interviewtechniken*, *Textanalysen*, *Beobachtungstechniken wie auch Reviewtechniken* zum Einsatz kommen.

Im Anschluss an die Wissenserhebung erfolgt die **Wissensanalyse und -strukturierung** durch den Wissensingenieur [Schreiber 2002]. Dieser Prozess beinhaltet Vorgaben zur Wissensinterpretation und dient der Erarbeitung von Strukturen und der Schaffung einer Basis für die Schlussfolgerungsmechanismen. Dabei können verschiedene Methoden innerhalb von Vorgehensweisen (z. B. MOKA [Stokes 2001], CommonKADS [Schreiber 2002]) angewandt werden. Nach Stokes lässt sich das zu verarbeitende Konstruktionswissen für die Analyse und Strukturierung in nachfolgende Kategorien einteilen [Stokes 2001]: *Illustrations* (Abbildungen, z. B. technische Zeichnungen) zum Verdeutlichen eines komplizierten Sachverhalts, *Constraints* (Zwangsbedingungen) zur Darstellung mathematischer Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen, *Activities* zur Beschreibung des Konfigurationsablauf/-prozess der KBE-Anwendung, *Rules* (Regeln und Bedingungen) zur Beschreibung von Soll- und Istzuständen sowie *Entities* zur prinzipiellen Beschreibung der Struktur eines Produkts (Baugruppen, Unterbaugruppen, Teile) oder einer Funktion.

Schließlich erfolgt die Realisierung der Aufgabenstellung in Form einer KBE-Anwendung, d. h. die **Wissensimplementierung**. Hierbei ist es zum einen notwendig, das formalisierte Wissen auf rechnerverarbeitbare Wissensträger (d. h. dem Wissensort [Roth et al. 2010]), z. B. eine digitale Wissensbasis, zu übertragen sowie die Anwendung zu entwickeln. Da bereits CAD-Konstruktionsvorlagen, Konstruktionstabellen oder andere Regelwerke vorliegen können, hängt die Wissensimplementierung eng

mit der zuvor genannten Wissenserhebung zusammen. Mittels materieller Träger (z. B. Datenbanken, Dokumente) kann Wissen digital gespeichert und für eine KBE-Anwendung verfügbar gemacht werden. Zu ihnen zählen u. a. *CAD-Geometrien* in Form von intelligenten Geometriefeatures, *Stücklisten und Teilverwaltung* (i. d. R. mit Hilfe eines PDM-Systems), *Spezialisierte Wissensbasen* in Form von Regel- und Constraint-Sammlungen sowie *Softwareprogramme* in Form von Auslegungsmakros bis hin zu Berechnungsalgorithmen, die zur Automatisierung von Konstruktionsaufgaben in CAD dienen.

4.2.3 Testphase

In dieser Phase wird über die **Freigabe** des KBE-Projekts zur Realisierung entschieden. Dabei dienen die Dokumentation bisheriger Schritte und die Vorstellung eines Prototyps im Management als Basis. Das Übersehen von Fehlern kann zum Versagen des mit der KBE-Anwendung konstruierten Produkts führen und Folgeschäden auslösen. Der Testaufwand hat Einfluss auf die Durchlaufzeit und Kosten eines KBE-Projekts und muss in angemessenem Verhältnis zum Risiko stehen. Er ist ebenso wie der Erstellungsaufwand von der verwendeten Basissoftware bzw. Programmiersprache abhängig.

Um Tests erfolgreich einzusetzen, ist eine entsprechende Testvorbereitung bei der Anforderungserstellung wichtig, indem zu Beginn des Projekts entsprechende Testfälle/-szenarien für alle zu unterstützenden Aufgaben (use cases) definiert werden. Schließlich existieren verschiedene Arten von Tests, die wiederum von unterschiedlichen Personen bzw. Rollen durchgeführt werden. Zu den *Modul- oder Unit-Tests* zählen das Testen der CAD-Modelle, der Wissensbasis, explizit und implizit gegebener Daten, des Codes und der Benutzeroberfläche. Mittels *Integrationstests* wird von verschiedenen Personen u. a. geprüft, ob das Expertenwissen richtig umgesetzt wurde, wohingegen das Debugging ein Zusammenwirken von Experten, einem Wissensingenieur und ggf. einem Anwender erfordert. Die Durchführung von *Abnahmetests* und (*automatisierten*) *Regressionstests* erfolgt durch den Anwender oder Systembetreuer, Tests in der *Pilotphase* werden größtenteils nur vom Anwender durchgeführt.

4.2.4 Betriebsphase

In der Betriebsphase steht die eigentliche Einführung von KBE-Anwendungen in die IT-Landschaft und Unternehmensorganisation an. Im darauffolgenden Betrieb des KBE-Systems ist es notwendig, dieses zu verwalten und zu pflegen, indem u. a. das Wissen aktualisiert wird und Umstrukturierungen in der IT-Landschaft zur effizienteren Nutzung des Systems vorgenommen werden.

Bei der **Einführung** ist die Festlegung klarer Regelstrukturen in Bezug auf Rollen und Verantwortlichkeiten von Bedeutung, um eine adäquate organisatorische Verankerung der KBE-Anwendung und damit die Akzeptanz der Anwender zu erzielen. Von einem etablierten Lenkungsausschuss, in dem die bereits genannten Rollen vertreten sind, sollen dazu die Hintergründe der Einführung erläutert und Transparenz geschaffen werden. Insbesondere ist dabei offenzulegen, warum es die KBE-Anwendung gibt, wer ihre Entwicklung initiiert hat und von wem die Vorgaben gemacht wurden.

Während der **Verwaltung, Pflege und Aktualisierung** des Wissens ist die Aktualität der dem System zugrunde liegenden Daten (z. B. Standardteile) sicherzustellen. Zudem ist die Definition von Regelungen und Verantwortlichkeiten wichtig, um sicherzustellen, dass die KBE-Ergebnisse (neu ausgelegte Teile und Baugruppenkonfigurationen) bei der nächsten Anwendung der Wissensbasis berücksichtigt werden. Außerdem ist ein systematisches Änderungsmanagement unabdingbar, da u. a. durch Fehlerbehebungen und Erweiterungen regelmäßig Änderungen an Objekten einer KBE-Anwendung (z. B. Strukturen, Geometrien) vorgenommen werden. Die Änderungen sind konsequent zu dokumentieren, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten und die Auswirkungen von Änderungen an beteiligten Systemen (z. B. Releasewechsel des CAD-Systems) auf die KBE-Anwendung zu prüfen.

4.3 Sicherheit und Wissensschutz

Im Rahmen von KBE stellt die CAD-Geometrie bzw. das CAD-Modell einen wichtigen materiellen Wissensträger dar, der für die Wissensakquisition und -implementierung eine große Rolle spielt. Wissen kann dabei mittels verschiedener Möglichkeiten in einem CAD-Modell hinterlegt werden. Um die

unautorisierte Wissensaneignung durch Dritte zu unterbinden, ist es bei konsequentem Einsatz von KBE unerlässlich, effektive Maßnahmen für den Wissensschutz zu ergreifen. Die IT-Sicherungskonzepte „*Digital Rights Management*“ (DRM) und „*Data Filtering*“ (DF) sind zwei Maßnahmen, die neben der grundlegenden Sicherung der IT-Infrastruktur (Zugriffsrechte, Firewalls) wichtig sind. Ziel von DRM ist die Verschlüsselung von Dokumenten auf Basis einer digitalen Rollen- und Rechteverwaltung, wodurch vollständige Datenbestände ausschließlich verschlüsselt ausgetauscht werden. Unter DF ist die definierte Entfernung von Teilumfängen aus einem CAD-Modell zu verstehen, indem z. B. bei reinen Visualisierungsaufgaben anstelle detaillierter parametrisch-assoziativer Modelle Formate ausgetauscht werden, die die Geometrie nur tesseliert darstellen. Beide Sicherungskonzepte erfordern bei der Erzielung des Wissensschutzes die Identifizierung wissenskritischer Elemente.

5 Implementierung - Technische Lösungen zum wissensbasierten Konstruieren

Die folgenden Teilkapitel verschaffen zunächst einen Überblick über bestehende CAx-Lösungen und schätzen Anforderungen, Aufwendungen und Anwender verschiedener KBE-Lösungstypen ein. Den Abschluss bildet ein Praxisbeispiel zur besseren Veranschaulichung der Thematik.

5.1 Prinzipielle Einordnung von Rechnerunterstützungen

Das wissensbasierte Konstruieren umfasst neben der Auslegung bzw. Ausarbeitung neuer Bauteile (Konstruktion) auch die passende Zusammenstellung (Konfiguration) vorhandener Komponenten. Verschiedene, bestehende CAx-Lösungen können demnach gemäß des Grades der wissensbasierten Unterstützung für die Konfiguration bzw. der Konstruktion klassifiziert (vgl. Abbildung 2) und somit den Aufgaben entsprechend ausgewählt werden.

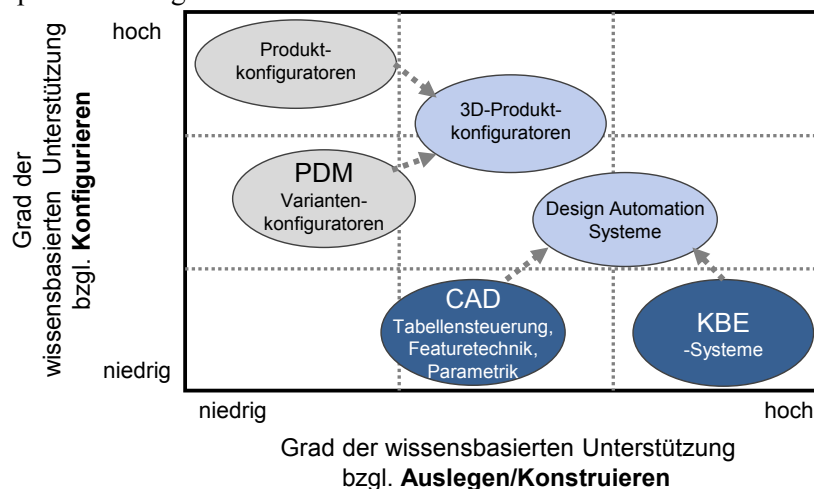


Abbildung 2 Einordnung von Softwaresystemen nach dem Grad der wissensbasierten Unterstützung [Lutz 2011]

Die **klassischen Produktkonfiguratoren** ermöglichen das regelbasierte Konfigurieren individualisierter Produkte und finden in der Konsum- (z. B. Pkw-Konfiguratoren) und Investitionsgüterindustrie (z. B. Konfiguratoren für Pumpen) Anwendung. **3D Produktkonfiguratoren** dienen dem positionsgerechten Zusammenbau konfigurierbarer Komponenten zu einer CAD-Baugruppe und zielen darauf ab, die Zeit für Auftragerstellung und -durchführung mittels (webbasierter) CAD-Unterstützung zu reduzieren. Durch u. a. wissensbasierte Parametrik (z. B. Formeln), erweiterte Features (z. B. Fertigungsinformationen) und Kopplungen zu Tabellenkalkulationsprogrammen bieten **CAD-Systeme** dem Konstrukteur zahlreiche Möglichkeiten. **KBE-Systeme** bestehen aus einer leistungsfähigen Problemlösungskomponente sowie einer Wissensbasis zum Verwalten von Regeln und Constraints. Sie basieren auf wissensbasierten Systemen, die um konstruktionsspezifische Funktionalitäten und Spezifika weiterentwickelt wurden und besitzen häufig eine enge Verbindung zu CAD-Systemen. **Design Automation Systeme** sind erweiterte, direkt in CAD integrierte Module zur wissensbasierten und automati-

sierten Erstellung von CAD-Modellen. Durch die Nutzung aller in CAD-Systemen verfügbaren Konstruktionsfunktionen lassen sich mittels dieser Module Konstruktionsaufgaben automatisieren.

5.2 Einschätzungen zu Anforderungen, Aufwendungen und Anwendern von verschiedenen KBE-Lösungstypen

Zur Verdeutlichung der grundsätzlichen Einordnung der Rechnerunterstützungen zur wissensbasierten Konstruktion werden in Abbildung 3 einige praktische Umsetzungsbeispiele dargestellt. Den für die wissensbasierte Konstruktion relevanten Lösungstypen entsprechend, gliedern sich die Beispiele in Lösungen auf Basis von **CAD-Systemen**, **KBE-Systemen und Modulen** und von **3D-Produktkonfigurationen und Design Automation**, welche wiederum in Unterkategorien unterteilt sind. Darüber hinaus zeigt die Abbildung die für die jeweilige Aufgabe benötigten Mitarbeiter, Fähigkeiten und Wissen, Aufwendungen sowie erforderliche Software und potentielle Nutzer.

		Benötigte Mitarbeiter	Benötigte Fähigkeiten und benötigtes Wissen	Benötigte Aufwendungen	Benötigte Lizenzen und Software	Potentielle Nutzer
CAD-Systemen und integrierten Programmfunktionen	Anwendung zur Ableitung von Getriebeentwurfskonstruktionen	ein Konstrukteur	Grundlegende Programmiererfahrung	Geringer Pflege- und Testaufwand	CAD-System, SQL-Datenbank	Studierende Schulungsteilnehmer
	Automatisierter Entwurf von Fensterheberkinematiken mittels intelligenter Features	Anwendungsentwickler, Komponentenspezialisten, Konstrukteure	Interne CAD-Programmiersprache	mittlerer Pflege-, Schulungs- und Testaufwand	CAD-System und KWA-Lizenz	Weltweite Konstrukteure
	Entwicklung einer KBE-Anwendung mittels CAD Programmierschnittstelle	Produktentwickler, Konstrukteure, Fertigungsplaner, Programmierer, Wissensingenieur	Gute Programmierkenntnisse, Interviewtechniken	Erhebung des Expertenwissens, mittlerer Pflegeaufwand	ERP-/PLM und CAD-System, UDFs und Programmierschnittstelle als Bordmittel	Konstrukteure und Vertriebsinnendienst (Konfiguration)
KBE-Modulen und -systemen	Auslegung eines Messerkopfs auf der Basis kundenspezifischer Skizzen	Konstrukteure, Vertriebsmitarbeiter, Programmierer, externe Berater	Gute Kenntnisse der Programmiersprache insbesondere des kommerziellen KBE-Moduls	mittlerer Pflege-, Schulungs- und Testaufwand	Kommerzielles KBE-Moduls eines CAD-Systems	Konstrukteure und Vertriebsmitarbeiter
	Schulungsbeispiel zum Erlernen von KBE-Grundfunktionen im CAD	Konstrukteure, Programmierer, ggf. externe Berater	Gute Programmierkenntnisse	mittlerer Pflege-, Schulungs- und Testaufwand	Modul mit Bordmitteln eines CAD-Systems, UDFs, Konstruktions-tabelle, Tabellenkalkulationssoftware	Konstrukteure
Produktkonfiguratoren und Design Automation	Wissensbasierte Konfiguration von Fahrstuhlssystemen	Konstrukteure, Programmierer, Produktmanager	Gute Programmierkenntnisse (z.B. für XML-Schnittstelle)	mittlerer Pflege-, Schulungs- und Testaufwand	ERP-/PLM-System, CAD-System mit integrierten, constraintbasierenden Konfigurator	Konstrukteure und Vertriebsmitarbeiter
	Web-Portal mit Konfigurator für Treppen, Plattformen und Überstiegen	Konstrukteure, Arbeitsplanung, Fertigung, Programmierer, Vertriebsmitarbeiter, Marketing	Gute Programmierkenntnisse, Regel- und Beziehungswissens, Wissen über Geschäftsabläufe	geringer Pflege-, Schulungs- und Testaufwand	CAD-/PDM-/CRM- u. ERP-System, Web-integriertes 3D-Viewing System kommerzielles Autoren-Werkzeug	Vertriebsmitarbeiter, Kunden, technischen Abteilungen

Abbildung 3 Anforderungen, Aufwendungen und Anwendern von KBE-Lösungstypen [VDI 5610 Blatt 2: 2016]

5.3 Beispielhaft implementierte Lösung auf Basis eines KBE-Systems

Im Folgenden soll eine Lösung auf Basis eines KBE-Systems beispielhaft implementiert werden (Abbildung 4). Dabei wird zunächst kurz auf die **Ausgangssituation** eingegangen sowie anschließend die verfolgten **Ziele**, die Art und Weise der **Projektdurchführung**, die **Daten-** und **Wissensablage** sowie die eingesetzten **Werkzeuge** erläutert. Abschließend erfolgt eine Einschätzung der **Aufwendungen**, des **Nutzens** und der spezifischen **Herausforderungen**.

Ausgehend von der Parametrierung eines CAD-Modells (beispielhafte Drosselklappe für Ottomotor) zeigt das gewählte Beispiel die mögliche Integration von u. a. Constraints (Formeln) und Regeln in

das CAD-Modell und die Entwicklung von KBE-Anwendungen in Form von Bauteiltemplates. Unter einem Template wird hierbei ein wissensbasiertes, „auftragsneutrales“ CAD-Startmodell verstanden, welches seine erforderliche Geometrie erst durch definierte Kundenanforderungen annimmt. Für das Beispiel ist die Vermittlung der Möglichkeiten, eine KBE-Anwendung mit dem entsprechenden Modul eines CAD-Systems zu entwickeln von größerer Bedeutung als die Kostenreduktion.

Es verfolgt zudem das **Ziel**, grundlegende Schritte autodidaktisch zu vermitteln, um den Umgang mit KBE-Grundfunktionen im CAD-System zu erlernen. Darüber hinaus wird insbesondere Wert auf die Änderungsfreundlichkeit und die Nutzung als KBE-Demonstrator mit transparentem Aufbau gelegt. Eine Amortisation im wirtschaftlichen Sinn wird hingegen vernachlässigt.

Für die Nutzung des Beispiels sind erste Erfahrungen im Umgang mit den Basisfunktionen (z. B. Erstellen und Verwalten von Bauteilen, Anlegen von Skizzen und deren Bemaßung) eines CAD-Systems essentiell. Ein auf diese Weise erstelltes Template kann innerhalb der Fachabteilung (z. B. Konstruktion) angewandt und gepflegt werden.

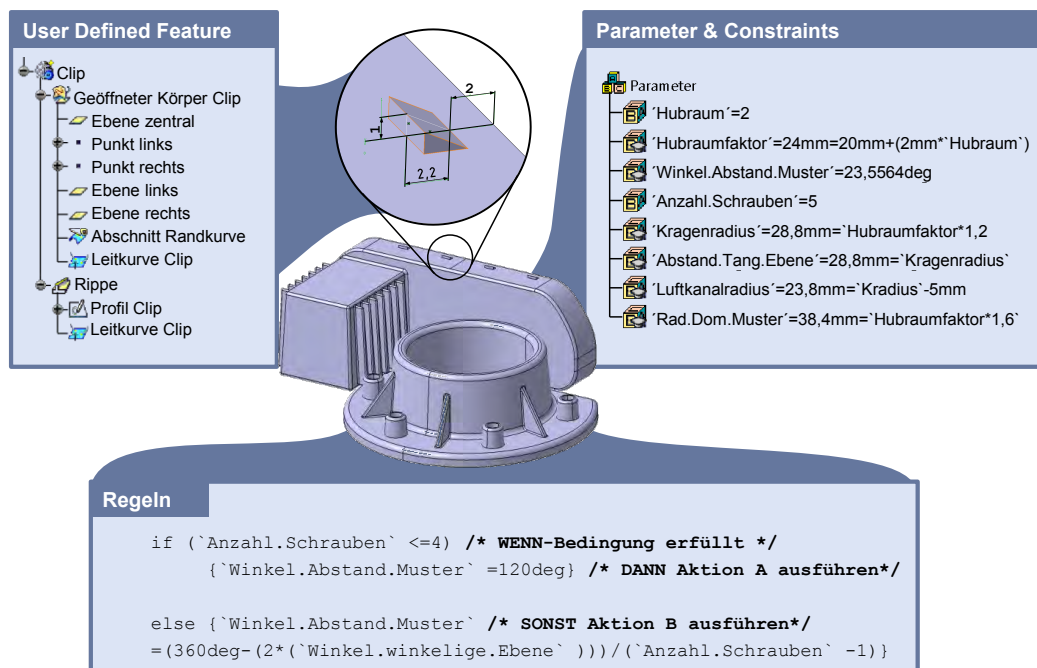


Abbildung 4 Wissensbasiertes CAD-Modell einer Drosselklappe [VDI 5610 Blatt 2: 2016]

Im Rahmen der **Durchführung des Beispiels** werden als erstes die Parameter, die das Verhalten des Templates steuern, festgelegt. Im Falle der Drosselklappe eines Ottomotors stellt der Hubraum des Motors die bestimmende Größe dar, welche z. B. den Luftdurchsatz festlegt. Es erfolgt die Definition des Parameters Hubraum als reeller Wert und die Umrechnung in eine geometrische Größe, den Hubraumfaktor. Darüber hinaus müssen weitere Geometrieparameter sowie ihre Abhängigkeiten untereinander definiert und mit den Modellparametern (Durchmesser, Winkel usw.) verknüpft werden. Damit kann das CAD-Modell über die hinterlegten Parameter gesteuert werden (vgl. Modellbaum in Abbildung 4). Als nächstes gilt es, logische Abhängigkeiten durch Regeln zu definieren. Im beschriebenen Beispiel soll durch die entsprechende Regel (vgl. Abbildung 4) im Fall von drei Befestigungsdomen, deren gleichmäßige Verteilung über den gesamten Flansch sichergestellt werden. Mehrere Domen verteilen sich gleichmäßig über das durch das Gehäuse beschränkte Flanschsegment. Es ist ebenfalls möglich, ein User Defined Feature (UDF) einzusetzen, welches als „partieller Modellbaum“ verstanden werden kann und an beliebigen Stellen eines übergeordneten Modellbaums eingesetzt wird. Die Verknüpfung des Features zum übergeordneten Bauteil erfolgt nur durch Referenzelemente („Zusammenbaubedingungen“), wobei es alle inneren Skizzen, Körper, Beziehungen, Parameter oder Formeln behält. Die Bezeichnung und die Schritte für die Erstellung bzw. den Einbau eines UDF variieren je nach CAD-System. Abschließend wird die Konstruktionstabelle (KT) integriert, welche innerhalb des CAD-Systems oder extern mit einer Tabellenkalkulationssoftware erstellt werden kann. Sie ermöglicht zudem die Erzeugung standardisierter Varianten innerhalb kurzer Zeit.

Die **Wissens- und Datenbasen** sind üblicherweise in das CAD-Modell integriert, wobei ausschließlich die extern erzeugte Konstruktionstabelle eine Ausnahme darstellen kann. Hierbei ist ebenso die Steuerung des Verhaltens durch externe Formeln und Regeln in der Tabellenkalkulationssoftware möglich. Das im CAD-Modell integrierte Wissen wird in Abbildung 4 zusammenfassend aufgezeigt. Zu den im Rahmen des Beispiels **eingesetzten Werkzeugen** zählt insbesondere das auf einem modernen, parametrischen Solid-Modellierer basierende CAD-System, welches dem Wissensingenieur die Eingabe für Constraints und Regeln ermöglicht und dadurch Wissen im CAD-Baum hinterlegt wird. Die Erfahrung des Bearbeiters mit dem CAD-System bestimmt den entstehenden **Bearbeitungsaufwand** (ca. 2-4 Stunden) zur Durchführung des beschriebenen Beispiels. Aufgrund der lediglich beispielhaft implementierten Lösung, lässt sich der **Nutzen** bezüglich der Einsparung von Zeit und Kosten allerdings nicht konkretisieren. Zudem entstehen für CAD-geschulte Anwender infolge des Übungscharakters keine besonderen **Herausforderungen**.

Danksagung

Allen Personen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung der vorgestellten Richtlinie VDI 5610 Blatt 2 mitgewirkt haben, sei herzlich gedankt. Die gekennzeichneten Bilder und Tabelle sind wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Literatur

- | | |
|------------------------------|---|
| Conrad 2008 | CONRAD, K.-J.: <i>Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau</i> . 4. neu bearb. Aufl. München: Hanser, 2008. |
| Lovett et al. 2000 | LOVETT, P. J.; INGRAM, A.; BANCROFT, C. N.: <i>Knowledge-based engineering for SMEs – a methodology</i> . In: Journal of Materials Processing Technology. 107-2000, S. 384–389. |
| Luft et al. 2012 | LUFT, T.; BREITSPRECHER, T.; ROTH, D.; LINDOW, K.; WARTZACK, S.; BINZ, H.: <i>Die Rolle des Wissensingenieurs im Unternehmen - Ergebnisse einer Umfrage und Darstellung in der VDI-Richtlinie "Wissensbasiertes Konstruieren"</i> . Erlangen: Beiträge zum 23. DfX-Symposium ,2012, S. 63-78. |
| Lutz 2011 | LUTZ, C.: <i>Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte. Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion</i> . München: Dr. Hut, Dissertation, 2011. |
| Roth et al.2010 | ROTH, D., BINZ, H., WATTY, R.: <i>Generic structure of knowledge within the product development process</i> . In MARJANOVIC, D., STORGA, M., PAVKOVIC, N., BOJCETIC, N. (Ed.) Proceedings of the 11th International Design Conference. Cavtat, 2010., S. 1681-1690. |
| Rude 1998 | RUDE, S.: <i>Wissensbasiertes Konstruieren</i> . Aachen: Shaker, 1998. |
| Schreiber und Akkermans 2002 | SCHREIBER, G.; AKKERMANS, H.: <i>Knowledge engineering and management: The Common-KADS methodology</i> . 3. Aufl., Cambridge: MIT Press, 2002. |
| Stokes 2001 | STOKES, M.: <i>Managing Engineering Knowledge – MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Applications</i> . London and Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publishing, 2001. |
| VDI5610 2009 | VDI5610 Blatt 1:2009-03: Wissensmanagement im Ingenieurwesen; Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Berlin: Beuth Verlag. |
| Wartzack 2001 | WARTZACK, S.: <i>Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte</i> . Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2001. |

Ein Potentialmodell für die Nutzung neuer Technologien in der Produktentwicklung

David Inkermann¹, Sebastian Kleemann¹, Thomas Vietor¹,

¹Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik, Braunschweig, Deutschland
d.inkermann; s.kleemann; t.vietor@tu-braunschweig.de

Abstract: Die Verfügbarkeit von Wissen ist ein zentraler Erfolgsfaktor für die Produktentwicklung. Abhängig von der Entwicklungssituation sind unterschiedliche Arten von Wissen erforderlich, um neue Lösungsansätze zu erarbeiten oder Entscheidungen abzusichern. Die Akquise des erforderlichen Wissens ist dabei zeitaufwändig, weshalb in der Produktentwicklung verschiedene Hilfsmittel wie z.B. Lösungssammlungen oder Konstruktionskataloge verbreitet sind. Diese Hilfsmittel orientieren sich in ihrer Zugrifflogik vorwiegend an Produkteigenschaften oder Funktionen und unterstützen die für eine zielgerichtete Technologieauswahl erforderliche Orientierung z.B. hinsichtlich der Einflüsse auf verschiedene Lebenslaufphasen nicht ausreichend. Zur durchgängigen Unterstützung der Entwicklung wird in diesem Beitrag ein Potentialmodell vorgestellt, welches das zur Technologiebewertung und -auswahl erforderliche strategische Wissen sowie prozedurale und deklarative Wissen für die Realisierung von Lösungen verknüpft. Hierzu wird eine Wissensstrukturierung und -aufbereitung anhand von drei Ebenen vorgestellt. Struktur und Inhalte des Potentialmodells werden am Beispiel hybrider Bauweisen verdeutlicht.

Keywords:

Konstruktionswissen, Wissensbereitstellung, Technologiebewertung, Gestaltungsrichtlinien, Hybride Bauweisen

1 Einleitung

Der Zugang zu Wissen ist neben der Kreativität des Entwicklungsteams ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Produktentwicklung. Wissen ist erforderlich, um die Entwicklungsarbeit zu steuern, neue Lösungsansätze zu erarbeiten sowie Entscheidungen abzusichern. Die hierfür erforderlichen Informationen können aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen werden. Um die verschiedenen Informationen während der Produktentwicklung nutzen zu können, müssen diese rechtzeitig, zuverlässig, verständlich und an die spezifischen Randbedingungen der jeweiligen Entwicklungsaufgabe angepasst, aufbereitet und bereitgestellt werden (Nowack 1997). Vielfach wird darauf hingewiesen, dass sich in laufenden Entwicklungsprojekten eine Diskrepanz zwischen dem für eine fundierte Entscheidungsfindung erforderlichen Wissen und den tatsächlich vorliegenden Informationen ergibt, siehe Bild 1 und z.B. (Roth 2000; Vajna 2001). Dies hat zur Folge, dass auch bei kritischen Entscheidungen oftmals auf Erfahrungen einzelner Produktentwickler zurückgegriffen werden muss. Diese spezifischen Erfahrungen stellen ebenfalls Wissen dar, sind jedoch nicht explizit verfügbar und in der Regel durch subjektive Einschätzungen geprägt. Zudem ist dieses Erfahrungswissen für neue Technologien wie z.B. hybride Bauweisen (Kleemann et al. 2017) im Entwicklungsteam in der Regel nicht verfügbar. Dies führt dazu, dass neue (Fertigungs-)Technologien in Produktentwicklungsprozessen häufig nicht ausreichend berücksichtigt werden, da wesentliche Technologiepotentiale nicht bekannt sind. Zwar existieren verschiedene Hilfsmittel für die Wissensbereitstellung in der Produktentwicklung, diese fokussieren jedoch oftmals detaillierte konstruktive Lösungsansätze wie z.B. Konstruktionskataloge (Roth 2001), beruhen auf der Verallgemeinerung bestehender Lösungen und stellen grundlegende Lösungsprinzipien bereit (z.B. (Inkermann 2017; Keller und Binz 2011)) oder beschränken sich z.B. auf die Materialauswahl (Ashby 2011). Für die Strukturierung des Wissens werden hierbei in der Regel Eigenschaften wie geometrische oder funktionale Eigenschaften zugrunde gelegt, wodurch sich eine direkte Verknüpfung mit spezifischen

Aktivitäten und damit Phasen des Entwicklungsprozesses ergibt. Diese spezifische Zugriffslogik der Hilfsmittel steht dem Zugriff durch unterschiedliche Auswahlkriterien und Detaillierungen entgegen. Die detaillierte Gliederung des Wissens anhand von Eigenschaften steht zudem der, insbesondere bei neuen Technologien erforderlichen, Orientierung der Produktentwickler entgegen, da keine spezifischen Technologiepotentiale aufgezeigt werden. Diese Orientierung wird vereinzelt durch separate Modelle und Hilfsmittel unterstützt. Bestehende Hilfsmittel zur Wissensbereitstellung unterstützen daher die für eine durchgängige Unterstützung des Entwicklungsteams erforderliche Verknüpfung von strategischem, problem-orientiertem und prozeduralem Wissen nicht ausreichend.

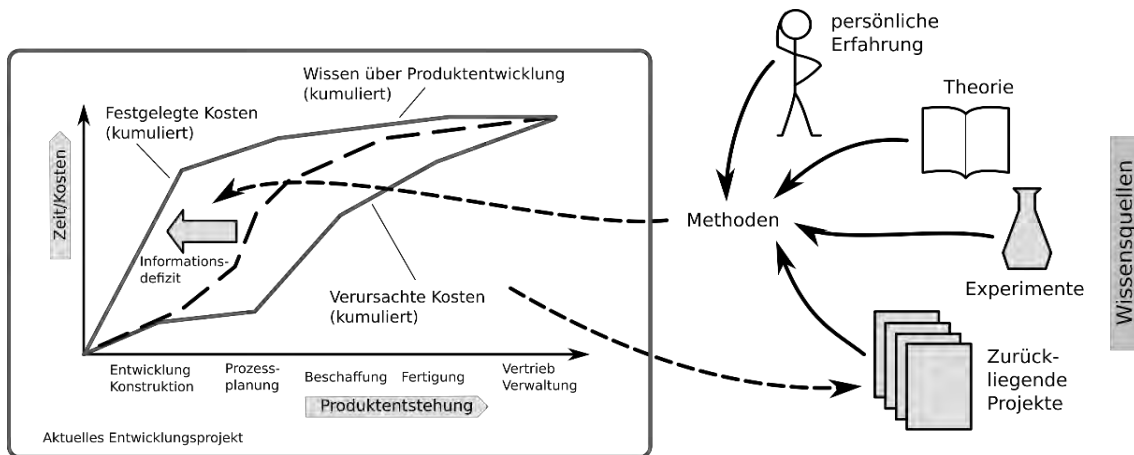


Bild 1: Quellen, Arten und Zugriff auf Wissen während der Produktentwicklung, basierend auf (Vajna 2001) und (Nowack 1997)

Zur Verknüpfung der unterschiedlichen Wissensarten und durchgängigen Unterstützung des Entwicklungsteams wird in diesem Beitrag ein Potentialmodell vorgeschlagen, welches den Zugriff auf unterschiedliche Wissensarten unterstützen soll. Das Potentialmodell dient einerseits als Orientierung für Auswahl neuer (Fertigungs-)Technologien während der Produktplanung und -konzeption (strategisches Wissen). Andererseits ermöglicht es den Zugriff auf spezifisches Wissen für die Realisierung der spezifischen Potentiale einzelner Technologien.

Als Grundlage für die Erarbeitung des Potentialmodells werden zunächst die Ziele der Wissensbereitstellung während der Produktentwicklung herausgestellt, die verschiedenen Arten von Wissen sowie etablierte Hilfsmittel zur Wissensstrukturierung und -bereitstellung beschrieben. Aufbauend hierauf wird der Aufbau des vorgeschlagenen Potentialmodells sowie die Verwendung im Produktentwicklungsprozess vorgestellt. Am Beispiel hybrider Bauweisen wird die Verknüpfung der unterschiedlichen Wissensarten durch das Modell detailliert beschrieben. Abschließend werden Vorteile und praktische Nutzung des vorgeschlagenen Potentialmodells diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Seit den Anfängen der Konstruktionsmethodik zielen zahlreiche Forschungsarbeiten auf die Strukturierung und Bereitstellung von Wissen zur Unterstützung der Lösungssuche und Entscheidungsfindung ab. Reuleaux erstellt 1875 erstmals eine Systematik zur Ordnung wiederkehrender Funktionselemente in mechanischen Systemen. Das heutige Forschungsgebiet der wissensbasierten Konstruktionsarbeit reicht vom rechnerunterstützten Knowledge Based Engineering über die Formulierung grundsätzlicher Lösungsprinzipien (Inkermann 2017) und Gestaltungsrichtlinien (z.B. Kleemann et al. 2016) bis hin zur strategischen Technologieplanung (Schuh und Klappert 2011). Dabei existiert kein konsistentes Verständnis des Begriffes Wissen selbst. Aus Sicht der Produktentwicklung ist jedoch eine Unterscheidung zwischen Produkt- und Prozesswissen zweckmäßig (Weber und Stark 1991). Prozesswissen dient zur Steuerung des Entwicklungsprozesses, während Produktwissen Wissen über das zu entwickelnde System repräsentiert. Fokus des vorliegenden Beitrages ist die Strukturierung

und Bereitstellung von Produktwissen. Dieses Produktwissen zielt vorwiegend auf folgende Aspekte ab (z.B. Roth 2001):

- Minimierung des Entwicklungsrisikos durch Nutzung bewährter und getesteter Lösungen oder Teillösungen
- Entlastung des Entwicklers von Routinetätigkeiten wie dem Zusammentragen spezifischer Informationen z.B. bezüglich eines Lösungselementes
- Rationalisierung des Entwicklungsprozesses durch Objektivierung von Informationen und Entscheidungen
- Aufzeigen wenig bekannter Lösungen

Fokus dieses Beitrages ist einerseits die zielgerichtete Wissensstrukturierung und -bereitstellung, um bisher wenig bekannte Technologien und deren spezifische Potentiale aufzuzeigen. Andererseits soll die Verknüpfung verschiedener Wissensarten zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses aufgezeigt werden. In den folgenden Abschnitten werden zunächst verschiedene Wissensarten definiert. Ausgehend hiervon werden der grundsätzliche Aufbau von Hilfsmitteln zur Wissensbereitstellung beschrieben und etablierte Hilfsmittel und Ansätze zur Wissensstrukturierung vorgestellt. Des Weiteren werden Grundlagen des Technologiemanagements und der Technologiebewertung beschrieben. Basierend auf diesen Grundlagen werden der Forschungsbedarf und wesentlichen Anforderungen an einen Lösungsansatz abgeleitet.

2.1 Wissensarten und Verwendung in der Produktentwicklung

Konstruktionswissen kann im Hinblick auf verschiedene Perspektiven und Zwecke klassifiziert und gegliedert werden. Fawcett definiert drei Arten von Wissen, die er durch einen Analyseprozess miteinander verknüpft, siehe Bild 2. Wissen ist zum einen unmittelbar mit der Produktlösung verknüpft, zum anderen können Gesetze oder Richtlinien wie z.B. Berechnungsvorschriften für einzelne Eigenschaften definiert werden. Aus diesen Gesetzen wiederum können verallgemeinerte Beschreibungen mit Informationen über Lösungsansätze abgeleitet werden (Fawcett 1986).

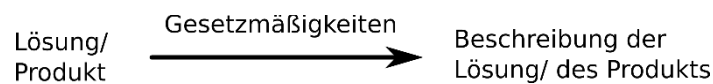


Bild 2: Unterschiedliche Arten von Wissen und deren Verknüpfung, nach (Fawcett 1986)

Ausgehend von gegebenen Anforderungen muss der skizzierte Prozess während der Entwicklungsarbeit in umgekehrter Richtung durchlaufen werden, um das bereitgestellte Konstruktionswissen anwenden zu können. Hierbei ergibt sich die Herausforderung, dass keine eindeutige Zuordnung zwischen Beschreibung und Produktgestaltung möglich ist (n:m Zuordnung, vgl. (Fawcett 1986; Roth 2000)). Daher müssen die erklärenden Beschreibungen (deklaratives Wissen) durch taktisch prozedurale Regeln ergänzt werden. Zusätzlich werden strategisch orientierte Regeln und koordinierende erklärende Regeln benötigt, um den Entwicklungsprozess zu steuern, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Wissensarten und deren Zweck im Entwicklungsprozess, nach (Nowack 1997)

Wissensart	Anwendung/ Merkmale	Beispiel
Strategisch	Wenig bereichsspezifisch	Planung
Problem-orientiert	Identifizieren relevanter Problemauslegungen	Erinnerung an vergleichbare Problemstellungen
Prozessuales	Handlungs-fokussiert, anwendungsspezifisch	Entwicklungsmethoden
Deklarativ	Erfordert Interpretation für Anwendung	Fakten, Produktgestalt

Nowack hebt hervor, dass der Zugriff auf deklaratives und prozedurales Wissen in der Regel durch problem-orientiertes Wissen erfolgt (Nowack 1997). Daher dient problem-orientiertes Wissen sehr häufig als Zugriffsebene z.B. durch Verknüpfung mit vergleichbaren Problemstellungen aus der

Vergangenheit. Hinweise zur Problemlösung werden durch das prozedurale oder deklarative Wissen, d.h. durch Anwendung spezifischer Entwicklungsmethoden und/oder konkreter Lösungsansätze, z.B. in Form von Gestaltungsrichtlinien bereitgestellt. Aus der Unterscheidung der Wissensarten wird deutlich, dass eine umfassende Unterstützung des Entwicklers sämtliche Ebenen umfassen sollte. Durch die Verknüpfung der unterschiedlichen Wissensarten kann sowohl die Technologieanwendung während der Produktplanung und -konzeption als auch die Umsetzung von Lösungsansätzen z.B. bei der detaillierten Produktgestaltung unterstützt werden.

Ausgehend von der eingeführten Unterscheidung verschiedener Wissensarten wird im nachfolgenden Abschnitt der grundsätzliche Aufbau von Hilfsmitteln zur Wissensbereitstellung beschrieben.

2.2 Aufbau von Hilfsmitteln zur Wissensbereitstellung

In der Produktentwicklung wird Produktwissen als deklaratives Wissen in Form von Lösungssammlungen, Konstruktionskatalogen, Patentsammlungen oder Sammlungen von Lösungselementen und -bausteinen (z.B. Normteile oder CAD-Features) bereitgestellt. Unabhängig von der Art können Hilfsmittel zur Wissensbereitstellung in eine Zugriffslogik und einen Informationsspeicher gegliedert werden, siehe Bild 3.

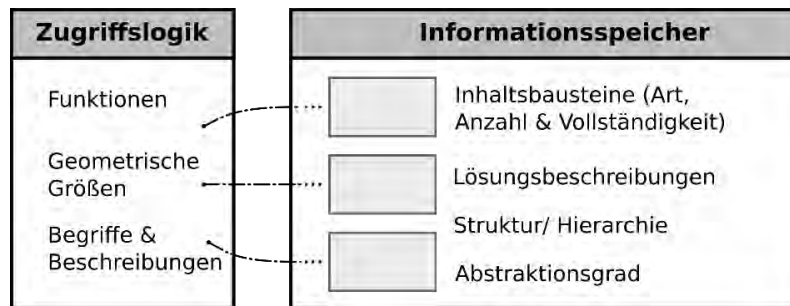


Bild 3: Aufbau von Hilfsmittel für die Wissensbereitstellung, in Anlehnung an (Inkermann 2017)

Durch die Zugriffslogik wird der Zugriff auf das Wissen, z.B. über Funktionen (Roth 2001; Koller und Kastrupp 1998), geometrische Merkmale (z.B. Lagerkataloge), Eigenschaften oder Eigenschaftsänderungen (Inkermann 2017) gesteuert. Der Informationsspeicher beinhaltet eine begrenzte Anzahl von Lösungen sowie deren Beschreibung z.B. in Form von Zeichnungen, Texten, Gleichungen oder geometrischen Größen. Die Anzahl der Lösungen wird dabei durch die Zugriffslogik und den damit einhergehenden Abstraktionsgrad sowie die gewählte Ordnung und Struktur bestimmt. Die Definition des Abstraktionsgrades ist direkt mit der Anwendbarkeit des Wissens verbunden. Durch einen hohen Abstraktionsgrad wird zwar die Anzahl der Lösungselemente oder Lösungsprinzipien im Informationsspeicher reduziert und damit deren Pflege sowie Erlernbarkeit erleichtert, gleichzeitig wird die Anwendbarkeit erschwert, da konkrete Lösungsansätze und Hinweise fehlen (van Wie 2002). Aus diesem Grund erfolgt teilweise eine Gliederung der Wissensspeicher in Übersichts- und Detailspeicher (vgl. z.B. Übersichtskataloge und Detailkataloge (Roth 2001) oder Basis- und Erweiterungsprinzipien (Inkermann et al. 2013)). Die Verknüpfung der unterschiedlichen Abstraktionsebenen erfolgt hierbei entweder durch eindeutige Zuordnung von z.B. Erweiterungs- zu Basisprinzipien oder durch die Lösungselemente selbst.

Die Anwendung des spezifischen, deklarativen Wissens erfolgt in der Regel im Rahmen von übergeordneten Methoden (prozedurales Wissen). Die Methoden wie z.B. Design for X legen den Fokus z.B. auf spezifische Produkteigenschaften und schaffen damit eine erste Problemorientierung (problemorientiertes Wissen). Strategisches Wissen wird durch die in der Produktentwicklung etablierten Hilfsmittel zu Wissensbereitstellung in der Regel kaum adressiert.

2.3 Technologiemanagement und -bewertung

Etablierte Aufgaben des Technologiemanagements sind die Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung und Anwendung neuer Technologien. Hierbei steht oftmals die Realisierung von

Wettbewerbsvorteilen im Vordergrund, die neben ökonomischen Vorteilen z.B. durch Technologieführerschaft oder Technologiedemonstration (Spath et al. 2011) begründet werden können. Zentrale Aufgaben des Technologiemanagements sind die Beschaffung von technologischem Know-how sowie die Identifizierung relevanter neuer Technologien für das eigene Geschäftsfeld. Hierzu zählt insbesondere die Bewertung der Chancen und Risiken der Anwendung von Technologien für das eigene Unternehmen (Schuh und Klappert 2011). Dies hebt die strategische Ausrichtung des erforderlichen Wissens hervor. Hilfsmittel für die Technologieplanung haben daher orientierenden Charakter und zeigen ausschließlich grobquantitativ mögliche Chancen und Herausforderungen auf. Dies gilt insbesondere für neue Technologien z.B. im Rahmen von Industrie 4.0-Anwendungen. Beispielsweise zeigt der von McKinsey entwickelte „Digital Compass“ acht wesentliche Werttreiber wie Service/After-sales oder Qualität auf und ordnet diesen verschiedene Industrie 4.0-Technologien wie prädiktive Instandhaltung zu (McKinsey&Company 2015). Mithilfe des Digital Compass können Unternehmen potentielle Felder für die Anwendung von Industrie 4.0-Lösungen identifizieren. Ein vergleichbares Hilfsmittel für die Technologie wird im Projekt futureTEX entwickelt. Das futureTEX-Radarsystem soll Unternehmen dabei unterstützen, neue Technologien und Anwendungsfelder für technische Textilien zu identifizieren. Das System dient vorrangig zur Identifizierung zukünftiger Trends, Technologien, Wettbewerbern und Anwendungsfeldern. Informationsgrundlage sind hierbei Patent- und Fachdatenbanken, Informationen aus dem Internet und unternehmensinternen Quellen. Auch bei diesem Hilfsmittel steht die Wissensaufbereitung und -bereitstellung zum Zweck der Orientierung im Vordergrund.

Hilfsmittel der Technologiekennung und -bewertung fokussieren damit vorrangig die Bereitstellung von strategischem Wissen. Konkrete Hinweise für die Implementierung spezifischer Technologien werden in der Regel nicht gegeben.

2.4 Forschungsbedarf und Anforderungen an einen Lösungsansatz

In den vorherigen Abschnitten wurden vier unterschiedliche Arten von Wissen eingeführt, der Aufbau von Hilfsmitteln zur Wissensbereitstellung in der Produktentwicklung beschrieben und exemplarische Hilfsmittel für die Technologieerkennung und -bewertung vorgestellt. Während die in der Produktentwicklung etablierten Hilfsmittel vorwiegend die Ebenen des problem-orientierten, prozeduralen und deklarativen Wissens adressieren, fokussieren die vorgestellten Hilfsmittel des Technologiemanagements die Ebene des strategischen Wissens. Die Analyse der Hilfsmittel zeigt auf, dass bisher keine ausreichende Verknüpfung der Ebenen durch ein integriertes Hilfsmittel zur Wissensbereitstellung besteht. Einerseits erfolgt die Planung und Bewertung von Technologien oftmals ohne Bezug zu konkreten Umsetzungs- und Implementierungsstrategien, andererseits wird für die zielgerichtete Anwendung neuer Technologien in der Produktentwicklung nicht die erforderliche Orientierung geboten. Vielmehr erfolgt die Anwendung ausgehend von konkreten Problemstellungen, ohne Einflüsse auf weitere Unternehmensbereiche oder Lebenszyklusphasen detailliert zu betrachten.

Für die Entwicklung eines Lösungsansatzes müssen daher alle vier Wissens Ebenen berücksichtigt werden und diese durchgängig miteinander verknüpft werden. Der Zugriff auf das hinterlegte Wissen sollte dabei situationsabhängig sowohl strategisch, als auch problem-orientiert erfolgen können.

Ausgehend von den beschriebenen Grundlagen und dem abgeleiteten Forschungsbedarf wird im nachfolgenden Abschnitt ein Potentialmodell für die Anwendung neuer Technologien in der Produktentwicklung vorgeschlagen.

3 Konzept für ein Potentialmodell

Zur durchgängigen Wissensbereitstellung und Unterstützung der Entscheidungsfindung während des Produktentwicklungsprozesses wird in diesem Abschnitt ein Potentialmodell vorgeschlagen. Das semi-formale Modell unterstützt die Gliederung und Aufbereitung von Wissen auf strategischer, problem-orientierter, prozeduraler und deklarativer Ebene. Hierzu werden innerhalb des Potentialmodells drei Ebenen mit spezifischer Wissensaufbereitung unterschieden. Struktur und Inhalt des Modells werden im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben. Ergänzend wird in Abschnitt 3.2 die Anwendung des Potentialmodells während der Produktentwicklung vorgestellt.

3.1 Struktur und Inhalt

In Bild 4 ist die Struktur des Potentialmodells dargestellt. Auf der ersten Ebene des Modells werden die verschiedenen Potentiale einer Technologie angegeben. Diese Potentiale zeigen allgemeine Verbesserungsmöglichkeiten auf, die durch eine spezifische Technologie erzielt werden können, ohne eine Gewichtung oder Quantifizierung vorzunehmen. Die einzelnen Potentialfelder sind einerseits mit Produkteigenschaften und der Produktgestaltung verknüpft wie z.B. Produktfunktionen oder Gestaltungsfreiheit. Andererseits sind die Felder mit dem Entwicklungsprozess, der Produktion oder weiteren Lebenslaufphasen verknüpft. Die einzelnen Potentialfelder stellen Aggregationen allgemeiner Prozess und Produkteigenschaften dar, wie z.B. von (Pahl et al. 2007) oder (Hubka 1984) vorgeschlagen. Durch die Felder werden unterschiedliche Handlungsfelder aufgezeigt, die bei der Anwendung einer Technologie berücksichtigt werden sollten. Damit adressiert diese Ebene vorwiegend das strategische Wissen, ohne konkrete Maßnahmen zur Realisierung der einzelnen Potentiale aufzuzeigen. Vielmehr dienen die Potentialfelder zur Orientierung bei der Technologiewahl und als Grundlage für die Diskussion und Bewertung der aufgezeigten Potentiale durch das Entwicklungsteam z.B. unter Berücksichtigung bestehender Schwachstellen von Produkten oder Prozessen.

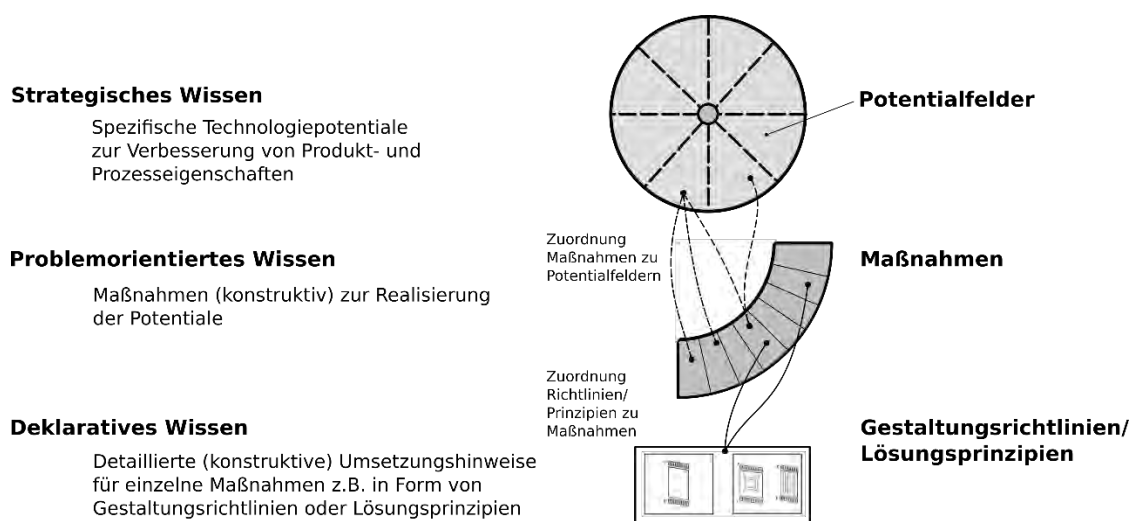


Bild 4: Wissensniveaus und deren Verknüpfungen innerhalb des Potentialmodells

Die zweite Ebene des Potentialmodells adressiert das problemorientierte Wissen, indem eine begrenzte Anzahl von Maßnahmen zur Realisierung der Potentiale aufgeführt wird. Jedem Potential wird mindestens eine Maßnahme zugeordnet, die aus bestehenden Technologieanwendungen abgeleitet wird (siehe Abschnitt 4). Wie auch die Potentiale können sich die Maßnahmen auf einzelne Produkteigenschaften, z.B. „lokale Erhöhung der Steifigkeit“, beziehen oder Prozesseigenschaften betreffen. Beispielsweise kann der Produktionsaufwand durch Reduzierung der Produktionsschritte gesenkt werden. Wie in (Kleemann et al. 2017) und Bild 4 gezeigt, ist es in einzelnen Fällen nicht möglich Maßnahmen eindeutig einzelnen Potentialfeldern zuzuordnen, siehe auch Abschnitt 5. Die einzelnen Maßnahmen dienen als Hinweise zur Realisierung der Potentiale, ohne detaillierte Informationen für die Umsetzung konstruktiver Lösungen zu geben. Damit stellen sie problemorientiertes Wissen bereit und dienen gleichzeitig als Verknüpfung zwischen strategischem und prozeduralem bzw. deklarativem Wissen.

Die untere Ebene des Potentialmodells umfasst vorwiegend deklaratives Wissen für die konstruktive Umsetzung der auf Ebene 2 definierten Maßnahmen. Hierzu werden konkrete Handlungsanweisungen z.B. in Form von Gestaltungsrichtlinien oder Lösungsprinzipien bereitgestellt. Die Gliederung dieser Wissensniveaus orientiert sich an den in den einzelnen Maßnahmen genannten Produkteigenschaften. Die Informationen und Aufbereitung des Wissens sind dabei anwendungsspezifisch und umfassen z.B. Gestaltungsvorschläge mit Geometrie und Material oder Wirkprinzipien mit Definition von Wirkelementen und deren Anordnung. Wie auch bei der Zuordnung von Maßnahmen zu Potentialen, ist in einzelnen Fällen keine eindeutige Zuordnung der Gestaltungsrichtlinien oder Lösungsprinzipien zu

den Maßnahmen möglich. Dennoch unterstützen die definierten Maßnahmen die Auswahl von Richtlinien und Lösungsprinzipien durch eine erste Eingrenzung. Die Anwendung des Potentialmodells in der Produktentwicklung zeigt der nachfolgende Abschnitt auf.

3.2 Anwendung in der Produktentwicklung

Die in Bild 5 gezeigte visuelle Aufbereitung des Potentialmodells unterstützt während des Produktentwicklungsprozesses einerseits die (qualitative) Beurteilung der Eignung einzelner Technologien und ermöglicht andererseits eine zielgerichtete Auswahl konstruktiver Maßnahmen und den Zugriff auf operativ anwendbares (deklaratives und prozedurales) Wissen. Ausgangspunkte für die Anwendung des vorgeschlagenen Potentialmodells können dabei einerseits bestehende Produkte sein, bei denen Schwachstellen (Produkt oder Prozess) identifiziert wurden. Andererseits kann die Produktplanung und -konzeption unterstützt werden. Im Fall der Produktplanung und -konzeption erfolgt der Zugriff über die Potentialfelder, indem spezifische Technologienpotentiale hinsichtlich einzelner Produkteigenschaften wie z.B. Integration zusätzlicher Funktionen oder Reduzierung der Bauteilmasse ermittelt werden, siehe Bild 5. Ausgehend von diesen Potentialen können schrittweise Maßnahmen und Gestaltungsrichtlinien oder Lösungsprinzipien identifiziert werden. Werden bei einer Produktentwicklung spezifische Schwachstellen oder Zielkonflikte identifiziert, können mithilfe der Maßnahmen innerhalb des Potentialmodells Hinweise für konstruktive Änderungen ermittelt werden. Zeitgleich können mithilfe der allgemeinen Potentiale weitere Verbesserungsmöglichkeiten z.B. hinsichtlich Prozessvereinfachungen identifiziert werden.

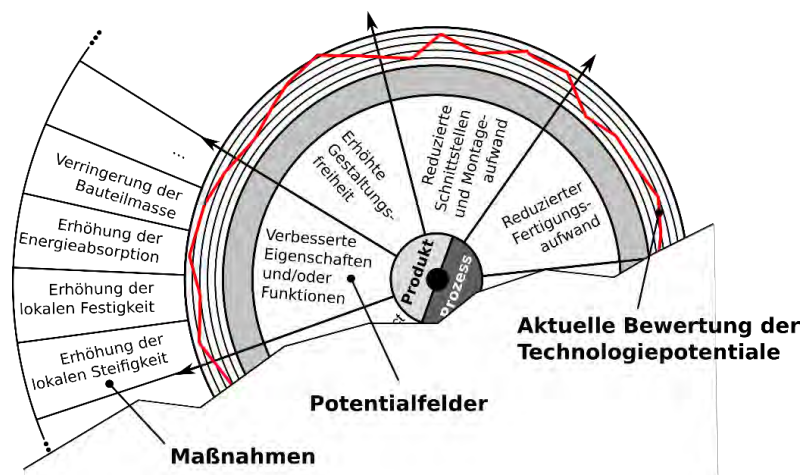


Bild 5: Visuelle Aufbereitung des Potentialmodells (erste und zweite Wissens Ebene) und Anwendungsmöglichkeiten während der Produktentwicklung

Die beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten des Potentialmodells zeigen die unterschiedlichen Unterstützungsmöglichkeiten während der Produktentwicklung auf. Darüber hinaus ermöglicht die vorgeschlagene Struktur des Modells eine kontinuierliche Ergänzung und Anpassung der Wissens Elemente auf den unterschiedlichen Ebenen.

Die beschriebene Struktur und die Inhalte des Potentialmodells werden im nachfolgenden Abschnitt am Beispiel eines Potentialmodells für hybride Bauweisen verdeutlicht.

4 Potentialmodell für die Anwendung hybrider Bauweisen

Dieser Abschnitt verdeutlicht die Struktur des vorgeschlagenen Potentialmodells am Beispiel hybrider Bauweisen. In Anlehnung an das Modell von Nestler sind hybride Bauweisen Mischbauweisen, in denen Materialien unterschiedlicher Werkstoffhauptgruppen kombiniert werden, wie z.B. Stahl mit Faser-Kunststoff-Verbunden und Kunststoff (Nestler 2014). Die Kombination dieser Materialien ermöglicht den anforderungsgerechten Materialeinsatz mit größtmöglichem Nutzen an verschiedenen Bauteilstellen. Der selektive Einsatz von Stahl, Faser-Kunststoff-Verbunden und Kunststoff in hybriden

Bauweisen unterstützt kostengünstige und gleichzeitig leichte Konstruktionen. Eine wesentliche Herausforderung der Anwendung hybrider Bauweise besteht in mangelndem Wissen der Produktentwickler. Um erfolgreich Produkte in hybrider Bauweise zu realisieren, ist umfangreiches Wissen, wie z.B. über das mechanische Verhalten der verwendeten Werkstoffe, deren Versagenscharakteristik oder der verfügbaren Fertigungs- und Fügetechniken erforderlich. Die Bereitstellung dieses Wissens kann durch das vorgeschlagene Potentialmodell unterstützt werden. Das hierzu entwickelte Potentialmodell und die hierin enthaltenen Potentialfelder, Maßnahmen und Gestaltungsrichtlinien sind in Bild 6 ausschnittsweise dargestellt.

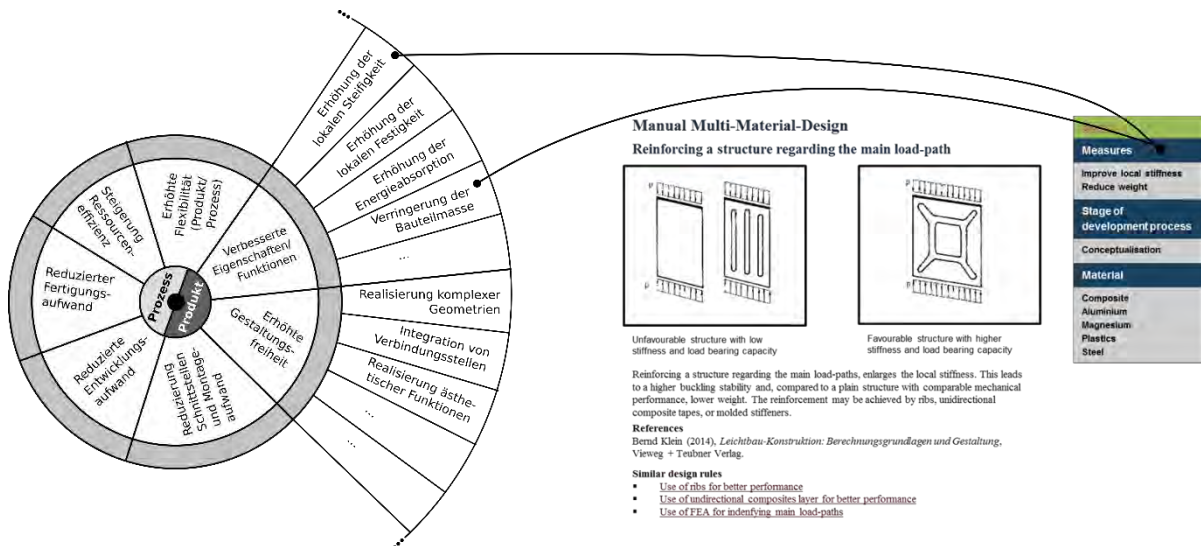


Bild 6: Ausschnitt des Potentialmodells für hybride Bauweisen

Das im Potentialmodell hinterlegte Wissen wurde aus umfangreichen Literatur- und Patentrecherchen sowie Bauteilanalysen abgeleitet. Die spezifischen Potentiale hybrider Bauweise wurden bestehende Bauteile in hybrider Bauweise hinsichtlich ihrer Vorteile analysiert. Hierzu wurden Bauteile untersucht, die von Fahrzeugherstellern (OEM), Zulieferern oder Forschungseinrichtungen realisiert wurden. Für diese Bauteile wurden die angegebenen Vorteile und Zielsetzungen der Forschungsarbeiten ermittelt, wie z.B. „das Bauteil wurde 15% steifer bei gleichen Kosten“. Die aus dieser Analyse abgeleiteten Potentiale hybrider Bauweisen wurden zu sieben übergeordneten Potentialfeldern geclustert und Prozess oder Produkt zugeordnet, siehe Bild 6. Weiterhin wurden aus der Analyse der Bauteile konkrete (konstruktive) Maßnahmen abgeleitet, die zur Realisierung der Potentiale beitragen. Diese Maßnahmen sind als äußerer Ring im Potentialmodell dargestellt, siehe z.B. „Erhöhung der Energieabsorption“ in Bild 6. Die einzelnen Maßnahmen sind dabei teilweise mehrfach aufgeführt, wenn diese zur Realisierung mehrerer Potentiale beitragen. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Potentialfelder und Maßnahmen ist in (Kleemann et al. 2017) zu finden. Den einzelnen Maßnahmen sind wiederum spezifische Gestaltungsrichtlinien zugeordnet, die in einer bestehenden Datenbank hinterlegt sind (Kleemann et al. 2016). Diese Gestaltungsrichtlinien stellen das erforderliche Wissen für die konstruktive Umsetzung hybrider Bauweisen bereit und enthalten z.B. Informationen über die Restriktionen einzelner Fertigungsverfahren oder grundlegende Gestaltungsansätze. Beispielsweise kann die Maßnahme „Erhöhung der lokalen Steifigkeit“ durch das Einbringen von Rippen, Patches oder lokale Anpassungen der Wandstärke umgesetzt werden. Hierzu werden jeweils detaillierte Gestaltungsrichtlinien angegeben, siehe Bild 6. Der beschriebene Aufbau des Potentialmodells wird in aktuellen Forschungsarbeiten schrittweise rechnerunterstützt umgesetzt und das enthaltene Wissen durch begleitende Recherchen ergänzt und präzisiert.

5 Diskussion

Durch das vorgestellte Potentialmodell soll eine zielgerichtete Wissensbereitstellung auf unterschiedlichen Ebenen unterstützt werden. Die eingeführten Wissensarten und -ebenen im

Potentialmodell fokussieren unterschiedliche Situationen während der Produktentwicklung, weshalb sich die jeweils bereitgestellten Informationen hinsichtlich Detaillierungsgrad und Informationsumfang unterscheiden. Die vorgeschlagene Strukturierung und Aufbereitung des Wissens wird in aktuellen Arbeiten für das Anwendungsfeld hybrider Bauweisen detailliert umgesetzt (Kleemann et al. 2017). Hierbei wird eine bestehende Sammlung von Gestaltungsrichtlinien (Kleemann et al. 2016) mit übergeordneten Potentialfeldern und Maßnahmen verknüpft. Eine eindeutige Zuordnung von Gestaltungsrichtlinien zu Maßnahmen bzw. Maßnahmen zu Potentialfeldern ist dabei nicht möglich, siehe auch Abschnitt 3.1. Hierdurch wird die Aufbereitung der ersten zwei Wissensebenen in Form eines Kreisdiagramms erschwert. Zeitgleich wurde diese Darstellung in der praktischen Anwendung als vorteilhaft erachtet, da insbesondere auf Ebene der Potentialfelder ein sehr guter Überblick geboten wird. Zukünftige Arbeiten werden daher die Realisierung des Potentialmodells z.B. durch eine Graphendatenbank fokussieren, siehe nachfolgender Abschnitt.

Abgesicherte Aussagen zur praktischen Nutzung des vorgeschlagenen Potentialmodells können von den Autoren derzeit nicht gemacht werden. Vielmehr ist die vorgestellte Arbeit als grundlegender Lösungsansatz zur Verknüpfung verschiedener Wissensebenen anzusehen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Potentialmodell für die Anwendung neuer (Fertigungs-) Technologien in der Produktentwicklung vorgestellt. Das Modell verfolgt das Ziel unterschiedliche Wissenstypen zu verknüpfen, um zum einen Orientierung bei der Ermittlung und Bewertung von Technologiepotentialen zu bieten. Zum anderen stellt das Modell detailliertere Informationen für die Realisierung der spezifischen Potentiale durch konstruktive Maßnahmen bereit. Die vorgeschlagene Struktur des Potentialmodells basiert auf vier unterschiedlichen, für die Produktentwicklung maßgeblichen Wissensarten und greift den grundsätzlichen Aufbau von Hilfsmitteln zur Wissensbereitstellung auf. Auf der obersten Ebene stellt das Modell strategisches Wissen in Form allgemeiner Potentialfelder wie „Verbesserung der Produkteigenschaften und Funktion“ bereit, diesen Handlungsfeldern werden spezifische Maßnahmen wie „Steigerung der lokalen Steifigkeit“ zugeordnet. Zur Umsetzung der einzelnen Maßnahmen werden Gestaltungsrichtlinien und Lösungsprinzipien bereitgestellt, durch die detaillierte Hinweise zur Umsetzung konstruktiver Lösungen gegeben werden. Die vorgeschlagene Struktur des Potentialmodells wurde mit konkreten Inhalten exemplarisch am Beispiel hybrider Bauweisen aufgezeigt. Wesentlicher Vorteil des Modells ist die Verknüpfung der unterschiedlichen Wissensebenen und damit eine durchgängige Anwendbarkeit während der Produktplanung, -konzeption und -ausarbeitung hervorzuheben. Schwerpunkte zukünftiger Forschungsarbeiten werden die Detaillierung und exemplarische Anwendung des Modells für verschiedene Technologien sowie die rechnerunterstützte Umsetzung des Potentialmodells sein. Die Anwendung ist neben hybriden Bauweisen für generative Fertigungsverfahren geplant. Hierzu werden die Inhalte der einzelnen Wissensebenen detailliert und mit exemplarischen Inhalten gefüllt. Das hierfür erforderliche Wissen soll sowohl aus bestehenden Anwendungen, als auch aus Experteninterviews abgeleitet werden. Weiterhin sollen ausgehend von den definierten Potentialfeldern in Zusammenarbeit mit Experten Technologiebewertungen für unterschiedliche Zeithorizonte durchgeführt werden. Um die Mehrfachzuordnung von Maßnahmen zu Potentialfeldern und Gestaltungsrichtlinien oder Lösungsprinzipien zu Maßnahmen zu ermöglichen sowie die Erweiterung und Pflege des Wissens auf den unterschiedlichen Ebene zu erleichtern, ist weiterhin eine rechnerunterstützte Umsetzung des Potentialmodells geplant. Hierbei soll insbesondere die Anwendung von Datenbanken zur Vernetzung der unterschiedlichen Wissensebenen untersucht werden.

Literatur

- | | |
|--------------|--|
| Ashby 2011 | ASHBY, M. F.: <i>Materials selection in mechanical design</i> . 4. Aufl., Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2011. |
| Fawcett 1986 | FAWCETT, W.: <i>A Note on the Logic of Design</i> . In: <i>Design Studies</i> 8 (1986), Nr. 2, S. 82–87, 1986. |

- Hubka 1984 HUBKA, V.: *Theorie Technischer Systeme : Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1984.
- Inkermann 2017 INKERMANN, D.: *Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Systeme*. TU Braunschweig, Dissertation, 2017.
- Inkermann et al. 2013 INKERMANN, D. ; STECHERT, C. ; VIETOR, T.: *A Framework for the Application of Adaptronic Solution Principles*. In: Proc. of the IDETC/CIE 2013, 2013.
- Keller und Binz 2011 KELLER, A. ; BINZ, H.: *Hybride intelligente Konstruktionselemente - Konstruktion und Einsatz in adaptiven Systemen*. In: SPATH, D.; BINZ, H.; BERTSCHE, B. (Hrsg.): *Engineering - Eine Herausforderung für die Zukunft*. Stuttgart : Fraunhofer, 2011, S. 59–60.
- Kleemann et al. 2017 KLEEMANN, S. ; INKERMANN, D. ; BADER, B. ; VIETOR, T.: *A Semi-Formal Approach to Structure and Access Knowledge for Multi-Material-Design*. In: Proc. of ICED 2017, 2017 (angenommen nach Review).
- Kleemann et al. 2016 KLEEMANN, S. ; TÜRCK, E. ; VIETOR, T.: *Towards Knowledge Based Engineering for Multi-Material-Design*. In: Marjanovic, D.; Storga M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N.; Skec, S. (Hrsg.): *Proc. of DESIGN 2016*, S. 2027–2036, 2016,.
- Koller und Kastrupp 1998 KOLLER, R. ; KASTRUPP, N.: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1998.
- McKinsey 2015 MCKINSEY&COMPANY: *Industry 4.0 How to navigate digitization of the manufacturing sector*. 2015.
- Nestler 2014 NESTLER, D.J.: *Beitrag zum Thema Verbundwerkstoffe – Werkstoffverbünde: Status quo und Forschungsansätze*, TU Chemnitz, Habilitation, 2014.
- Nowack 1997 NOWACK, M. L.: *Design Guideline Support for Manufacturability*. University of Cambridge, PhD-Thesis, 1997.
- Pahl et al. 2007 PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007.
- Roth 2000 ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Bd. 1 –Konstruktionslehre*. 3. Aufl., Berlin : Springer, 2000.
- Roth 2001 ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Bd. 2 - Kataloge*. 3. Aufl., Berlin : Springer, 2001.
- Schuh und Klappert 2011 SCHUH, G. ; KLAPPERT, S. (Hrsg.): *Handbuch Produktion und Management*. 2. Aufl., Berlin : Springer Vieweg, 2011.
- Spath et al. 2015 SPATH, D. ; LINDER, C. ; SEIDENSTRICKER, S.: *Technologiemanagement : Grundlage, Konzepte, Methoden*. Stuttgart : Fraunhofer-Verlag, 2011.
- Vanja 2001 VAJNA, S.: *Wissensmanagement in der Produktentwicklung*. In: MEERKAMM (Hrsg.): *DFX 2001: Proc of Design for X 2001*, S. 1–8, 2001.
- Van Wie 2002 VAN WIE, M. V.: *Designing Product Architecture: A Systematic Method*. University of Texas Austin. PhD-Thesis, 2002.
- Weber und Stark 1991 WEBER, C. ; STARK, R.: *Wissensbasierte Systeme für die Konstruktion : Grundlagen aus Konstruktionsmethodischer Sicht*. In: HUBKA, V. (Hrsg.): *Proc. of ICED 1991 : HEURISTA*, 1991, S. 1151–1162.

ENTWICKLUNGSPROZESS ZUR WISSENSBASIERTEN PRÜFSTANDSKONSTRUKTION

Paul Gembarski¹, Tobias Wellmann², Hans-Ulrich Fleige², Roland Lachmayer¹

¹Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Hannover, Deutschland
gembarski@ipeg.uni-hannover.de

²Aerzener Maschinenfabrik GmbH, 31855 Aerzen, Deutschland
Tobias.Wellmann@aerzener.de

Abstract: Wissensbasierte Systeme bieten vielfältige Möglichkeiten, um für ein gegebenes Konstruktionsproblem das für Konzeptauswahl, Auslegung und Ausdetaillierung zu verwendende Wissen dauerhaft zu konservieren und für zukünftige Entwicklungsaufgaben verfügbar zu machen. Im nachfolgenden Beitrag wird ein Prozess vorgestellt, mit dem ein wissensbasiertes Konstruktionssystem für einen Prüfstand zur Volumenstrommessung entwickelt worden ist. Der Prozess lehnt sich an MOKA (Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications) an, das für diese Aufgabe um eine Konzeptebene erweitert wurde.

Keywords:

Wissensbasierte Konstruktion, KBE, MOKA, Konstruktionsautomatisierung

1 Einleitung

Im Anlagen – und Apparatebau wird die Verwendung von Leistungsprüfständen immer signifikanter, was einen hohen technischen Standard von Messwerterfassung und Auswertung bedingt. Die so aufgenommenen Leistungsparameter dienen zur Erstellung von Kennfeldern oder Leistungsdiagrammen und bilden hierdurch die Grundlage für die technischen Datenblätter, die dem Kunden zur Verfügung gestellt werden (Wiegleb 2016). Bei der Konstruktion dieser Leistungsprüfstände spielen neben rein technischen auch wirtschaftliche Aspekte eine zunehmende Rolle. So ist ein möglichst universeller Einsatz des Prüfstands oder eine leichte Anpassbarkeit auf andere Messaufgaben, z.B. durch modulare Prüfstandsarchitekturen, ein immer häufiger anzutreffender Lösungsansatz (vgl. Dohmen und Fehl 1998 oder Forcada und Bolz 2003).

1.1 Herausforderung

Um das für Konzeptauswahl, Auslegung und Konstruktion benötigte und verwendete Wissen dauerhaft zu konservieren und für zukünftige Entwicklungsaufgaben nutzbar zu machen, bieten wissensbasierte Entwicklungssysteme (knowledge-based engineering systems; nachfolgend KBES) vielfältige Möglichkeiten. Beispiele hierfür stellen die automatisierte Konstruktion von Aufspannvorrichtungen durch modellbasierte Systeme (Boyle et al. 2011), die Verwendung von Konstruktionsregeln und Konfiguratoren bei der parametrischen CAD-Modellierung (Gembarski et al. 2015) oder die Entwicklung und Rekonfiguration von Produkt-Service-Systemen über fallbasierte Schlussfolgerungsmechanismen (Kuntzky 2013) dar. Die Entwicklung dieser KBES ist nach wie vor eine große Herausforderung. Dies ist zum einen damit begründet, dass Konstrukteure bei der Problemlösung häufig nur an eine einzelne optimale Variante denken und diese dokumentieren, den konstruktiven Lösungsraum, der diese Variante enthält, jedoch nicht weiter beschreiben. Gleiches gilt für die spätere Modellierung der Produktbestandteile im CAD-System, wodurch konstruktive Änderungen zu immer neuen Modellen führen.

In diesem Beitrag wird ein Prozess vorgestellt, mit dem ein KBES für die Konstruktion eines Prüfstands zur Volumenstrommessung entwickelt worden ist. Der Prozess lehnt sich an die Entwicklungsmethode MOKA (Methodology and tools Oriented to Knowledge-Based Engineering Applications) an. Diese wurde für die Aufgabe erweitert, so dass der mögliche konstruktive

Lösungsraum umfangreicher dokumentiert werden kann. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Aerzener Maschinenfabrik GmbH durchgeführt.

1.2 Struktur des Beitrags

Zunächst wird im Abschnitt 2 der theoretische Hintergrund zu wissensbasierten Entwicklungssystemen und deren Modellierung präsentiert. Abschnitt 3 widmet sich der Erweiterung des Entwicklungsansatzes MOKA, die im Rahmen des Projekts verwendet worden ist. Das Anwendungsbeispiel Prüfstandskonstruktion wird in Abschnitt 4 umrissen und hinsichtlich der Modellierung des konstruktiven Lösungsraums vorgestellt. Abschnitt 5 fasst den Beitrag zusammen und skizziert den weiteren Forschungsbedarf.

2 Theoretischer Hintergrund

Als Untergruppe der wissensbasierten Systeme stellen KBES die Lösung von ingenieurwissenschaftlichen Problemen wie z.B. Anlagenauslegung, Produktkonfiguration oder Konstruktionsautomatisierung in den Vordergrund. Da das Problemlösungsverhalten der Systeme im Allgemeinen einem menschlichen Experten nachempfunden ist, prägte sich hierfür bereits in den 1980er und 1990er Jahren der Begriff der Expertensysteme (Hayes-Roth 1995). Chapman und Pinfold (2001) sehen hier im Detail die Verknüpfung von objektorientierter Programmierung, künstlicher Intelligenz und rechnerunterstützter Konstruktion, um im Ergebnis die schnelle Anpassung eines Produkts an neue, ggf. individuelle Kundenbedürfnisse zu ermöglichen.

2.1 Aufbau und Aufgaben von KBES

KBES bestehen üblicherweise aus den folgenden Bestandteilen (vgl. Milton 2008 oder Verhagen et al. 2012):

1. *Wissensbasis*: Container für jegliche Form von statischem Domänenwissen, Strukturen und Regeln. Im Kontext der mechanischen Konstruktion fallen Maßstabellen von Normteilen, Variantenstücklisten oder Fertigungsrestriktionen in diese Kategorie.
2. *Inferenzmaschine*: Separate Wissensform, die beschreibt, wie die Wissensbasis auf eine Problemstellung angewendet wird, z.B. den Konfigurationsprozess eines Aufzuges. Anders ausgedrückt beschreibt die Inferenzmaschine, in welcher Form der konstruktive Lösungsraum, den das KBES umfasst, exploriert wird.
3. *Arbeitsspeicher*: Speicher für Zwischenergebnisse und die Instanziierung der Wissens Elemente für die aktuelle Problemstellung.
4. *Nutzerschnittstelle*: Dialog für die Interaktion zwischen Anwender und KBES.
5. *Editor*: Umgebung für die Interaktion zwischen Wissensingenieur und KBES.
6. *CAD-Schnittstelle*: Übergabewerkzeug für ausgerechnete Parameter oder Randbedingungen an das Konstruktionssystem. Auf diese Weise werden z.B. parametrische CAD-Modelle konfiguriert, so dass sie die Lösung der aktuellen Problemstellung abbilden.

KBES werden im Konstruktionsprozess häufig für Syntheseaufgaben verwendet (Gembariski et al. 2016). Als solche sind drei grundsätzliche Typen voneinander zu unterscheiden. Der *synthetische Entwurf* beschreibt den Entwurf eines Systems, das vorgegebene Anforderungen erfüllen soll. Das Wissen, wie das System aus vorhandenen Anforderungen konstituiert wird, muss für diese Aufgabe ebenso modelliert werden, wie mögliche Gütekriterien, nach denen alternative Entwürfe beurteilt und gewichtet werden können. Bezogen auf ein Produkt gehört auch der Entwurf neuer, bisher nicht vorhandener Komponenten zum synthetischen Entwurf. Koller (1991) benennt hier beispielsweise das Erzeugen einer Funktionsstruktur aus gegebenen Anforderungen als Teilschritt.

Die *Konfiguration / Komposition* beschreibt ebenfalls den Entwurf eines Systems, das jedoch aus vorhandenen, vollständig bestimmten Elementen zusammengestellt wird. Diese werden über standardisierte Schnittstellen mit einander gekoppelt, so dass konstruktiv keine Anpassungen erfolgen.

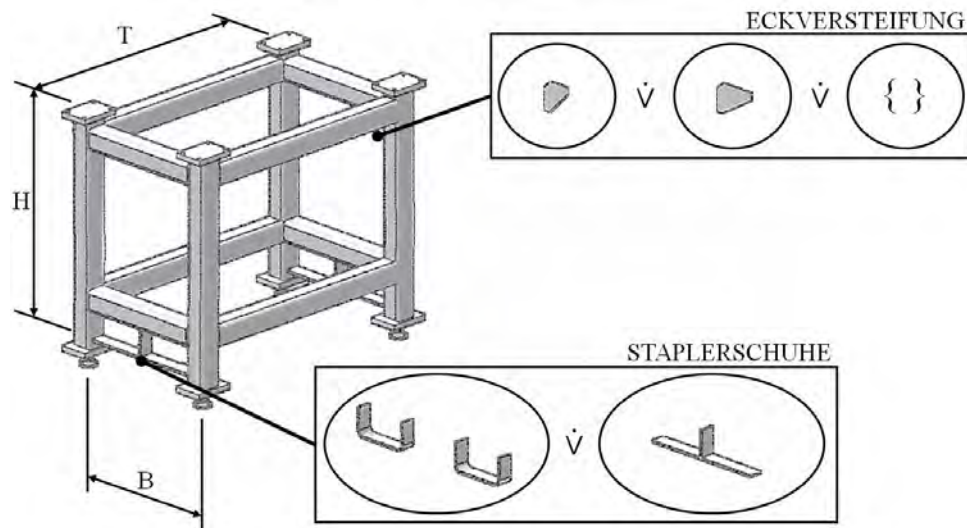


Bild 1: Beispiel - Konstruktionsaufgabe vom Typ Parametrierung (prinzipielle Darstellung)

Bei der *Parametrierung* werden in einem gegebenen, durch variable Parameter beschriebenen System schrittweise alle Freiheitsgrade hinsichtlich Bemaßungen oder Aktivierung einzelner Konstruktionselemente durch das Setzen der Parameterwerte eliminiert. Beispiel hierfür ist das parametrische CAD-Modell eines Rahmens (vgl. Bild 1), das in Länge, Breite und Höhe variiert wird und abhängig hiervon unterschiedliche Elemente für Versteifung oder Transport selbstständig auswählt. Technisch gesehen werden bei der Parametrierung Beziehungsnetzwerke oder sog. Constraint-Satisfaction-Problems gelöst. Diese Art der Modellierung wird heute im Allgemeinen durch die Standardfunktionen handelsüblicher CAD-Systeme abgedeckt (vgl. Gembarski et al. 2015).

2.2 Methoden zur Entwicklung von KBES

Für die Entwicklung von KBES werden in der Literatur unterschiedliche Prozesse und Methoden mit teils sehr spezifischen Schwerpunkten vorgestellt. Exemplarisch für Methoden, welche die Entwicklung der Problemlösungskomponente eines KBES in den Vordergrund stellen, können die Arbeiten von Schreiber (2000) zu *KADS* und *CommonKADS* referenziert werden. Dort stellen die Autoren eine umfangreiche Bibliothek von Arbeitsabläufen und Vorlagen für einzelne Entwicklungstätigkeiten bereit, die sich beliebig kombinieren und verschachteln lassen.

Der von Stokes (2001) präsentierte Ansatz *MOKA* (Methodology and tools Oriented to Knowledge-Based Engineering Applications) legt den Schwerpunkt anders. Auch wenn die Zielsetzung des entsprechenden Forschungsprojekts grundsätzlich die Entwicklung eines international gültigen und neutralen Ansatzes für die Implementierung von KBES war, fokussiert Stokes auf die Akquise, Bewertung und Formalisierung des für das KBES nötigen Wissens. Der zentrale Aspekt ihrer Arbeit ist die Repräsentation dieses Wissens in einem informellen und einem formellen Modell. Ersteres ist hierbei als semistrukturierte und klartextliche Sammlung von Wissensartefakten und deren Beziehungen untereinander zu sehen, die für Nutzer und Entwickler des KBES lesbar und verständlich ist. Das formelle Modell ist dem gegenüber eine Repräsentation dieses Wissens, die vom KBES automatisch und maschinenleslich verarbeitet werden kann. Eine Herausforderung ist hierbei, dass im ingenieurwissenschaftlichen Bereich ein verhältnismäßig großer Teil des Konstruktionswissens als Heuristiken vorliegt und somit zunächst in eine explizite, auf das Konstruktionsproblem anwendbare Form gebracht werden muss (dies gilt z.B. für die Gestaltungsrichtlinie „*Vermeidung von Materialanhäufungen*“ bei der Gusskonstruktion).

2.3 MOKA-Lebenszyklus

Der MOKA-Lebenszyklus ist ein standardisierter Ablauf, der von der Idee für ein KBES zu dessen Implementierung und Aktivierung führt. Hierbei sind sechs Phasen sequentiell zu durchlaufen:

1. *Identifikation der Aufgabenstellung und der Bedarfe an einem KBES*: In dieser Phase werden die Ziele des Entwicklungsprojekts identifiziert. Neben den Anforderungen, möglichen Wissensquellen und der angestrebten Implementierungsform stellt die Beurteilung des Nutzen-Aufwandverhältnisses der Modellierung einen zentralen Aspekt dar.
2. *Rechtfertigung der KBES-Entwicklung*: Hier werden mögliche Projektrisiken antizipiert, Projektkosten abgeschätzt und ein erster Projektplan aufgestellt.
3. *Erfassung des für die Aufgabe nötigen Wissens*: Diese Phase fokussiert auf die Sammlung von allen nötigen Wissensartefakten. Diese sind für die weiteren Schritte strukturiert abzulegen, wofür mit den von Stokes vorgestellten ICARE-Formularen ein weiteres Werkzeug zur Verfügung gestellt wird. Eine detaillierte Diskussion der ICARE-Formulare würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen, daher wird hier auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. Stokes 2001).
4. *Formalisierung und DV-Aufbereitung des Wissens*: In dieser Phase wird das gesammelte Wissen in eine DV-gerechte Form gebracht.
5. *Bündelung und Implementierung im KBES-Prototyp*: An dieser Stelle wird der Prototyp des KBES erstellt und funktional getestet. Darüber hinaus werden geeignete Benutzerdialoge und Bedienoberflächen geschaffen.
6. *Aktivierung und Test*: Die letzte Phase zielt darauf ab, das KBES in den produktiven Einsatz zu bringen. Neben Inbetriebnahme und Test beim Auftraggeber findet hier ebenfalls das Anwendungstraining der Nutzer statt.

3 Erweiterung von MOKA um eine Konzeptbewertung

Traditionell werden die sechs Phasen bei der KBES-Entwicklung mit Bezug zu einer definierten vorhandenen konstruktiven Lösung durchgeführt. Das Ergebnis ist die Automatisierung einer Anpassungs- oder Variantenkonstruktion, das konstruktive Lösungsprinzip bleibt also weitestgehend identisch. Die Informationen, die zu dem jeweiligen Konzeptentscheid geführt haben, bleiben für die KBES-Entwicklung somit unberücksichtigt und stellen eine erste Einschränkung des potenziellen Lösungsraums dar. Für das diesem Beitrag zugrunde liegende Forschungsprojekt ist eine solche Einschränkung nicht zulässig gewesen. Eines der Projektziele stellt die vollständige Dokumentation des Wissens zur Auswahl eines Konzepts für die Volumenstrommessung dar. Hierfür sind die Anforderungen an den Prüfstand den möglichen konstruktiven Lösungen gegenüberzustellen, Restriktionen zu formulieren und die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Konzepts in der späteren Realisierung zu beurteilen. Darauf basierend ist die Prüfstandkonstruktion der relevanten Konzepte sinnvoll zu automatisieren. Da in der Phase der Projektdurchführung die Wissensakquise und Dokumentation im Vordergrund vor der Umsetzung der Schlussmechanismen lag, wurde MOKA als Methode herangezogen und um eine Konzeptebene erweitert.

3.1 Erweiterter MOKA-Lebenszyklus

Die Erweiterung des MOKA-Lebenszyklus betrifft die Phasen eins (Identifikation) und zwei (Rechtfertigung), die zunächst nicht auf die konkrete Konstruktionsautomatisierungsaufgabe, sondern auf der Konzeptebene angewendet werden (vgl. Bild 2). In diesen Phasen wird der gesamte MOKA-Entwicklungszyklus verkürzt ausgeführt, um den Aufwand für die Implementierung gering zu halten. Um für ein gegebenes konstruktives Problem unterschiedliche Lösungen modellieren und bewerten zu können, muss der Zusammenhang zwischen Anforderungen resultierend aus der Aufgabenstellung und den alternativen Lösungen bzw. Lösungsbausteinen im KBES abgebildet werden, was dem *synthetischen Entwurf* entspricht. Die Tätigkeiten der Phase eins auf Konzeptebene umfassen somit:

- Umfassende Dokumentation der Aufgabenstellung und den daraus resultierenden Anforderungen
- Abschätzung, ggf. Roadmapping von Anforderungsänderungen in geplanten, zukünftigen Entwicklungsprojekten
- Identifikation verschiedener Lösungsprinzipien und ihrer technischen Restriktionen
- Recherche zu bestehenden Konfigurations- und Automatisierungslösungen und Dokumentation derer Ein- und Ausgabemöglichkeiten

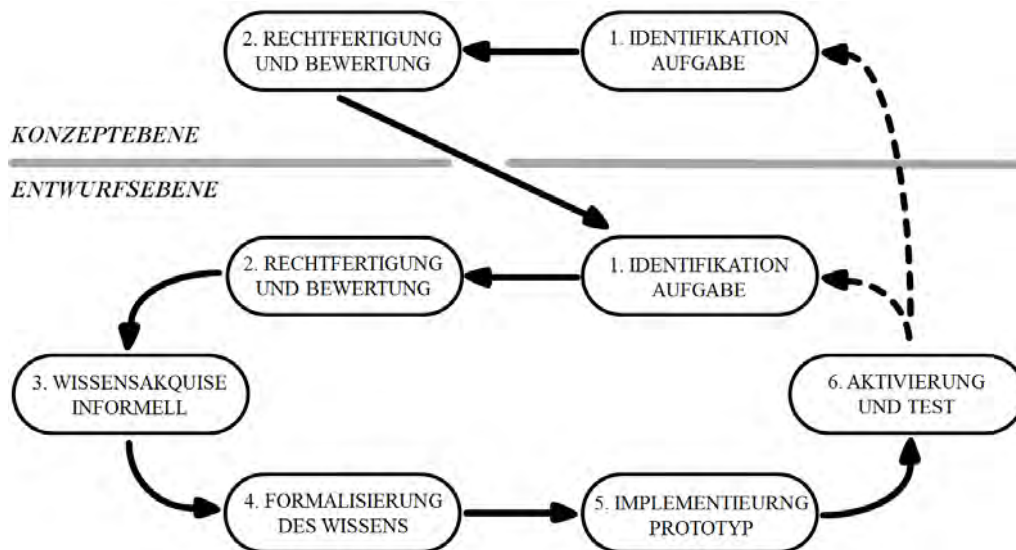


Bild 2: Erweiterter MOKA-Entwicklungszyklus

In Phase zwei (Rechtfertigung) werden darauf folgend diese Tätigkeiten ausgeführt:

- Abschätzen der Auftretenswahrscheinlichkeiten einzelner Lösungsprinzipien
- Ableiten von Szenarien für unterschiedliche technische und wirtschaftliche Randbedingungen
- Entscheidung über zu implementierende Lösungskonzepte im KBES

In Summe kann ein Konzeptentscheid vollständig über die genannten Tätigkeiten abgebildet werden.

3.2 Implementierung der Konzeptbewertung

Je nach Kompliziertheit der Aufgabenstellung und der resultierenden Lösungsprinzipien sind unterschiedliche Implementierungsformen denkbar. In der einfachsten Form lassen sich Anforderungen und Lösungen in einer Entscheidungsmatrix gegenüberstellen (was innerhalb des Projekts umgesetzt worden ist, vgl. Abschnitt 5.1). Alternativ erlaubt ein rechnerunterstützter Konstruktionskatalog eine feinere Untergliederung bzw. eine Gewichtung einzelner Zugriffsmerkmale (Gembarski et al. 2016).

4 Anwendungsbeispiel Prüfstandskonstruktion

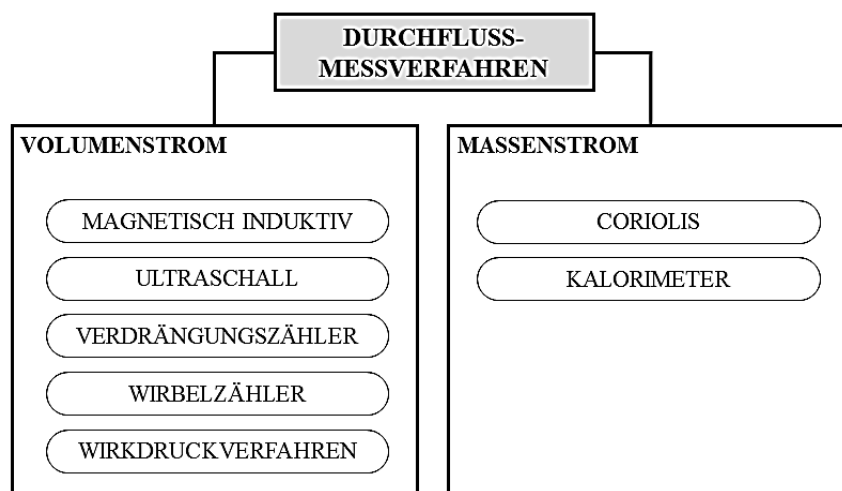


Bild 3: Exemplarische Auswahl an Durchflussmessverfahren

Im vorliegenden Forschungsprojekt bestand die Zielsetzung in der vollständigen Konstruktion eines Prüfstands zur Durchflussmessung bei Drehkolbenmaschinen. Die Anwendung des Prüfstands liegt in der Ermittlung von Fördervolumenstrom und Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von Drehzahl und Druckdifferenz, so dass aus diesen Daten das Kennfeld des Verdichters bestimmt werden kann.

Die Bestimmung des jeweiligen Massen- oder Volumenstromes kann durch unterschiedliche Messprinzipien durchgeführt werden. Die in Bild 3 dargestellten Verfahren werden breit in industriellen Anwendungen genutzt und stellen eine Teilmenge von über 30 dokumentierten Messprinzipien dar. Innerhalb dieser kommt dem Verdrängungszähler und dem Wirkdruckverfahren eine besondere Stellung zu, da es sich hierbei um rein mechanische Systeme handelt. Für weitergehende Informationen zu den Messverfahren wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Als Anforderungen für den Prüfstand gelten neben weiteren die folgenden Kerncharakteristika:

- Fördermedium: Luft
- Messgenauigkeit: $\leq 1\%$ vom Messwert
- Einlaufstrecke: $\leq 15 \cdot$ Rohrdurchmesser
- Temperaturen: bis 250°C
- Druckbereich: $\leq 1,2\text{bar}$ absolut
- Strömungsgeschwindigkeiten: $\geq 30\text{m/s}$

Weiterhin sind Restriktionen hinsichtlich des Bauraums zu beachten. Entsprechend des erweiterten MOKA-Entwicklungszyklus werden nachfolgend zunächst die Zusammenhänge auf konzeptueller Ebene erläutert, die zur Eingrenzung und Auswahl des Messprinzips führten. Anschließend wird auf der Entwurfsebene ein Messprinzip im Rahmen eines wissensbasierten Entwicklungssystems nach den klassischen sechs Phasen implementiert, so dass der Prüfstand zukünftig durch Rekonfiguration schnell an veränderte Anforderungen angepasst werden kann. Als Beispiel für die Formalisierung in der MOKA-Phase vier wird die Messunsicherheitsanalyse nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) ausgeführt (JCGM 100:2008).

4.1 Konzeptuelle Ebene

BEWERTUNGSMATRIX		ANFORDERUNGSKRITERIEN			
		FÖRDERMEDIUM [LUFT]	TEMPERATUR [BIS 250°C]	MESSBEREICH-VOLUMEN [300-1800m ³ /h]	DRUCKBEREICH ABSOLUT [1,2-2bar]
MESSVERFAHREN	DREHKOLBEN-GASZÄHLER	GEEIGNET	UNGEEIGNET	GEEIGNET (PARALLELE MESSSTRECKE)	GEEIGNET
	CORIOLIS	GEEIGNET	UNGEEIGNET MAX. 200°C	UNGEEIGNET	UNGEEIGNET
	MAGNETISCH INDUKTIV	GEEIGNET	UNGEEIGNET MAX. 200°C	UNGEEIGNET	UNGEEIGNET
	ULTRASCHALL	GEEIGNET	GEEIGNET	GEEIGNET (PARALLELE MESSSTRECKE)	UNGEEIGNET
	WIRKDRUCK (BLENDE)	GEEIGNET	GEEIGNET	GEEIGNET (PARALLELE MESSSTRECKE)	GEEIGNET

Bild 4: Auszug aus dem Aufbau der Bewertungsmatrix

Die Eingangsgrößen der konzeptuellen Phase stellen die vollständige Anforderungsliste an den Prüfstand dar, der nachfolgend die Messprinzipien und ihre Anwendungsgrenzen gegenübergestellt werden. Im Detail werden Merkmale wie Fördermedium, Messbereich/-genauigkeit, Platzbedarf

hinsichtlich Beruhigungs-/Einlaufstrecken vor der Messapparatur und Kosten der Apparatur erfasst. Mit Blick auf die potenzielle Änderung der Anforderungen sind Anpassungen bei den Druckbereichen und beim Messbereich für den Volumenstrom denkbar, das Fördermedium bleibt konstant bei Luft. Die Lösungsprinzipien werden diesen Anforderungen dann in einer Entscheidungsmatrix gegenübergestellt (vgl. Bild 4). Im dargestellten Ausschnitt werden z.B. Angaben über den minimal und maximal zu messenden Volumenstrombereich in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers identifiziert und der entsprechenden Tabellenzelle innerhalb der Bewertungsmatrix zugeordnet. Existierende Konfigurations- und Automatisierungslösungen für die gegebene Aufgabenstellung konnten nicht identifiziert werden.

Innerhalb der Phase der Rechtfertigung auf Konzeptebene wurde deutlich, dass bei den aktuellen Randbedingungen nur ein einziges Verfahren infrage kommt und die Auftretenswahrscheinlichkeiten der anderen Messprinzipien vernachlässigbar klein sind. Auch nach der Bewertung unterschiedlicher Bauräume wurde entschieden, das Wirkdruckprinzip für die KBES-Entwicklung weiter zu verfolgen.

4.2 Entwurfsebene

Auf Entwurfsebene wird die Ausarbeitung des konkreten Prüfstandskonzepts zur Volumenstrommessung mit dem Wirkdruckverfahren der Blende durchgeführt. Die Ausarbeitung startet hierbei erneut mit der Phase eins – Identifikation des MOKA-Entwicklungsansatzes aus Bild 2. In Phase eins und zwei wird der vorhandene Datensatz aus der Konzeptebene zunächst verfeinert und auf das Messverfahren hin verdichtet.

Phase drei leitet in die Wissensaufnahme über, in der das informelle Modell erstellt wird. Eine ISO-Norm bietet hierfür die Grundlage (DIN EN ISO 5167-2:2003). Die hieraus resultierende Entwurfsskizze des Prüfstands gibt einen ersten Anhaltspunkt, welche Bauteile/-komponenten im Allgemeinen und hinsichtlich deren Anordnung für das Projekt notwendig werden (vgl. Bild 5) und welche Auslegungformeln und Regeln für das KBES integriert werden müssen.

Wichtig für die Vorauslegung, die ebenfalls durch das KBES durchgeführt werden soll, ist die Beurteilung unterschiedlicher Blendengrößen und unterschiedlicher Anzahlen an Rohrleitungen. Da der Volumenstrom aufgeteilt werden muss, wurden ebenfalls im Rahmen der Phase der Informationsbeschaffung unterschiedliche Varianten von Diffusoren und Hosenrohren modelliert und mittels Strömungssimulation miteinander verglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung gehen als Fallbasis in das KBES mit.

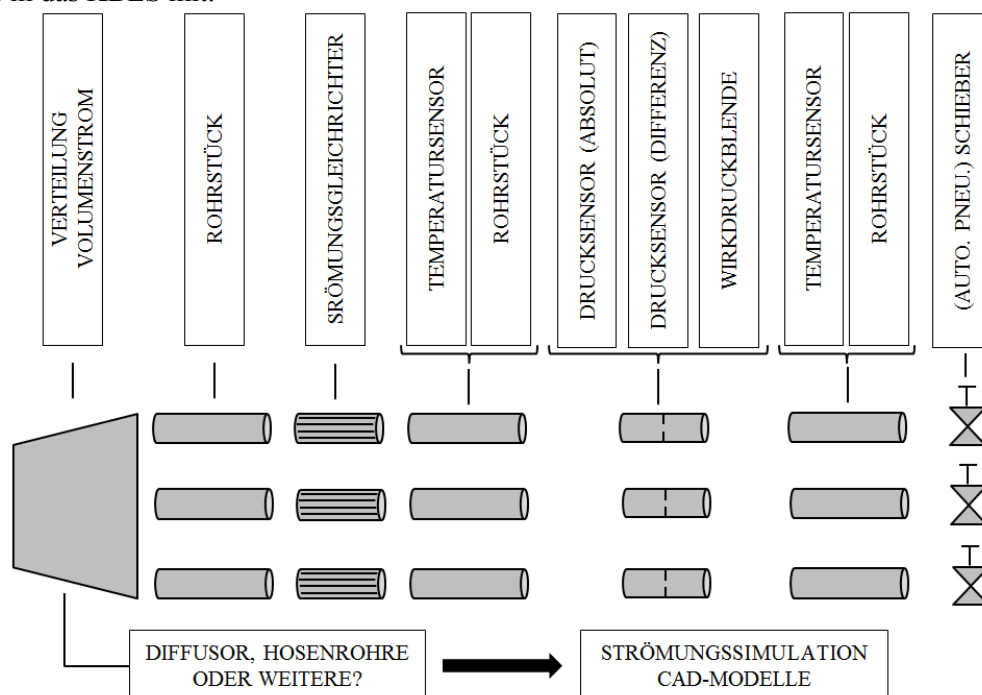


Bild 5: Entwurfsskizze Prüfstand Wirkdruckblende

Neben den Eigenfertigungsteilen sind weiterhin Kaufteile zu erfassen, z.B. Druck- und Temperatursensoren mit ihren jeweiligen technischen und kaufmännischen Daten. Dies ist u.a. dafür nötig, um das KBES in die Lage zu versetzen, den Nutzen zwischen alternativen Sensoren und der dadurch erzielbaren Messgenauigkeit beurteilen und abwägen zu können.

Die Phasen vier und fünf des MOKA-Entwicklungszyklus wurden im Rahmen des Projekts eng verzahnt ausgeführt. Das formalisierte Wissen wurde hier in ein auf MS Excel basierendes Auslegungsprogramm und in die parametrischen CAD-Modelle implementiert.

Das Auslegungsprogramm bietet den großen Vorteil, dass sämtliche Parameter zu Umgebungs- und Betriebsbedingungen, gewählten Blendengrößen und der verwendeten Anzahl an Rohrleitungen zentral erfasst und gesteuert werden können. Hinsichtlich der Rohrleitungsanzahl und der hieraus entstehenden Volumenstromaufteilung werden die bereits vorliegenden Ergebnisse der Strömungssimulation genutzt, indem entsprechende konstruktive Parameter abgeleitet und innerhalb von Excel für die Bauteildimensionierung/-parametrierung fallbasiert abgelegt werden. Darüber hinaus bietet das Auslegungsprogramm die Möglichkeit der Messunsicherheitsanalyse nach GUM an. Die Messunsicherheitsanalyse benötigt neben den berechneten Volumenstromwerten des Auslegungsprogramms zusätzlich die technischen Daten der zum Einsatz kommenden Temperatur- und Drucksensoren. Die technischen Daten werden ähnlich einer Datenbank in Excel eingepflegt und können mittels einer Auswahl-Schaltfläche gewechselt werden, um verschiedene Konstellationen zu konfigurieren und dem Nutzer das Optimum zu seinen Bedürfnissen bei der Volumenstrommessung aufzuzeigen. Die Messunsicherheitsanalyse ermöglicht zum einen die grafische Aufbereitung und Darstellung des relativen Messfehlers in Abhängigkeit des vorliegenden Volumenstroms (vgl. Bild 6). Zum anderen werden auf Basis der Messunsicherheitsanalyse anschließend die Daten an das entsprechende CAD-System zur Konfiguration der Bauteile und Baugruppen des Prüfstands weitergegeben, sodass der in Bild 7 dargestellte Prüfstand entsteht.

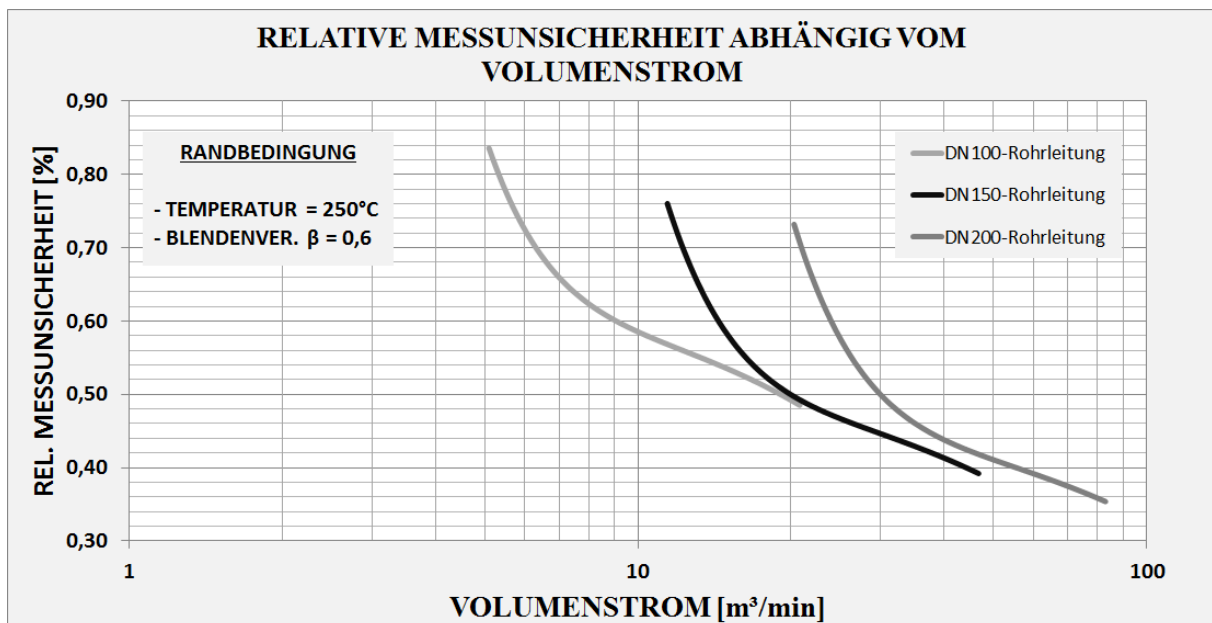


Bild 6: Messunsicherheitsanalyse für 3 einzelne Rohrleitungen einer Beispielkonfiguration

Die Parametertabelle beinhaltet darüber hinaus weitere Berechnungsprogramme zur Festigkeitsberechnung eines Prüfstandsrahmens. Hierdurch wird die Dimensionierung der Profilgeometrie des Grundrahmens entsprechend der zum Einsatz kommenden Rohrleitungsanzahl und deren Durchmesser berücksichtigt und entsprechend angepasst.

Im CAD-System wurden für die Konstruktion sämtliche möglichen Bauteile im Sinne einer Maximalkonfiguration vorgesehen, die durch die übergebenen Parameter angepasst und ein- bzw. ausgeschlossen werden können. Diese Vorlagen umfassen ebenfalls einen kompletten Zeichnungssatz für die Auftragsvergabe.

Wird zukünftig ein Prüfstand für einen anderen Volumenstrombereich oder Differenzdruck benötigt, lässt sich ein angepasster Prüfstand binnen weniger Minuten aus dem System ableiten. Das Auslegungswissen ist vollständig innerhalb des KBES codiert und wurde zwischenzeitlich bereits auf die Modifikation einer existierenden Ausführung mit zwei Rohrleitungen erfolgreich angewendet.

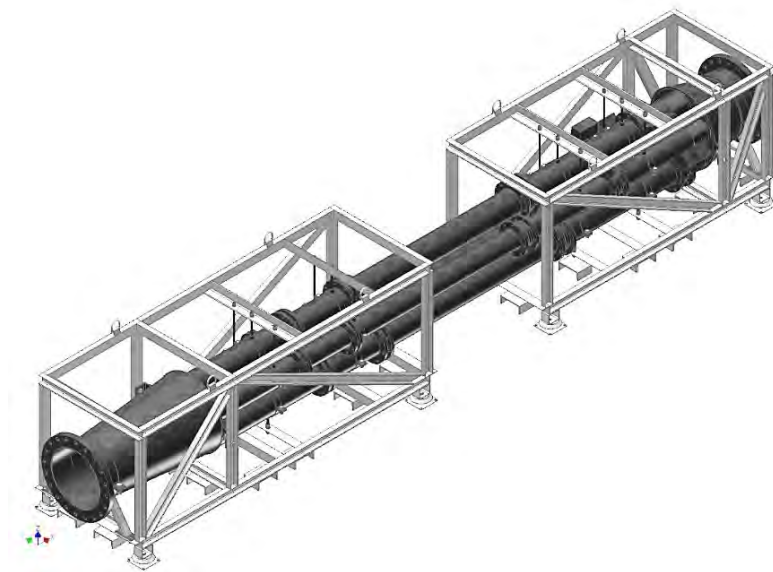


Bild 7: vollständige 3D-Modellierung des Prüfstands zur Volumenstrommessung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Prozess vorgestellt, mit dem ein KBES für einen Prüfstand zur Volumenstrommessung entwickelt worden ist. Hierfür wurde der bestehende MOKA-Entwicklungszyklus um eine Konzeptebene erweitert, in welcher die Entwicklungsphasen beschleunigt in Bezug auf das konstruktive Problem synthetischer Entwurf durchgeführt werden. Auf diese Art und Weise wird das Wissen für einen Konzeptentscheid bei der Entscheidung für die weitere Implementierung des KBES mit einbezogen und für zukünftige Projekte nutzbar gemacht.

Im vorliegenden Projekt wurde hierfür das Werkzeug der Entscheidungsmatrix gewählt, da die Zusammenhänge zwischen Anforderungen und Betriebscharakteristika der Messverfahren analytisch in einfacher Form modelliert werden können. Darüberhinausgehend wurde im Beitrag angesprochen, dass rechnerunterstützte Konstruktionskataloge für die Dokumentation komplizierterer Zusammenhänge eine Möglichkeit darstellen, was im Rahmen weiterer Projekte erforscht wird. Durch die Implementierung eines solchen Katalogsystems lassen sich zusätzliche Potenziale für die Tätigkeit des synthetischen Entwurfs heben, da die Verbindung zwischen fallbasierten Schlussmechanismen im Katalog und Konfigurationsmethoden innerhalb der parametrischen CAD-Modelle weitergehende Möglichkeiten der Konstruktionsautomatisierung bieten.

Literatur

- | | |
|--------------------------|--|
| Boyle et al. 2011 | BOYLE, Iain ; RONG, Yiming ; BROWN, David C: A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. In: <i>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</i> Vol. 27, Nr. 1, 2011, S. 1-12. |
| Chapman und Pinfold 2001 | CHAPMAN, Craig B. ; PINFOLD, Martyn: The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure. In: <i>Advances in Engineering Software</i> , Vol. 32, Nr. 12, 2001, S. 903–912. |
| DIN EN ISO 5167-2:2003 | <i>Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt – Teil 2: Blenden (ISO 5167-2:2003);</i> |

- Deutsche Fassung EN ISO 5167-2:2003, Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, 2003.
- Dohmen und Fehl 1998 DOHMEN, Hans-Peter ; FEHL, Gerald: *Dynamic and Transient Engine Testing Application, System Requirements and Modular Structures*. SAE Technical Paper, 1998.
- Forcada und Bolz 2003 FORCADA, Ignasi ; BOLZ, Holger: Neue Prüfstandstechnik für die Entwicklung moderner Turbolader. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, 64. Jg., Nr. 1, 2003, S. 38-42.
- Gembarski et al. 2015 GEMBARSKI, Paul Christoph ; LI, Haibing ; LACHMAYER, Roland: KBE-Modeling Techniques in Standard CAD-Systems: Case Study – Autodesk Inventor Professional. In: Bellemare, Jocelyn ; Carrier, Serge ; Nielsen, Kjeld ; Piller, Frank Thomas (Hrsg.): *Managing Complexity*. Berlin : Springer, 2015, S. 215-233.
- Gembarski et al. 2016 GEMBARSKI, Paul Christoph ; BIBANI, Mehdi ; LACHMAYER, Roland: Design Catalogues: Knowledge Repositories for Knowledge-Based-Engineering Applications. In: *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*, The Design Society, 2016, S. 2007-2016.
- Hayes-Roth 1995 HAYES-ROTH, Barbara: An architecture for adaptive intelligent systems. In: *Artificial Intelligence*, Vol. 72, Nr. 1, 1995, S. 329–365.
- JCGM 100:2008 *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008.
- Koller 1991 KOLLER, Rudolf: CAD- und Expertensysteme der Konstruktion - Stand und Möglichkeiten. In: *Berechnung, Gestaltung und Fertigung von Schweißkonstruktionen im Zeitalter der Expertensysteme*, 1991.
- Kuntzky 2013 KUNTZKY, Katrin: *Systematische Entwicklung von Produkt-Service-Systemen*. Universität Braunschweig, Institut für Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering, Dissertation, 2013.
- Milton 2008 MILTON, Nick R.: *Knowledge technologies*. Bd. 3. Mailand: Polimettrica sas, 2008.
- Twain und Singer 2004 TWAIN, Ellen ; SINGER, Peter: Structuring your knowledge, Bd. 1. In: Frey, Francis (Hrsg.): *The art of writing*. 2. Aufl. Sheffield : Quickpress, 2004, S. 88-170.
- Schreiber 2000 SCHREIBER, Guus: *Knowledge engineering and management: the CommonKADS methodology*. Boston: MIT press, 2000.
- Stokes 2001 STOKES, Melody: *Managing Engineering Knowledge – MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Applications*. London: Professional Engineering Publishing, 2001.
- Verhagen et al. 2012 VERHAGEN, Wim. J.C. ; BERMELL-GARCIA, Pablo ; VAN DIJK, Reinier ; CURRAN, Richard: A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. In: *Advanced Engineering Informatics*, 26. Jg., Nr. 1, 2012, S. 5-15.
- Wiegleb 2016 WIEGLEB, Gerhard: *Gasmessstechnik in Theorie und Praxis - Messgeräte, Sensoren, Anwendungen*. Heidelberg: Springer, 2016.
- VDI 2221:1993 *VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI, Düsseldorf, 1993.

Additive Manufacturing – Business Capabilities in der Produktentwicklung

Michelle Moisa¹

¹Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) und
Lehrstuhl für ABWL und Wirtschaftsinformatik 1, Stuttgart, Deutschland
michelle.moisa@gsame.uni-stuttgart.de

Abstract: Die Fertigungstechnologie Additive Manufacturing (AM) kann in zahlreichen Branchen zum Umbruch von Wertschöpfungsketten führen und kann in Industrieunternehmen ein wettbewerbsrelevanter Faktor sein. Der Impuls zum Einsatz entspringt oftmals forschungsnahen Unternehmensbereichen. Denn insbesondere die Produktentwicklung hat maßgeblichen Einfluss auf die Gestaltung des gesamten Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses. Unternehmen stehen jedoch vor der Fragestellung, welche Anpassungen intern und gegenüber Dritten zu treffen sind, um das Potenzial von AM wirtschaftlich und zielgerichtet nutzen zu können. Hierzu sind unterstützende Ansätze entwickelt worden, die unterschiedlichen Abstraktionsgraden und Schwerpunkten nachgehen. Für die vorliegende Arbeit bedarf es eines Ansatzes, der im Abstraktionsniveau heruntergebrochen werden kann und der sowohl für den initialen als auch den fortführenden AM-Einsatz Unterstützung bietet. Daher wird nachfolgend ein Capability (Fähigkeiten)-basierter Ansatz herangezogen, der diesen Anforderungen nachkommt. Für die Produktentwicklung werden Capabilities instanziiert, die als Basis zur Ableitung von Handlungsbedarfen dienen.

Keywords:

Additive Manufacturing, Business Capabilities, Produktentwicklung, Handlungsbedarfe

1 Motivation und Zielsetzung

Flexibilität ist eine der grundlegenden Herausforderungen, mit der sich produzierende Unternehmen derzeit konfrontiert sehen. Steigende Variantenvielfalt, Individualisierung und Personalisierung sowie kurze Innovationszyklen fordern u. a. wandlungsfähige Produktionsstrukturen und eine agile Prozessgestaltung. Dabei bedarf es eines effizienten Ressourceneinsatzes innerhalb der Fertigung und über den gesamten Produktentstehungs- und -nutzungszeitraum hinweg (Westkämper 2013).

Insbesondere die Produktentwicklung hat auf die genannten Anforderungen wesentlichen Einfluss. Daher sind flexible Fertigungstechnologien notwendig, die der Produktentwicklung die erforderlichen Freiräume gewähren können. Additive Manufacturing (AM) ist eine Fertigungstechnologie, die diesem flexiblen Anforderungsprofil gerecht wird. Innerhalb der Produktentwicklung stellt AM einen zunehmend wettbewerbsrelevanten Faktor dar. So kann aufgrund der hohen Konstruktionsfreiheit nach dem Prinzip „Design for Function“ vorgegangen werden und sehr spezifisch und zugleich wirtschaftlich auf zweck- und kundenorientierte Anforderungen eingegangen werden (z. B. Topologieoptimierung und kleine Losgrößen) (Lindemann 2016). Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind mit AM außerdem erhebliche Zeiterparnisse innerhalb der Produktentwicklung realisierbar (Beyer 2014).

Die Auswirkungen von AM auf den Produktentstehungs- und -nutzungsprozess sind im wissenschaftlichen Umfeld bereits aufgegriffen worden (vgl. Abschnitt 3.1). Ebenso lassen sich verschiedene Ansätze zur Unterstützung von Unternehmen beim Einsatz von AM finden (vgl. Abschnitt 3.2). In der industriellen Praxis stoßen Unternehmen allerdings auf die Herausforderung, die Auswirkungen von AM konkret in bestehende Unternehmens- und Geschäftsprozessstrukturen zu implementieren (Moisa und Morar 2015). Letztendlich sind Unternehmen mit der Fragestellung konfrontiert, inwiefern sie Prozesse, personelle Belange, die Organisation und technologische Aspekte (Informationstechnologie und Fertigungstechnologie) unter Berücksichtigung AM-beeinflusster Geschäftsziele und Geschäftsmodelle auszurichten haben.

Der AM-Einsatz wird in der Unternehmenspraxis zumeist aus Forschungs- und Entwicklungsabteilungen heraus forciert. Die Initiative kommt hierbei insbesondere aus der Produktentwicklung, weshalb

diese in den Mittelpunkt des vorliegenden Forschungsbeitrags rückt. Unter der Produktentwicklung wird u. a. die Ermittlung der Produkthanforderungen (i. S. e. Pflichtenhefts), die funktionale und strukturelle Gestaltung sowie die dazugehörige Dokumentationsarbeit gefasst (Westkämper 2006).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, durch die Erhebung und Strukturierung sog. Business Capabilities (Geschäftsfähigkeiten) Handlungsbedarfe auf prozessualer, personeller, organisatorischer und technologischer Ebene für die AM-basierte Produktentwicklung abzuleiten.

2 Wissenschaftliche und methodische Einordnung

Der Forschungsbeitrag folgt den Paradigmen der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik (Österle et al. 2010). Er deckt die Analysephase und die Entwurfsphase ab. Die Evaluation der Ergebnisse entspricht einer umfangreichen und teilweise interdisziplinären Aufgabe und ist deshalb in einem eigenständigen, fortführenden Forschungsbeitrag zu positionieren.

Im Rahmen der **Analysephase** wurde anhand von Vorgesprächen mit Vertretern aus Industrieunternehmen die hier zugrundeliegende Problemstellung praxisnah hergeleitet. Ausgehend davon erfolgte die Formulierung der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1).

Auf Basis einer strukturierten Literaturrecherche in Anlehnung an Brocke et al. (2009) wurden bestehende Gestaltungsansätze zum industriellen Einsatz von AM identifiziert und bezüglich der Anwendbarkeit auf die vorliegende Problemstellung hin untersucht (vgl. Abschnitt 3.2). Hiermit wird die Forschungslücke aufgezeigt. Grundlage für die Recherche bildeten die Datenbanken Academic Search Premier, Web of Science, Science Direct, TEMA Technik und Management, IEEE und ACM Digital Library, die anhand der Begriffe „Additive Manufacturing“, „3D-Printing“, „Implementation“, „Framework“ und „Adoption“ durchsucht wurden. Die relevanten Ergebnisse werden außerdem durch eigene Vorarbeit ergänzt.

Als Beitrag zur Schließung der in Abschnitt 3.2 identifizierten Lücke wird in der vorliegenden Forschungsarbeit ein Capability-basierter Ansatz herangezogen (vgl. Abschnitt 3.3). In der **Entwurfsphase** wurden hierfür Interviews geführt und mithilfe einer inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse ausgewertet (Kuckartz 2014):

- **Charakterisierung des Materials:** Im Zeitraum von Juni 2015 bis September 2016 wurden sieben leitfadengestützte Experteninterviews (zwischen 1,5 h und 4 h) mit Vertretern aus deutschen Industrieunternehmen geführt. Die Unternehmen sind den Branchen Maschinenbau, Werkzeugmaschinenbau, Luft- und Raumfahrt sowie Fahrzeugbau zuzuordnen. Ein Interview fand außerdem bei einem AM-Auftragsfertiger statt, da die Fertigung häufig durch diese Art von Unternehmen erfolgt. Bei den Befragten handelt es sich vornehmlich um Entscheidungsträger im AM-Bereich ihres jeweiligen Unternehmens. Diese sind überwiegend in forschungs- und entwicklungsnahe Abteilungen tätig. Die Interviews wurden schriftlich protokolliert bzw. digital aufgenommen und transkribiert.
- **Festlegung und Durchführung der Analyse:** Die charakteristischen Kategorien wurden hierbei sowohl deduktiv anhand des verwendeten Interviewleitfadens und der theoretischen Grundlagen zur Thematik gebildet als auch induktiv anhand des Interviewmaterials. Die Kategorien spiegeln Einflussgrößen wider, die beim Einsatz von AM zu berücksichtigen sind, und dienen als Hilfestellung zur Definierung der Capabilities.
- **Ergebnisdarstellung:** Das Ergebnis der qualitativen Inhaltsanalyse fließt in den Lösungsansatz des vorliegenden Beitrags ein und wird in Abschnitt 4 vorgestellt.

3 Ausgangslage und Stand der Technik

3.1 Additive Manufacturing als industrielle Fertigungstechnologie

Additive Manufacturing ist der technologische Überbegriff für unterschiedliche generative Fertigungsverfahren, die zur industriellen Herstellung von Endprodukten genutzt werden. In Abgrenzung zu subtraktiven Verfahren (z. B. Fräsen) und formativen Verfahren (z. B. Schmieden) werden Bauteile bei

generativen Verfahren durch das Aneinanderfügen einzelner Werkstoffelemente oder -schichten hergestellt (Burns 1993; VDI 3405 2014). Je nach AM-Verfahren kommen unterschiedliche Fügeansätze und Werkstoffe zum Einsatz (z. B. Zusammenschmelzen von Metallpulver durch Lasereinwirkung).

Der additive Ansatz zeichnet sich im Wesentlichen dadurch aus, dass die Fertigungstechnologie eine hohe Designfreiheit in der Produktentwicklung zulässt und ohne bauteilspezifische, formgebende Werkzeuge auskommt. Die Designfreiheit erlaubt es, die Funktion eines Bauteils in den Mittelpunkt zu stellen. Dadurch kann einem alternativen Konstruktionsparadigma als bei der Fertigung mit konventionellen Verfahren gefolgt werden (insb. „Design for Function“). Auf diese Weise lassen sich etwa bionische Strukturen und funktionsintegrierte Konstruktionen realisieren. Vor allem durch den Wegfall von bauteilspezifischen Werkzeugen können kleine Losgrößen und Individualanfertigungen wirtschaftlich umgesetzt werden. In einigen Branchen können diese Potenziale zum Wandel von Wertschöpfungsketten führen und beeinflussen Geschäftsziele sowie Geschäftsmodelle (Lutter-Günther et al. 2015).

Die Technologie eröffnet branchenübergreifend und für unterschiedliche Geschäftsbeziehungen vielseitiges Anwendungspotenzial. Im Fokus des vorliegenden Beitrags liegen Unternehmen industriestarker Branchen mit überwiegend Business-to-Business (B2B)-Geschäftsbeziehungen (z. B. Maschinenbau oder Luft- und Raumfahrt).

Wird AM in der Fertigung eingesetzt, dann können damit Auswirkungen auf den gesamten Produktentstehungs- und -nutzungsprozess verbunden sein (vgl. Bild 1 in Abschnitt 3.3). Er setzt sich aus den folgenden Phasen zusammen: Produktplanung, Produktentwicklung, Fertigung (mit AM), Absatz / Vertrieb, Produktnutzung / Service und Recycling (angelehnt an Lasi et al. (2014), S. 5 und VDI 2221 (1993), S. 8). Das Recycling wird aus Gründen der Vollständigkeit angeführt, liegt aber nicht im Fokus des Beitrags. Inwiefern sich die Nutzung von AM in der Fertigungsphase auf die anderen Phasen auswirkt und welche Rolle die Produktentwicklung dabei einnimmt, wird nachfolgend aufgezeigt:

Innerhalb der **Produktplanung** werden u. a. Anforderungen in Form eines Lastenhefts erfasst (Lindemann 2016; VDI 2220 1980; Westkämper 2006). Diese Anforderungen sind Grundlage für die Aktivitäten in den darauffolgenden Phasen des Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses. Mit dem Einsatz von AM in der Fertigung wird das Potenzial gesehen, Zeit- und Kostenaufwände für die Realisierung spät geänderter Produkthanforderungen zu reduzieren (Schmidt 2016). Dies lässt sich bspw. darauf zurückführen, dass geänderte Anforderungen zwar ggf. die Anpassung der digitalen Konstruktion erfordern, die ressourcenintensive Neugestaltung von formgebenden Werkzeugen kann jedoch umgangen werden.

Im Rahmen der **Produktentwicklung** können vor allem bei der Konstruktion die vielfach kommunizierten Potenziale von AM in die Realität umgesetzt werden. Dazu zählen u. a. Topologieoptimierungen, die Realisierung von bionischen und funktionsfokussierten Strukturen, die Berücksichtigung von Wabenstrukturen für Leichtbauzwecke, Funktionsintegration etc. (Kumke et al. 2016). Die AM-Technologie wird hier als Enabler (Befähiger) gesehen.

Innerhalb der **Fertigung** wird ein Bauteil für den sog. Druckjob vorbereitet und anschließend mit einer AM-Maschine hergestellt. In Bezug auf die Fertigung hat die Produktentwicklung verfahrens- und materialspezifische Eigenschaften zu berücksichtigen (z. B. Baurichtung). Außerdem determiniert sie für die Nachbereitungsphase u. a. den aufzubringenden Aufwand zum Entfernen etwaiger Stützstrukturen (z. B. von Überhängen am Bauteil).

In der Phase **Absatz / Vertrieb** ist in Zusammenhang mit AM die dezentrale und bedarfsorientierte Bereitstellung von AM-Bauteilen hervorzuheben (Spalt und Bauernhansl 2016). Mit der Dezentralisierung kann der Bedarf steigen, fertigungsspezifische Parameter direkt im Computer-aided-Design (CAD)-Modell bei der Produktentwicklung festzulegen.

In der **Produktnutzungs- und Servicephase** existieren Ansätze, bei denen Bauteile mithilfe von AM-Verfahren repariert werden (Leino et al. 2016). Die Produktentwicklung trägt dazu bei, dass das additiv reparierte Bauteil denselben Qualitätsanforderungen entspricht wie das Originalteil. Werden Ersatzteile mit AM gefertigt (keine Reparatur), dann kann das für die Produktentwicklung eine vollständig neue Konstruktion inkl. aller Qualitätssicherungsmaßnahmen bedeuten. Denn oftmals sind die für konventionelle Verfahren konstruierten Bauteile nicht ohne Anpassungen wirtschaftlich mit AM-Verfahren herstellbar.

3.2 Ansätze zur Unterstützung von Unternehmen beim Einsatz von Additive Manufacturing

Basierend auf der durchgeführten Literaturrecherche lassen sich verschiedene Ansätze ausmachen, die Unternehmen beim Einsatz von AM unterstützen können. Die Ansätze aus den relevanten Ergebnissen wurden hinsichtlich folgender, für die Zielerreichung bedeutsamer Kriterien untersucht: Abstraktionsgrad, AM-Implementierungsstand (initial, fortführend), Abdeckungsgrad des Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses, strategisches Alignment (insb. hinsichtlich Geschäftsmodelle), Handlungsbereiche (prozessual, personell, organisatorisch, technologisch).

- Das Framework von Mellor et al. (2014) identifiziert am Use Case eines AM-Auftragsfertigers auf abstrakter Ebene Faktoren und deren Zusammenhänge, die v. a. bei der initialen Implementierung von AM zu berücksichtigen sind. Das strategische Alignment wird in der Komponente „AM-Strategie“ sichergestellt. Hinsichtlich des Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses liegt der Fokus im Aufbau und im Betreiben einer unternehmensinternen AM-basierten Fertigung. Es werden primär prozessuale, organisatorische und (fertigungs-) technologische Handlungsbereiche berücksichtigt.
- Im Ansatz von Lutter-Günther et al. (2015) wird das strategische Alignment in den Vordergrund gestellt. Auf Grundlage eines Implementierungsprozessmodells, ausgehend von AM-basierten Geschäftsmodellen, unterstützt der Ansatz bei der Entwicklung unternehmensspezifischer Einsatzszenarien. Der Ansatz wird im Abstraktionsgrad heruntergebrochen und fokussiert den initialen AM-Einsatz. Es liegt ein hoher Abdeckungsgrad des Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses vor, wobei von einer rein unternehmensinternen Fertigung ausgegangen wird. Das Modell widmet sich prozessualen, personellen, organisatorischen und (fertigungs-) technologischen Handlungsbereichen.
- Rylands et al. (2016) stellen als Ergebnis ihres Beitrags einen abstrakten AM-Implementierungsprozess für die initiale Phase sowie die Auswirkungen auf Geschäftsebene dar. Der AM-Einsatz ist eher technologisch als betriebswirtschaftlich getrieben. Hinsichtlich des Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses liegt der Schwerpunkt auf fertigungsnahen Phasen. So werden insbesondere (fertigungs-) technologische, aber auch prozessuale und organisatorische Handlungsbereiche thematisiert.
- Speziell der kundenindividuellen Massenproduktion widmet sich das Framework von Deradjat und Minshall (2015). Hier werden auf abstrakter Ebene vor allem technologische, prozessuale und organisatorische Faktoren herausgestellt, die bei der Implementierung von AM für die kundenindividuelle Massenproduktion von Bedeutung sind. Das Framework berücksichtigt das strategische Alignment und ist vornehmlich für den initialen AM-Einsatz konstruiert. Im Vordergrund stehen entwicklungs- und fertigungsnahen Phasen des Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses.
- Des Weiteren existiert ein detailliertes Framework von Yeong und Chua (2013), das das Qualitätsmanagement im medizinischen Umfeld thematisiert. Insgesamt handelt es sich um ein Framework, das nah an der Fertigungsprozessphase entwickelt wurde. Das strategische Alignment rückt dabei in den Hintergrund. Der Ansatz berücksichtigt vor allem prozessuale, organisatorische und technologische Handlungsbereiche und eignet sich beim kontinuierlichen, fortführenden AM-Einsatz.
- Auch in eigenen Vorarbeiten wurden generische Implementierungsansätze erarbeitet (Hiller et al. 2016). Sie basieren darauf, welche Prozessphasen von der Konstruktion bis zur Montage unternehmensintern oder unternehmensextern realisiert werden. Daher werden überwiegend prozessuale und organisatorische Handlungsbereiche adressiert. Die Ansätze können sowohl für den initialen als auch fortführenden AM-Einsatz herangezogen werden. Das strategische Alignment ist sichergestellt.
- Neben den genannten Ansätzen gibt es weitere Forschungsbeiträge, die sich im Hinblick auf den Einsatz von AM spezifischen Fragestellungen oder Anwendungskontexten widmen (z. B. Implementierung von AM als Cloud-Service (Modekurthy et al. 2015) und Integration von AM in Produktionsnetzwerke (Spalt und Bauernhansl 2016)).

Die angestrebte Zielerreichung erfordert einen Ansatz, bei dem der Abstraktionsgrad heruntergebrochen werden kann. Hierbei können insbesondere prozessuale, personelle, organisatorische und technologische Aspekte unterschieden werden. Der Lösungsansatz sollte möglichst unabhängig von thematischen Spezialisierungen sein und den Produktentstehungs- und -nutzungsprozess umfassend abdecken. Darüber hinaus soll er sowohl in den frühen Implementierungsphasen als auch später zur kontinuierlichen AM-Einsatzplanung Hilfestellung geben. Ein strategisches Alignment ist zu jedem Implementierungsstand sicherzustellen. Die aufgezeigten Ansätze kommen diesen spezifischen Anforderungen in Teilen nach und können als adäquate Ergänzungen zu dem nachfolgend instanziierten Ansatz gesehen werden.

3.3 Capability-basierter Lösungsansatz und Bezugsrahmen

Aufgrund der sowohl operational-technologischen als auch unternehmensstrategischen Bedeutung von AM wird im Folgenden ein Ansatz fokussiert, der beide dieser Perspektiven berücksichtigt. Es handelt sich um den sog. Capability-Ansatz, der sich maßgeblich auf die in der Betriebswirtschaft verankerte Resource-based View zurückführen lässt (Reinhard 2013). Im Forschungsfeld der Wirtschaftsinformatik dient er u. a. zur Sicherstellung einer abgestimmten strategischen Ausrichtung (Alignment) von Business und IT (Informationstechnologie) (Hanschke 2016).

Eine Capability beschreibt, „was“ ein Unternehmen macht bzw. über welche Fähigkeiten es derzeit verfügt oder welche es zukünftig benötigt. Die Frage nach dem „wie“ wird hierbei in den Hintergrund gestellt. Eine Capability verknüpft bestimmte Ressourcen, um mit deren spezifischer Bündelung ein definiertes Ziel zu erreichen (Hanschke 2016). In Hinblick auf die eingangs genannte Zielsetzung liegt der Fokus auf prozessualen, personellen, organisatorischen und technologischen Ressourcen. Die rudimentäre Fähigkeit „Bauteil konstruieren“ setzt bspw. voraus, dass in einem definierten Entwicklungsprozess (prozessuale Ressource) ein Konstrukteur (personelle Ressource) mithilfe von Konstruktionsprinzipien (organisatorische Ressource) und einer CAD-Software (technologische Ressource) Bauteile konstruiert. Daraus lassen sich konkrete Anforderungen (z. B. an die CAD-Software) definieren.

Aufgrund der strategischen Bedeutsamkeit der Produktentwicklung hinsichtlich AM-beeinflusster Geschäftsziele und Geschäftsmodelle liegt der Fokus zunächst auf Business Capabilities (Wißotzki 2015), die in Teil-Capabilities untergliedert werden. Basierend darauf können Handlungsbedarfe für die Produktentwicklung hinsichtlich der vier Ressourcenebenen abgeleitet werden.

Die bisher aufgezeigten Sachverhalte werden als hellgrau hinterlegter Betrachtungsbereich des in Bild 1 dargestellten Bezugsrahmens veranschaulicht. Zur Erreichung der eingangs genannten Zielsetzung wird im Folgenden der dunkelgrau hinterlegte Gestaltungsbereich erarbeitet. Er umfasst die Konzipierung von Business Capabilities in der Produktentwicklung und die Ableitung von Handlungsbedarfen.

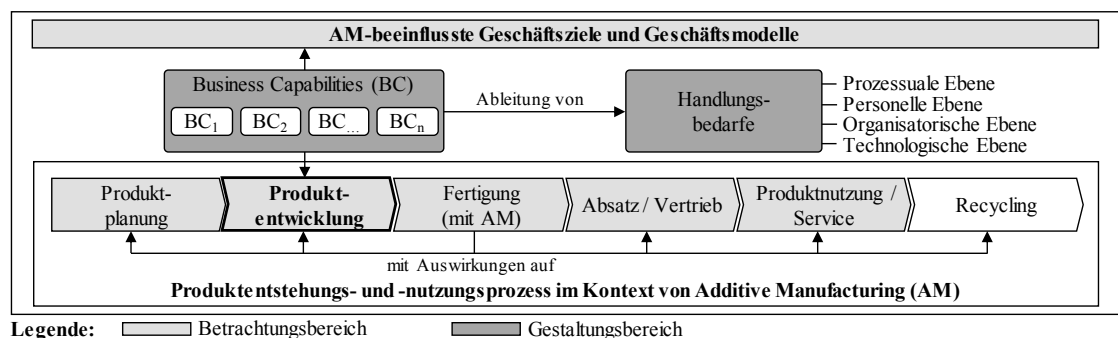


Bild 1: Bezugsrahmen (in Anlehnung an Lasi et al. (2014) und VDI 2221 (1993))

4 Business Capabilities in der AM-basierten Produktentwicklung

4.1 Einflussgrößen

Anhaltspunkte zur Ausgestaltung der Business Capabilities in Abschnitt 4.2 sind die in der qualitativen Inhaltsanalyse erarbeiteten Kategorien. Die Kategorien spiegeln Einflussgrößen beim Einsatz von AM wider und sind bei der Capability-Formulierung explizit oder implizit zu berücksichtigen:

- **Einsatz und Nutzen:** Die Capabilities sind vor dem Hintergrund eines festgelegten Anwendungsgebiets für den geplanten AM-Einsatz zu definieren (z. B. Serienfertigung). Eng damit hängt die Realisierung des angestrebten Kundennutzens und deren Anforderungen zusammen. Ausschlaggebend für den Einsatz ist die Wirtschaftlichkeit, sodass diese sich ebenso in den Capabilities wiederfinden sollte.
- **Strategische Aspekte:** Für Industrieunternehmen kann der Einsatz von AM wettbewerbsrelevant sein und gegenüber anderen Marktteilnehmern ein Alleinstellungsmerkmal darstellen. Die Capabilities sollten dazu beitragen, dass Geschäftsmodelle und die strategische Herangehensweise (z. B. unternehmensinterne oder -externe AM-Fertigung) sowie die unternehmensspezifische Positionierung am Markt diesbezüglich realisiert werden können.

- **Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen:** Die Technologieentwicklung ist derzeit durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet. Nach Meinung der befragten Experten sind AM-Implementierungsentscheidungen vor allem unter Berücksichtigung aktueller und zukünftiger Entwicklungstrends zu treffen, sodass diese Technologieverfolgung bei der Capability-Formulierung einfließen sollte.
- **Prozesse:** Der wirksame Einsatz von AM hängt maßgeblich von dessen erfolgreichen Integration in bestehende und neu zu definierende, betriebswirtschaftliche und technologische Prozesse ab. Die hierzu erforderliche Prozessgestaltung ist ebenfalls im Kontext der Capabilities zu thematisieren.
- **Qualität:** Des Weiteren sind qualitätsbezogene Aspekte bei der Capability-Formulierung zu berücksichtigen. Denn aus Sicht der Praxis ist die Sicherstellung der geforderten Produktqualität (z. B. Bauteilsteifigkeit) und Prozessqualität (z. B. Reproduzierbarkeit) entscheidende Faktoren beim erfolgreichen Einsatz von AM.
- **Netzwerke und Geschäftspartner:** In der Praxis hat sich gezeigt, dass der strategischen Nutzung von unternehmensinternen und -externen Netzwerken sowie von Geschäftspartnern im Kontext von AM eine hohe Bedeutung zukommt (z. B. für Know-how-Aufbau). Es besteht daher der Bedarf, diesen Einflussfaktor auch auf Capability-Ebene zu beachten.
- **IT-Unterstützung:** Aufgrund des hohen Digitalisierungsgrads bei AM-bezogenen Prozessen sollte sich die IT-Unterstützung als weiterer Aspekt in den Capabilities wiederfinden. Sowohl unternehmensintern als auch -extern ist ein adäquater Daten- und Informationsaustausch inkl. erforderlicher Schnittstellen zu gewährleisten (z. B. sicherer Datenaustausch).
- **Organisation:** Aus den Interviews hat sich gezeigt, dass Commitment und Awareness sowie die klare Zuteilung von AM-Verantwortlichkeiten entscheidend für den zielführenden Einsatz dieser Technologie sind. Bei der Formulierung von Capabilities sollten darüber hinaus eine aufgabenfokussierte Organisationsgestaltung berücksichtigt werden.
- **Arbeitsmittel und Ausstattung:** Bei der Umsetzung AM-bezogener Prozesse ist aus Sicht der Befragten entscheidend, dass Arbeitsmittel (z. B. Materialkennwerte) und relevante Ausstattungen (z. B. Anlage zur Materialaufbereitung) aufgabenträgergerecht (z. B. Konstruktionsrichtlinien in einer bestimmten Sprache) zur Verfügung stehen. Demzufolge kommt auch dieser Einflussgröße bei der Formulierung der Capabilities eine Bedeutung zu.
- **Wissen:** Capabilities sollten sich darüber hinaus dem Wissensmanagement widmen. Denn für den nachhaltigen Technologieeinsatz ist AM-bezogenes Wissen systematisch aufzubauen, sodass es zu einem späteren Zeitpunkt bedarfsorientiert in den Prozessen zur Anwendung kommen kann.

Die erhobenen Einflussgrößen betreffen nicht nur die Produktentwicklung, sondern sind auch für andere geschäftliche Funktionsbereiche bedeutsam. Zur Sicherstellung spezifizierter Qualitätsanforderungen bspw. hat sowohl die Fertigung einen Beitrag zu leisten (z. B. durch adäquate Einstellungen von Fertigungsprozessparametern) als auch das Controlling (z. B. durch die Entwicklung und Anwendung von qualitätsrelevanten Leistungskennzahlen). Die einzelnen Einflussgrößen können in den geschäftlichen Funktionsbereichen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf dem Funktionsbereich Produktentwicklung.

4.2 Business Capabilities und Ableitung von Handlungsbedarfen

Da Business Capabilities auf die Unterstützung von Geschäftszielen ausgerichtet sind, wird zunächst eine praxisnahe Zielsetzung den Business Capabilities vorangestellt. Ein Treiber zum Einsatz von AM besteht in der wirtschaftlichen Herstellung von individuellen Bauteilen. Im hier fokussierten B2B-Bereich lässt sich dies u. a. im Sondermaschinenbau finden (z. B. kundenindividuelle Komponente einer komplexen Fertigungsanlage). Ein in der Branche mögliches Geschäftsziel lautet wie folgt: „Erhöhung der Kundenzufriedenheit und Kundenbindung durch Anbieten individueller und qualitativ hochwertiger Produkte für spezifische Kundenanforderungen (B2B)“. Die individuelle AM-Komponente kann bspw. ein zur Anlage gehörender Greifer sein (Breuninger et al. 2013, S. 143). Die im Folgenden entwickelten Capabilities sind produktunabhängig, sodass eine breite Anwendung sichergestellt ist. Die Durchnummerierung und Anordnung legt dabei keine Priorität fest. Im vorliegenden Fall wird außerdem die Annahme getroffen, dass die AM-Fertigung und die Produktentwicklung unternehmensintern erfolgen. Auf Basis der zuvor erhobenen Einflussgrößen (vgl. Abschnitt 4.1) wurden die Business Capabilities in der AM-basierten Produktentwicklung konzipiert. Diese sind in Bild 2 visualisiert. Capabilities werden

oftmals nach geschäftlichen Funktionen strukturiert (Hanschke 2016). In Anlehnung daran sind die Business Capabilities der Produktentwicklung dem Funktionsbereich „Forschung und Entwicklung“ zugeordnet. Die Business Capabilities (z. B. AM.1 Enger Kundenkontakt) wurden außerdem in Teil-Capabilities (z. B. AM.1.3 Kunde in Entwicklungsprozess integrieren) aufgegliedert.

Einige der entwickelten Business Capabilities und Teil-Capabilities haben auch über den AM-Kontext hinaus Gültigkeit. Der AM-Bezug zeigt sich in diesen Fällen zumeist darin, dass die Fertigungstechnologie einen Enabler für diese Business Capability oder Teil-Capability darstellt oder sie Voraussetzung für andere AM-spezifische Business Capabilities oder Teil-Capabilities ist.

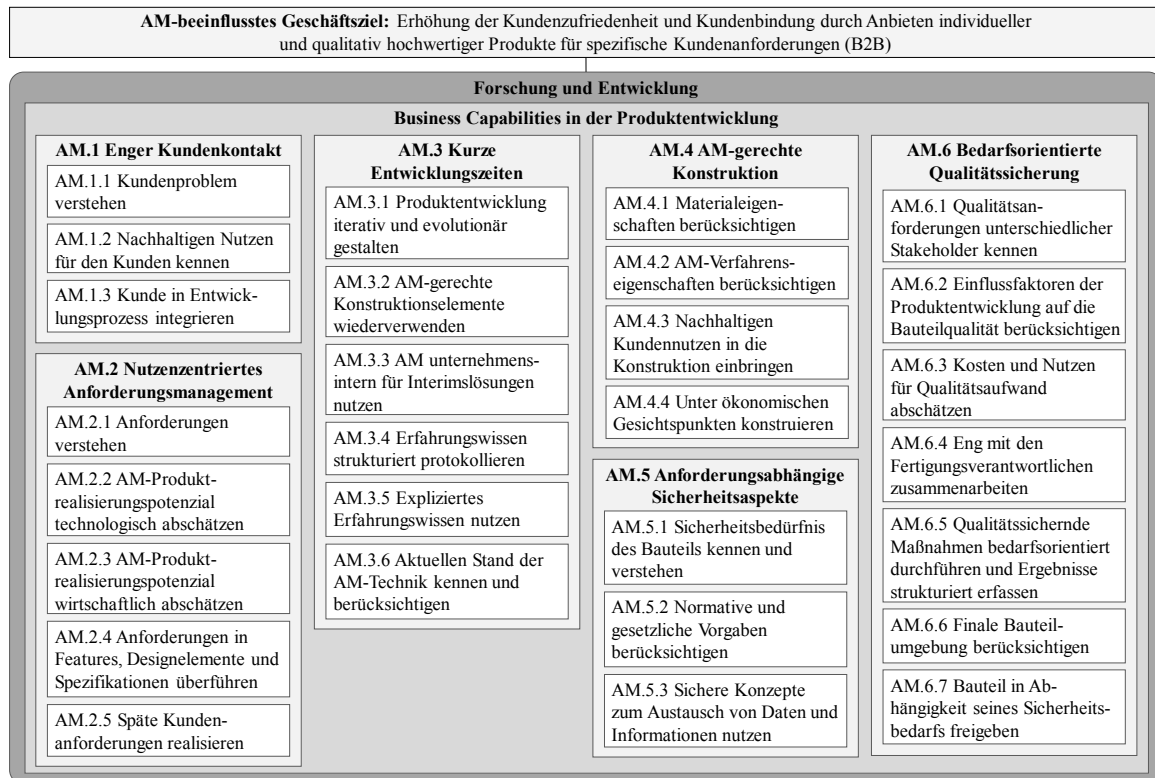


Bild 2: Business Capabilities in der AM-basierten Produktentwicklung

Die konzipierten Business Capabilities sind Ausgangspunkt, um nachfolgend auf prozessualer, personeller, organisatorischer und technologischer Ebene Handlungsbedarfe abzuleiten. Dies entspricht der eingangs formulierten Zielsetzung und zeigt die Umsetzung des Gestaltungsbereichs im Bezugsrahmen aus Bild 1 (vgl. Abschnitt 3.3). Die Handlungsbedarfe fokussieren hier primär den initialen AM-Einsatz.

- Prozessuale Ebene:** Auf prozessualer Ebene sind aus Sicht der Produktentwicklung zwei Schnittstellen von besonderer Bedeutung: die Kundenschnittstelle und die Schnittstelle zur Fertigung. Die prozessuale Kundenschnittstelle ist in Abhängigkeit des Integrationsgrads des Kunden (z. B. Customer Co-Design, Co-Creation) zu definieren. Ein hohes Problem- und Anforderungsverständnis erfordert eine direkte und intensive Kommunikation mit dem Kunden. So kann es bspw. hilfreich sein, die Aufgabenstellung gemeinsam mit dem Kunden zu analysieren, da die AM-Potenziale und entsprechenden Implikationen oftmals mit komplexen Bauteilstrukturen oder zusätzlichem Nutzen einhergehen. Festgelegte iterative Rücksprachen mit dem Kunden begünstigen, dass Anforderungen richtig interpretiert werden und Anpassungen adäquat berücksichtigt werden. Demzufolge erfordert der Einsatz von AM die gezielte Kundenintegration im Rahmen der Produktentwicklung. Bezüglich der Schnittstelle zur Fertigung sind hierarchiearme Kommunikationswege förderlich, um Prozesszeiten gering zu halten (z. B. für kurzfristige Rücksprachen). Zusätzlich empfiehlt es sich Interimsprozesse zu definieren, um die Flexibilität zu erhöhen.
- Personelle Ebene:** Auf personeller Ebene sind ein fundiertes AM-Technologiewissen sowie verfahrens- und materialspezifische Kenntnisse grundlegend. Zum einen sind Weiterbildungsmaßnahmen, Fortbildungen, interne und externe Schulungskonzepte hilfreich, um dieses Wissen aufzubauen. Zum

anderen wird vor allem von eigenen praktischen Erfahrungen mit der Technologie profitiert. Darüber hinaus sind ggf. auch Neueinstellungen zu überdenken (z. B. verfahrensneutrale Neueinsteiger).

Die Aufgaben in der AM-basierten Produktentwicklung erfordern meist ein hohes Komplexitätsverständnis für das Kundenproblem und die Anforderungen. Beispielsweise ist das gesamte Anlagensystem auf Kundenseite beim Lösungsansatz zu berücksichtigen und nicht nur isoliert das zu fertigende Bauteil. Mit diesem Verständnis können Potenziale ermittelt werden, inwiefern Funktionsintegrationen über das eigentliche Bauteil hinweg realisiert werden können.

Neben dem technologischen Know-how ist auch ein gewisses betriebswirtschaftliches Verständnis notwendig. Aufgrund zahlreicher Schnittstellen zwischen der Produktentwicklung und den anderen Phasen im Produktentstehungs- und -nutzungsprozess (vgl. Abschnitt 3.1) sollten Kostentreiber und Einsparpotenziale in der AM-basierten Produktentwicklung bekannt sein und in Lösungsansätzen mitbetrachtet werden.

- **Organisatorische Ebene:** Vonseiten der Organisationsgestaltung sind Ansätze zu etablieren, um den Know-how-Aufbau auf personeller Ebene zu ermöglichen und zu fördern (z. B. Integration von Fortbildungsmaßnahmen in die Zielvereinbarungen von Mitarbeitern in der Produktentwicklung). Gerade in den frühen Implementierungsphasen können außerdem Kooperationen mit Forschungs- und Transfereinrichtungen sowie die Mitarbeit in Verbänden oder Industrievereinen vorteilhaft sein (z. B. bei Normierungen).

Der Wissensaustausch profitiert außerdem von institutionalisierten Rückkopplungsschleifen. Dies kann bspw. über unternehmensinterne Gremienarbeit, Teamgestaltung oder Besprechungsorganisation erfolgen. Unternehmensextern können je nach Kundenbeziehung Ansätze des Key-Account-Managements in der Produktentwicklung in Betracht gezogen werden.

Die Produktentwicklung ist ein kreativer Prozess (insb. durch neue Lösungsansätze mit AM). Es sind daher Rahmenbedingungen zu ermöglichen, durch die Kreativität gefördert wird. Dazu zählen u. a. räumliche Umgebungsbedingungen oder auch finanzielle Freiräume.

Auf organisatorischer Ebene ist außerdem festzulegen, inwieweit Dokumentationspflicht besteht (z. B. von Spezifikationen oder Konstruktionsrichtlinien), Standards und Normen zu berücksichtigen sind, Materialkennwerte und Qualitätsdaten nachweisbar abgelegt werden müssen, Kostentreiber erfasst werden etc. Hierzu sind zweckmäßige Regelungsstrukturen organisationsseitig aufzusetzen.

- **Technologische Ebene:** Die Aufgaben in der Produktentwicklung erfordern u. a. bedarfsgerechte Softwaresysteme zur Konstruktion, zur Simulationen, zur Anforderungserhebung, zur Qualitätssicherstellung und -datenerfassung. In Hinblick auf die Zusammenarbeit mit Kunden oder anderen Kooperationspartnern können bspw. auch Austauschplattformen und neue Zugriffsrollenkonzepte notwendig sein. Es ist zu prüfen, inwiefern AM-basierte Anforderungen, auch hinsichtlich Schnittstellen, in bestehenden Softwaresystemen abgedeckt sind und an welchen Stellen Anpassungsbedarf besteht (z. B. Auflösung von CAD-Dateien).

Darüber hinaus werden auf technologischer Ebene je nach Sicherheitsklasse und Wirtschaftlichkeit sowohl in den frühen Phasen der Produktentwicklung als auch bei der Abnahme Maschinen zur Qualitätssicherung benötigt (z. B. Prüfstände).

5 Diskussion und Ausblick

Die entwickelten Capabilities sowie die abgeleiteten Handlungsbedarfe zeigen auf, was innerhalb der Produktentwicklung beim Einsatz von AM in Hinblick auf das spezifizierte Geschäftsziel wesentlich ist. Neben dem exemplarisch aufgezeigten Geschäftsziel sind zahlreiche weitere denkbar. Auf der hier erarbeiteten Basis kann die konkrete Realisierung der Business Capabilities (d. h. die Frage nach dem „wie“) unternehmensindividuell ausgestaltet werden (z. B. welche konkreten CAD-Systeme in unterschiedlichen Unternehmen genutzt werden oder welche Mitarbeiter eingesetzt werden sollen). Capabilities spiegeln die Bündelung von Unternehmensressourcen wider und jedes Unternehmen verfügt über unterschiedliche Ausprägungen dieser Ressourcen. Die unternehmensindividuelle Realisierung der Capabilities bietet z. B. im Kontext einer fortführenden Case Study Research einen geeigneten Rahmen, um die in diesem Beitrag noch ausstehende Evaluation durchzuführen.

Des Weiteren stehen Industrieunternehmen nicht nur in Bezug auf die Produktentwicklung vor prozessualen, personellen, organisatorischen und technologischen Änderungen. Auch andere geschäftliche

Funktionsbereiche können von dem Wandel durch AM betroffen sein. Für diese Bereiche sind in fort-führenden Forschungsbeiträgen ebenfalls Business Capabilities zu konzipieren, sodass eine funktions-übergreifende Capability-Übersicht entsteht (z. B. für den Einkauf, die Fertigung oder den Vertrieb). Dem Grundgedanken des Capability-Ansatzes nach sollen Unternehmen durch Capabilities bei Pla-nungsaktivitäten unterstützt werden. Vorhandene Ist-Capabilities sind mit zukünftig benötigten Soll-Capabilities abzugleichen. Die hierbei identifizierten Lücken können mithilfe zielgerichteter Projekte geschlossen werden. Die Capability-basierte Planung ist i. d. R. ein rollierender Prozess. Unternehmen finden mithilfe des Ansatzes daher auch über die initiale AM-Implementierung hinweg Unterstützung. Industrieunternehmen stehen jedoch vor der Herausforderung, wie sie diese Transformationsaufgabe in die Realität umsetzen. Voraussetzung ist die Kenntnis über relevante Entscheidungskriterien zur priori-sierten Umsetzung von Soll-Capabilities. Diese können bspw. nach ihrer strategischen Bedeutung, ih-rem Risiko oder ihrem aktuellen Realisierungsgrad umgesetzt werden. Außerdem sind Abhängigkeiten zwischen einzelnen Capabilities transparent zu machen. Forschungsbedarf besteht letztlich darin, geeig-nete Konzepte für die Capability-Transformation zu entwickeln.

Literatur

- Beyer 2014 BEYER, Christiane: *Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufac-turing*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136 (2014), Nr. 6, S. 0647011-0647018.
- Breuninger et al. 2013 BREUNINGER, Jannis ; BECKER, Ralf ; WOLF, Andreas ; ROMMEL, Steve ; VERL, Alexander: *Generative Fertigung mit Kunststoffen*. Berlin und Heidelberg : Springer, 2013.
- Brocke et al. 2009 VOM BROCKE, Jan ; SIMONS, Alexander ; NIEHAVES , Björn ; REIMER, Kai ; PLATT-FAUT, Ralf ; CLEVEN, Anne: *Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process*. In: *Proc. of the European Conf. on Information Systems* (2009), S. 2206-2217.
- Burns 1993 BURNS, Marshall: *Automated fabrication improving productivity in manufacturing*. Englewood Cliffs : PTR Prenrice Hall, 1993.
- Deradjat und Minshall 2015 DERADJAT, Dominik ; MINSHALL, Tim: *Implementation of Additive Manufacturing Technologies for Mass Customisation*. In: *Proc. of the Int. Association for Manage-ment of Technology* (2015), S. 2079-2094.
- Hanschke 2016 HANSCHKE, Inge: *Enterprise Architecture Management*. 2. Aufl. München : Hanser, 2016.
- Hiller et al. 2016 HILLER, Simon ; MOISA, Michelle ; MORAR, Dominik ; KEMPER, Hans-Georg ; LASI, Heiner: *Implementation Approaches for Additive Manufacturing Enabled Value Chains - An Exploration*. In: *Proc. of the Int. Conf. on Additive Technologies* (2016), S. 396-404.
- Kuckartz 2014 KUCKARTZ, Udo: *Qualitative Inhaltsanalyse - Methoden, Praxis, Computerunter-stützung*. Weinheim und Basel : Beltz Juventa, 2014.
- Kumke et al. 2016 KUMKE, Martin ; WATSCHKE, Hagen ; VIETOR, Thomas: *A new methodological framework for design for additive manufacturing*. In: *Virtual and Physical Prototy-ping* 11 (2016), Nr. 1, S. 3-19.
- Lasi et al. 2014 LASI, Heiner ; MORAR, Dominik ; KEMPER, Hans-Georg: *Additive Manufacturing - Herausforderungen für die gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik*. In: *Ta-gungsband zur Multikonferenz Wirtschaftsinformatik* (2014), S. 417-428.

- Leino et al. 2016 LEINO, Maija ; PEKKARINEN, Joonas ; SOUKKA, Risto: *The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing - enabling circular economy*. In: *Physics Procedia* 83 (2016), S. 752-760.
- Lindemann 2016 LINDEMANN, Udo: *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2016.
- Lutter-Günther et al. 2015 LUTTER-GÜNTHER, Max ; SEIDEL, Christian ; KAMPS, Tobias ; REINHART, Gunther: *Implementation of Additive Manufacturing Business Models*. In: *Applied Mechanics and Materials* 794 (2015), S. 547-554.
- Mellor et al. 2014 MELLOR, Stephen ; HAO, Liang ; ZHANG, David: *Additive manufacturing: A framework for implementation*. In: *Int. Journal of Production Economics* 149 (2014), S. 194-201.
- Modekurthy et al. 2015 MODEKURTHY, Venkata P. ; LIU, Xiaoqing F. ; FLETCHER, Kenneth K. ; LEU, Ming C.: *Design and Implementation of a Broker for Cloud Additive Manufacturing Services*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137 (2015), Nr. 4, S. 040904-040901-040904-040910.
- Moisa und Morar 2015 MOISA, Michelle ; MORAR, Dominik: *Additive Manufacturing - Enabler für agile Wertschöpfungsprozesse*. Stuttgart : Steinbeis-Edition, 2015.
- Österle et al. 2010 ÖSTERLE, Hubert ; BECKER, Jörg ; FRANK, Ulrich ; HESS, Thomas ; KARAGIANNIS, Dimitris ; KRUMHOLTZ, Helmut ; LOOS, Peter ; MERTENS, Peter ; OBERWEIS, Andreas ; SINZ, Elmar J.: *Memorandum zur gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik*. In: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 62 (2010), Nr. 6, S. 664-672.
- Reinhard 2013 REINHARD, Boris: *Business Capability Management*. Zürich, 2013.
- Rylands et al. 2016 RYLANDS, Brogan ; BÖHME, Tillmann ; GORKIN, Robert ; FAN, Joshua ; BIRCHNELL, Thomas: *The adoption process and impact of additive manufacturing on manufacturing systems*. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 27 (2016), Nr. 7, S. 969-989.
- Schmidt 2016 SCHMIDT, Tobias: *Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile*. Berlin und Heidelberg : Springer Vieweg, 2016.
- Spalt und Bauernhansl 2016 SPALT, Patrik ; BAUERNHANSL, Thomas: *A Framework for Integration of Additive Manufacturing Technologies in Production Networks*. In: *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 716-721.
- VDI 2220 1980 Richtlinie VDI 2220 Mai 1980. *Produktplanung - Ablauf, Begriffe und Organisation*. Düsseldorf : Beuth, 1980.
- VDI 2221 1993 Richtlinie VDI 2221 Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf : Beuth, 1993.
- VDI 3405 2014 Richtlinie VDI 3405 Dezember 2014. *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Düsseldorf : Beuth, 2014.
- Westkämper 2006 WESTKÄMPER, Engelbert: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin und Heidelberg : Springer, 2006.
- Westkämper 2013 WESTKÄMPER, Engelbert: *Struktureller Wandel durch Megatrends*. In: Westkämper, Engelbert ; Spath, Dieter ; Constantinescu, Carmen ; Lentjes, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin und Heidelberg : Springer, 2013, S. 7-9.
- Wißotzki 2015 WISSOTZKI, Matthias: *An Exploration of Capability Research*. In: *Proc. of the Int. Enterprise Distributed Object Computing Conf.* (2015). Adelaide : IEEE, S. 179-184.
- Yeong und Chua 2013 YEONG, Wai Y. ; CHUA, Chee Kai: *A quality management framework for implementing additive manufacturing of medical devices*. In: *Virtual and Physical Prototyping* 8 (2013), Nr. 3, S. 193-199.

Obsoleszenzmanagement unterstützt durch additive Fertigung – Von der Bauteilidentifikation bis zum fertigen Ersatzteil –

Maximilian Ley¹, Karsten Hilbert¹, Nils Buschhorn¹, Nicole Stephan¹

¹TU Kaiserslautern, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau, Kaiserslautern, Deutschland
stephan@mv.uni-kl.de

Abstract: Investitionsgüter, wie z. B. Nutz- und Schienenfahrzeuge sowie technische Anlagen, sind durch geringe Stückzahlen bei gleichzeitig langen Lebensdauern charakterisiert. Dies führt zu zahlreichen Herausforderungen im Obsoleszenzmanagement (OM). Hier bieten additive Fertigungsverfahren durch eine werkzeuglose, kurzfristige und bedarfsgerechte Herstellung von Bauteilen enorme Potentiale. Trotz der fertigungstechnischen Flexibilität additiver Verfahren sollte aus ökonomischen Gründen nicht jedes Bauteil additiv gefertigt werden. Um den Anwender bei der Auswahl potentiell geeigneter Bauteile zu unterstützen, wurde eine Bewertungsmethodik entwickelt und validiert. Mit dieser kann eine Aussage über die prinzipielle wirtschaftliche Eignung eines Bauteils für die additive Fertigung getroffen werden, was bereits früh im OM von Interesse ist. Des Weiteren werden die notwendigen Arbeitsschritte für die Bereitstellung von funktionsfähigen Ersatzteilen, unter Einsatz der additiven Fertigungstechnologie, aufgezeigt. Diese sind in Form einer entwickelten sowie ebenfalls validierten Prozesskette strukturiert, welche alternative Wege bei der Bauteilbereitstellung im OM beschreibt.

Keywords:

Additive Fertigung, Obsoleszenzmanagement, Ersatzteil, Identifikationsalgorithmus

1 Einleitung

Im Bereich der additiven Fertigung nehmen, wie bei vielen neuen Technologien der Fall, die Innovationsträger Luft- und Raumfahrt sowie der Rennsport eine Vorreiterrolle ein (Tomlin und Meyer 2011; Reiher und Koch 2016). Gründe für den Einsatz der additiven Fertigungstechnologie in diesen Branchen sind u.a. die Möglichkeit der werkzeuglosen endkonturnahen Fertigung sowie hierdurch die Realisierungsmöglichkeit komplexer lastgerechter Strukturen. Aber auch im Bereich der klassischen Investitionsgüter, bspw. der Nutz- und Schienenfahrzeugindustrie sowie dem Anlagenbau, bietet die additive Fertigung Potentiale. Diese Branchen sind neben dem vergleichsweise hohen Individualisierungsgrad, der niedrigen Technologie-Veränderungsrate sowie der geringen Stückzahlen, insbesondere durch relativ lange Nutzungsdauern charakterisiert (Hofmann et al. 2012). Im Rahmen des Obsoleszenzmanagements (OM) ergeben sich hierdurch zahlreiche Herausforderungen, wie z.B. das Vorhalten von Ersatzteilen und Werkzeugen zur Herstellung ebendieser über die gesamte Nutzungsdauer von bis zu 40 Jahren. Bauteilschäden können dabei weitreichende Auswirkungen (z.B. Ausfall eines Fahrzeuges, Stillstand von Industrieanlagen) mit teils erheblichen und langfristigen Folgen haben, wie z.B. Personen- und Umweltschäden sowie Imageverlust durch Defekt von Rettungs- und Sicherheitselementen oder Leckage von Industrieanlagen. Je nach Zielsetzung bzw. Situation ist deshalb eine individuelle Betrachtung der Einsatz eignung additiver Fertigungsverfahren notwendig. Daher gilt es zu untersuchen, wie durch einen bedarfsgerechten Einsatz auch in diesen Branchen additive Fertigungsverfahren, z.B. für die Ersatzteilversorgung (zur Vermeidung von Lagerhaltung und Stillstandkosten), wirtschaftlich genutzt sowie Wettbewerbsvorteile (schnellere Wiederherstellung der Einsatzbereitschaft) und neue Geschäftsmodelle (Nutzer/Betreiber kann zum Hersteller werden) geschaffen werden können. In der vorliegenden Veröffentlichung werden in diesem Kontext zwei zentrale Forschungsfragen bearbeitet: Zum einen wie eine systematische und automatisierte Beurteilung von Bauteilen bzgl. deren potentieller Eignung für die additive Fertigung (Identifikationsalgorithmus) vorgenommen werden kann. Zum anderen wie eine methodisch strukturierte Vorgehensweise (Prozesskette), welche die Übertragung einer konventionellen auf eine additive Fertigungsstrategie ermöglicht, aufgebaut sein kann.

2 Theoretische Grundlagen

Nachfolgende Ausführungen sollen einen groben Überblick bzgl. relevanter Aspekte geben, die der Entwicklung des Identifikationsalgorithmus und der Prozesskette als Basis dienen. Die Begrifflichkeiten hinsichtlich der additiven Fertigung orientieren sich an den Empfehlungen der VDI 3405 (2014). Ausführliche Informationen zur additiven Fertigungstechnologie finden sich bspw. in Gebhardt et al. (2016) und zum OM in VDI 2882 (2016).

Als ein wesentlicher Vorteil additiver Fertigungsverfahren gilt die quasi werkzeuglose und endkonturnahe Herstellung theoretisch beliebig komplexer Bauteile. In der Praxis liegen jedoch auch hier Restriktionen vor. Beispielsweise muss die Entfernbarkeit von unerwünschten Materialrückständen (z.B. Stützmaterial und Pulver) durch Zugänge gewährleistet werden. Unter anderem sind in VDI 3405 Blatt 3 (2015) spezielle Gestaltungsrichtlinien aufgezeigt, welche entsprechende Fertigungsrestriktionen berücksichtigen (z.B. minimal realisierbare Wandstärken) und die Bauteilgestaltung erleichtern sollen. Neben diesen technologischen Restriktionen existieren z.B. auch Einschränkungen bzgl. Bauteilgröße, Werkstoffspektrum, Oberflächengüte sowie Form- und Lagetoleranzen. Hinsichtlich des aktuellen Entwicklungsstandes der additiven Fertigungsverfahren ist es derzeit technisch meist noch nicht möglich, diese zur Herstellung von Funktionsbauteilen isoliert einzusetzen. Darüber hinaus ist es aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend, subtraktive oder formative Fertigungsverfahren generell zu substituieren und Bauteile ausschließlich additiv zu fertigen. Diesbezüglich gilt es geeignete Bauteile systematisch zu identifizieren.

Um solche und andere Bauteile schließlich additiv fertigen zu können, sind, aufgrund der deutlich abweichenden Fertigungscharakteristik im Vergleich zu konventionellen Verfahren, neue bzw. angepasste Vorgehensweisen notwendig. Während bei konventionellen Fertigungsverfahren die Werkzeugbereitstellung (z.B. Gussform, Schmiedegesenk, Fräser, Drehmeißel etc.) einen zentralen Aspekt darstellt und die Verfahrens- bzw. Werkzeugauswahl die realisierbare Geometrie maßgeblich beeinflusst, ist diese bei der additiven Fertigung nahezu beliebig. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied im Produktionsbereich dar, weshalb auch die Prozessketten deutlich voneinander abweichen (Feldhusen und Grote 2013).

Gemäß VDI 3405 (2014) gestaltet sich der Prozessablauf der additiven Fertigung in drei Stufen: Pre-, In- und Post-Prozess. Der Pre-Prozess umfasst alle erforderlichen Operationen vor der eigentlichen Fertigung in der Anlage, d.h. die Daten- und Anlagenvorbereitung. Im In-Prozess erfolgen der schichtweise Bauteilaufbau und das Entpacken/Entnehmen der (Roh-) Bauteile. Der Post-Prozess beinhaltet u.a. die Vorbereitung (z.B. Reinigung und Stützstrukturentfernung) der Bauteile für nachgelagerte Verfahren (Nachbearbeitungsschritte). Weiterführende Nachbearbeitungsschritte, z.B. die Verbesserung der Oberflächengüte, finden im Anschluss an den Post-Prozess statt und sind derzeit kein Bestandteil dieser dreiteiligen Prozesskette. (VDI 3405 2014)

Eine hierüber hinausgehende Beschreibung des Prozessablaufs findet sich u.a. in Berger et al. (2013), Klocke (2015) sowie Lachmayer et al. (2016). Ansätze für eine Anwendung bzw. Übertragung des Prozessablaufs, z.B. bzgl. der gezielten Bauteilentwicklung für die additive Fertigung oder der Substitution des bisherigen Fertigungsverfahrens (z.B. Ersatzteilthematik), werden u.a. in Emmelmann et al. (2011), Khajavi et al. (2014) sowie Bergmann et al. (2013) vorgestellt. Forschungsbedarf besteht jedoch bzgl. detaillierter Handlungsempfehlungen zu konkreten anwendungsfallbezogenen Entwicklungsaufgaben. Der in dieser Veröffentlichung vorgestellte Prozess verfolgt, im Vergleich zu den zuvor genannten, daher einen erweiterten, ganzheitlichen Ansatz zur additiven Ersatzteilbereitstellung inkl. weit vorgelagerter Arbeitsschritte (z.B. Bauteilidentifikation, Reverse Engineering etc.). Wesentliche Bestandteile des Prozesses sind dabei auch die frühzeitige Berücksichtigung der Nachbearbeitungsstrategie, d.h. bereits vor dem eigentlichen additiven Fertigungsprozess, sowie das Aufzeigen konkreter prozessbegleitender Qualitätssicherungsmaßnahmen.

3 Datenbank und Identifikationsalgorithmus

Um Anwender bei der technisch-wirtschaftlich basierten Auswahl geeigneter Bauteile (Einzelteile, Baugruppen etc.) für die additive Fertigung zu unterstützen, wurde eine Datenbank konzipiert, in welcher definierte Bauteilinformationen für die zu bewertenden Bauteile erfasst werden. Des Weiteren liegt der

Datenbank ein Algorithmus zu Grunde, der mit Hilfe spezieller Filterkriterien und auf Basis der Bauteilinformationen sowie einer zusätzlichen Technologiedatenbank in mehreren Stufen additiv sinnvoll zu fertigende Bauteile identifiziert. Die in die Datenbank eingepflegten Bauteilinformationen werden jeweils für spezielle Bauteilmerkmale erfasst und spiegeln charakteristische Eigenschaften der zu bewertenden Bauteile wieder (näheres hierzu in 3.1). In der Technologiedatenbank sind aktuelle additive Fertigungsverfahren sowie Anlagentypen und verfügbare Werkstoffe hinterlegt. Die Bauteilmerkmale, die Technologiedatenbank sowie die Filterkriterien sind jeweils dynamisch gestaltet, so dass je nach betrieblichen Gegebenheiten sowie technischem Fortschritt eine einfache und flexible Anpassung erfolgen kann. Mit dem Identifikationsalgorithmus können sowohl einzelne Bauteile als auch komplexe technische Systeme, wie z.B. ganze Fahrzeuge, hinsichtlich ihrer technisch-wirtschaftlichen Eignung automatisiert bewertet werden. In Bild 1 ist der Ablauf des Identifikationsalgorithmus schematisch dargestellt, wobei die einzelnen Schritte und Bestandteile in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden. Validiert wurde der Identifikationsalgorithmus an einem Beispiel aus der Fahrzeugtechnik.

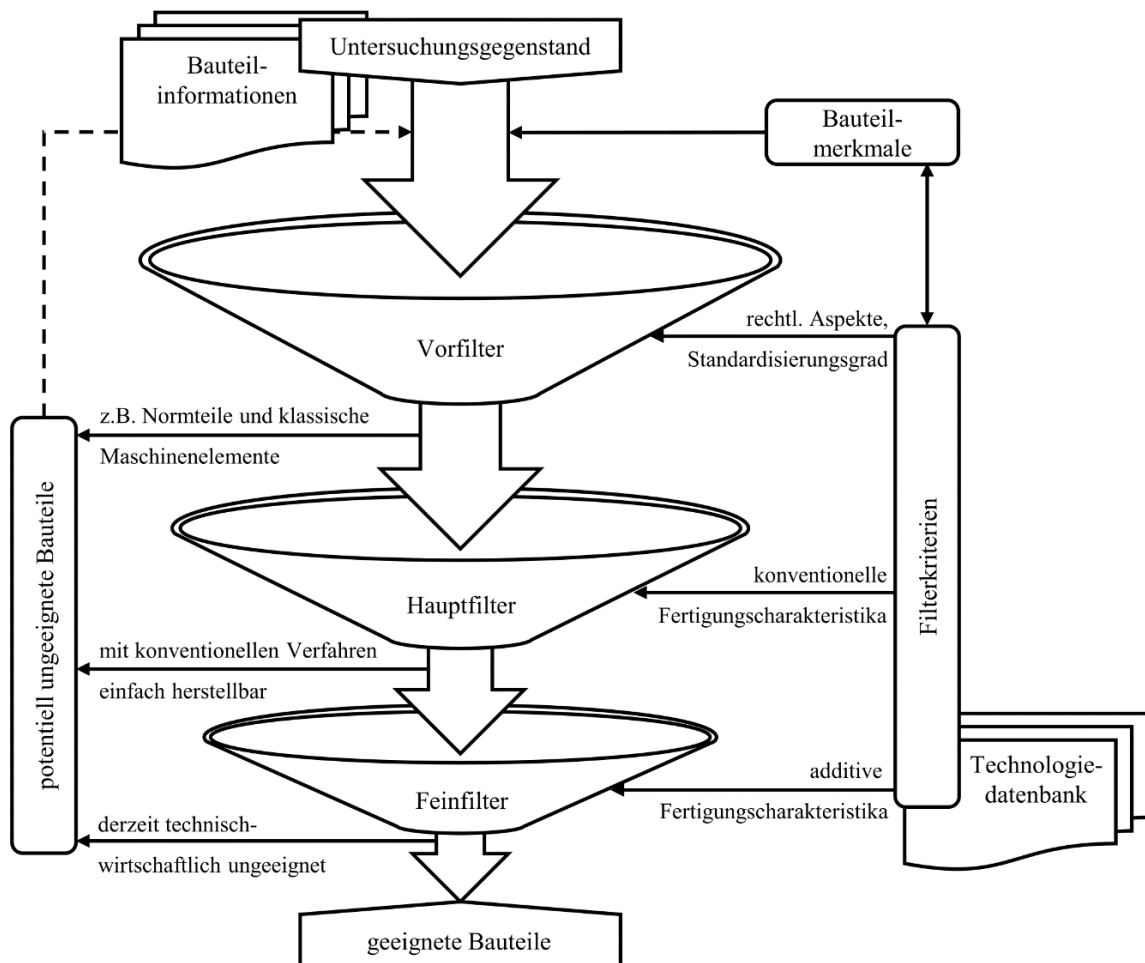


Bild 1: Ablauf des Identifikationsalgorithmus (gestrichelte Linie → optionaler Pfad)

3.1 Bauteilmerkmale

Von besonderer Bedeutung bei der Definition der Bauteilmerkmale ist deren Einfachheit und Eindeutigkeit, so dass eine reproduzierbare und personenunabhängige Erfassung der Informationen, auch bei geringer Bedienererfahrung, d.h. nur mit grundlegenden maschinenbaulichen Kenntnissen, sichergestellt ist. Darüber hinaus sollen möglichst wenige Merkmale verwendet werden, um den Datenerfassungsaufwand gering zu halten.

In der hier beschriebenen Entwicklungsstufe des Identifikationsalgorithmus wird zwischen zwei Arten von Bauteilmerkmalen differenziert: Verwaltungsmerkmale und technische Merkmale. Verwaltungsmerkmale, wie z.B. Bauteil-ID, SAP-Nummer dienen rein organisatorischen Gründen. Die technischen

Merkmale beschreiben charakteristische Bauteileigenschaften, anhand derer die technisch-wirtschaftliche Bewertung ermöglicht wird. Insgesamt werden vier Gruppen von technischen Merkmalen unterschieden. Die erste Gruppe bezieht sich auf die Fertigungstiefe des Systemherstellers und berücksichtigt rechtliche Aspekte am Produkt. Basierend auf diesem Merkmal werden alle Bauteile herausgefiltert, welche grundsätzlich nicht eigenständig gefertigt werden dürfen.

Die zweite Gruppe umfasst die Bauteilabmaße in Form der maximalen Abmessungen bzgl. der Raumrichtungen. Die Bauteilabmaße werden auf einen gedachten virtuellen Quader projiziert und ermöglichen eine Korrelation mit dem Bauraum verfügbarer additiver Fertigungsanlagen.

Die dritte Gruppe bildet die Werkstoffeigenschaften der Bauteile ab. Erfasst werden die Materialklasse (Metall, Kunststoff, Verbundwerkstoff etc.) und optional die Werkstoffnummer. Mit Hilfe der Materialklasse erfolgt eine Vorauswahl der in Frage kommenden additiven Fertigungsverfahren. Über die Werkstoffnummer kann optional geprüft werden, ob im Falle einer technisch-wirtschaftlichen Eignung der gleiche oder ein vergleichbarer Werkstoff für die additive Fertigung bereits vorliegt und direkt verwendet werden kann oder ob eine Werkstoffsubstitution erforderlich ist.

Die vierte Gruppe umfasst die wesentlichen Merkmale, welche zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung herangezogen werden und fokussiert auf fertigungstechnische Aspekte. Insgesamt werden hier vier spezifische Merkmale betrachtet. Die ersten beiden Merkmale beschreiben den Standardisierungsgrad des betrachteten Bauteils. Es wird erfasst, ob es sich bei dem Bauteil um ein Normteil und/oder um ein klassisches Maschinenelement handelt. Mit den Merkmalen Normteil und Maschinenelement wird zusammenfassend berücksichtigt, dass Bauteile mit hohem Standardisierungsgrad aus Beschaffungssicht im Regelfall unkritisch sind und eine additive Fertigung ohne Vorliegen von besonderen Gründen ineffizient ist.

Während es vergleichsweise einfach ist, aus den technischen Unterlagen Norm- und Maschinenelemente zu identifizieren und damit herauszufiltern, so gestaltet sich die technisch-wirtschaftliche Bewertung anderer Bauteile häufig schwierig. Um auch hier eine systematische Bewertung durchführen zu können, werden zwei weitere Merkmale, Halbzeug und Bauteilcharakteristik, verwendet. Insofern Bauteile vornehmlich einen Halbzeugcharakter aufweisen, d.h. dass sie annähernd in ihrer Rohteilform verwendet werden (geringe Nachbearbeitung), kann davon ausgegangen werden, dass sie aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll additiv zu fertigen sind. Bei allen anderen Bauteilen wird das primäre Fertigungsverfahren mittels des Merkmals Bauteilcharakteristik definiert. Dabei wird für Bauteile, welche einen mehrstufigen Fertigungsablauf unter Einsatz verschiedener Verfahren durchlaufen, das primäre Fertigungsverfahren herangezogen. Ist keine eindeutige Zuordnung möglich bzw. eine Vielzahl von Fertigungsverfahren erkennbar, wird ein gesonderter Marker gesetzt. Mit den beiden Merkmalen Bauteilcharakteristik und Halbzeug in Kombination sollen alle Bauteile für die additive Fertigung als ungeeignet ausgeschlossen werden, welche betriebsintern oder extern schnell und kostengünstig hergestellt bzw. in großen Mengen produziert werden können und dadurch im Regelfall problemlos zu beschaffen sind.

3.2 Filterkriterien und Filterstufen

Mit Hilfe von Filterkriterien erfolgt, auf Basis der Bauteilinformationen, die automatisierte Bewertung der technisch-wirtschaftlichen Eignung eines Bauteils für die additive Fertigung. In der hier beschriebenen Entwicklungsstufe des Identifikationsalgorithmus erfolgt die Bewertung der Wirtschaftlichkeit rein qualitativ. So wird vorausgesetzt, dass bspw. klassische Dreh- und Frästeile i.d.R. additiv nicht wirtschaftlich zu fertigen sind. Eine quantitative Bewertung auf Basis von Fertigungskosten sowie die Berücksichtigung von Aspekten wie Kapazitätsengpässe oder Vertragsstrafen, welche beispielsweise auch einfache Blechteile additiv wirtschaftlich fertigbar machen, sind Gegenstand aktueller Weiterentwicklungen.

Die Filterung aller in der Datenbank erfassten Bauteile erfolgt in drei Filterstufen: Vorfilter, Hauptfilter und Feinfilter. Im Vorfilter werden zwei Filterkriterien zur Bauteilbewertung herangezogen. Mit dem ersten Filterkriterium werden etwaige rechtliche Aspekte geprüft. Handelt es sich bei dem Bauteil um ein Zukaufteil, welches nicht in Eigenleistung produziert werden darf, so ist eine additive Fertigung aus rechtlichen Gründen ausgeschlossen und das entsprechende Bauteil wird vom Vorfilter ohne weitere Prüfung aussortiert. Das zweite Filterkriterium betrifft den Standardisierungsgrad des Bauteils. Ist bei einem Bauteil hinterlegt, dass es sich um ein Normteil oder Maschinenelement handelt, wird es ebenfalls vom Vorfilter herausgefiltert.

Der Hauptfilter untersucht die verbleibenden Bauteile hinsichtlich des dritten Filterkriteriums „konventionelle Fertigungscharakteristika“. Zur Beurteilung werden die beiden Bauteilmerkmale „Bauteilcharakteristik“ und „Halbzeug“ herangezogen. Vom Hauptfilter werden alle Dreh-, Fräs-, Schneid- und einfachen Blechteile sowie alle Bauteile mit dem Halbzeugtyp Profil, Stab und Rohr herausgefiltert.

Mit dem Vor- und Hauptfilter werden somit alle, in der Datenbank erfassten und nach rechtlichen und vereinfachten wirtschaftlichen Aspekten als für die additive Fertigung ungeeignet klassifizierten Bauteile aussortiert. Sämtliche verbleibenden Bauteile sind aus qualitativer Sicht prinzipiell wirtschaftlich zu fertigen (im Kontext der Ersatzteilbereitstellung oftmals u.a. Guss- und Schmiedeteile).

Die letzte Filterstufe, der Feinfilter, dient nun zur Eliminierung aktuell oder betrieblich technisch ungeeigneter Bauteile. Dies kann z.B. dadurch gegeben sein, dass derzeit technisch keine Anlage auf dem Markt verfügbar ist, um das Bauteil aufgrund dessen Größe in einem Stück aus dem geforderten Material zu fertigen. Das Filterkriterium ist hier die additive Fertigungscharakteristik. Als Merkmale verwendet der Feinfilter die Bauteilabmessungen und die Materialklasse. Über die Materialklasse wird hierbei ein Bezug zwischen dem Bauteil und möglichen additiven Fertigungsverfahren sowie verfügbaren Anlagen hergestellt. Mit Hilfe der maximalen Bauteilabmessungen wird geprüft, ob es derzeit Anlagen mit einer Bauraumgröße gibt, in welchen das Bauteil additiv hergestellt werden kann.

Nach der letzten Filterstufe werden vom Identifikationsalgorithmus alle in der Datenbank hinterlegten Bauteile ausgegeben, welche für die getroffenen Annahmen sowohl wirtschaftlich für die additive Fertigung geeignet (Vor- und Hauptfilter) als auch aus technischer Sicht zurzeit additiv herstellbar sind (Feinfilter). Bei Veränderung der betrieblichen Randbedingungen sowie industriell verfügbaren technologischen Weiterentwicklungen, z.B. größere Anlagen, neue zertifizierte Werkstoffe, können die Filterkriterien dynamisch angepasst und alle bereits eingetragenen Bauteile erneut auf ihre Eignung für die additive Fertigung geprüft werden.

3.3 Datenerfassung

Die Bewertung der technisch-wirtschaftlichen Eignung erfolgt auf Basis von ausgewählten Bauteilinformationen. Die zugehörigen Bauteilmerkmale sind dabei so gewählt, dass die Bauteilinformationen vollständig aus den technischen Unterlagen des Bauteils bzw. des übergeordneten technischen Systems gewonnen werden können. Zu den für die Bewertung notwendigen Unterlagen gehören u.a. 2D-Fertigungszeichnungen und Stücklisten. Das Vorhandensein von virtuellen Produktmodellen (3D-CAD-Modelle) führt zu einem besseren Bauteilverständnis durch den Benutzer und damit zu einer sichereren Datenerfassung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit verschiedene Merkmale automatisiert abzufragen. Liegen im Einzelfall keine oder unvollständige digitale oder physische technische Unterlagen vor, so können die notwendigen Daten am realen Bauteil ermittelt werden.

Der Identifikationsalgorithmus ist grundsätzlich so aufgebaut, dass die Filterung der Bauteile wahlweise direkt auf dem vollständigen Datensatz oder schrittweise, gemäß den einzelnen Filterstufen, auf Basis von Teildaten erfolgen kann. Insbesondere bei großen Datensätzen mit mehreren tausend Einzelteilen kann es, im Speziellen bei manueller Datenerfassung sinnvoll sein, zunächst für alle Bauteile nur die für die Vorfilterung relevanten Bauteilinformationen zu erfassen und erst für die verbleibenden Bauteile die notwendigen Restdaten einzugeben.

Um eine einfache, schnelle und sichere Erfassung der Bauteilinformationen in der Datenbank zu ermöglichen, wurde eine Eingabemaske entworfen.

3.4 Technologiedatenbank

In der Technologiedatenbank sind die aus produktionstechnischer Sicht derzeit führenden additiven Fertigungsverfahren, die zugehörigen Anlagengrößen sowie das Werkstoffspektrum für diese Anlagen hinterlegt. Die Daten sind dabei einfach und flexibel gemäß dem technischen Fortschritt erweiterbar bzw. aktualisierbar. Zudem kann im Rahmen der Bauteilbewertung individuell gesteuert werden, wie die Daten verwendet werden sollen. So kann beispielsweise, durch Berücksichtigung aller hinterlegter Datensätze, die additive Fertigbarkeit von Bauteilen eines technischen Systems generell überprüft werden bzw. durch Beschränkung auf im Unternehmen vorhandene Anlagen direkt ermittelt werden, welche der geeigneten Teile unternehmensintern hergestellt werden können. In der hier beschriebenen Entwicklungsstufe des Identifikationsalgorithmus wurden in der Datenbank die additiven Fertigungsverfahren

Laser-Strahlschmelzens (LBM) für Metallbauteile sowie Laser-Sintern (LS) und Fused Layer Modelling (FLM) für Kunststoffbauteile hinterlegt.

4 Ersatzteil-Entstehungs-Prozesskette

Im Rahmen der Ersatzteilbereitstellung werden zwei konkrete Szenarien als Einstieg in den Prozess betrachtet. Die erste Einstiegsmöglichkeit bildet ein, mittels des zuvor beschriebenen Filterungsprozesses, identifiziertes Bauteil. Eine zweite Möglichkeit den Umfang der nachfolgend vorgestellten Prozessschritte zu untersuchen ergibt sich aus der Zielsetzung für ein bestimmtes (vorgegebenes) Bauteil und ggf. vordefinierte Rahmenbedingungen (z.B. additive Bauteilreparatur bzw. -optimierung, temporäres Ersatzteil, Material und Fertigungsverfahren). Hierbei können auch wirtschaftliche Aspekte zum Tragen kommen, wie z.B. die Suche nach einer alternativen Fertigungsstrategie, um sich aus der Abhängigkeit eines Lieferanten zu lösen.

4.1 Schematischer Aufbau

Ausgangspunkt der Prozesskette bildet somit entweder ein, mittels des zuvor beschriebenen Filterungsprozesses, identifiziertes oder ein vorgegebenes Bauteil. In Bild 2 rechts ist eine Ausführung der Prozesskette mit Untergliederung in neun Hauptschritte dargestellt (gestrichelte Felder sind optional). Links in Bild 2 sind exemplarisch einzelne Prozessschritte am Beispiel eines anwendungsnahen Forschungsprojektes, welches auch zur Validierung genutzt wurde, aufgezeigt. Die Ergebnisse eines jeden Arbeitsschrittes bilden die Basis für nachfolgende Schritte. Prozessbegleitend bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten der Qualitätssicherung. Werden bspw. bei einem Abgleich zwischen dem Rohteil und dem entsprechenden CAD-Modell unzulässige Abweichungen festgestellt, kann eine Änderung der CAD-Rohteilgeometrie, eine alternative Prozessführung oder eine angepasste Nachbearbeitungsstrategie notwendig sein. Ziel des Prozesses ist es jedoch Iterationen nach Möglichkeit zu vermeiden. Hierzu dienen u.a. die optionalen Prozessschritte 4 und 6. Eine Unterteilung in Pre-, In- und Post-Prozess, angelehnt an VDI 3405 (2014), ist ebenfalls berücksichtigt. Je nach Prozessstrategie ist jedoch keine stringente Zuordnung der einzelnen Arbeitsschritte zu den zuvor genannten drei Stufen möglich, was durch eine Überlappung veranschaulicht wurde. Des Weiteren wurden im Vergleich zur VDI 3405 (2014) zusätzliche Arbeitsschritte in den Post-Prozess mit aufgenommen. Je nach Datenlage und Anforderungen an das Bauteil kann der Umfang einzelner Prozessschritte stark variieren. Das gezeigte sequentielle Vorgehen kann hierzu dynamisch, z.B. durch Auslassen einzelner Prozessschritte, angepasst werden. Darüber hinaus ist die parallele Bearbeitung einzelner Arbeitsschritte ebenfalls möglich. Insbesondere bei dringend benötigten Ersatzteilen kann somit eine deutlich schnellere Bereitstellung ermöglicht werden. Ein einsatzbereites Bauteil mit entsprechender Dokumentation stellt das Endergebnis des Prozesses dar.

4.2 Prozessschrittbeschreibung

Nachfolgend werden die einzelnen Prozessschritte näher erläutert und mit Beispielen sowie konkreten, prozessbegleitenden Qualitätssicherungsmaßnahmen veranschaulicht.

Als Basis für den einleitenden Prozessschritt (Ermitteln funktionsrelevanter Eigenschaften) dienen die bei dem ersten Einstiegsszenario (Identifikationsalgorithmus) bereits ermittelten Eigenschaften. Diese werden um zuvor nicht oder nur vereinfacht betrachtete Aspekte, wie z.B. die Bauteilbeanspruchung, erweitert. Beim zweiten Einstiegsszenario müssen diese Eigenschaften erst noch ermittelt werden. Das Ergebnis dieses Schrittes sind Zielgrößen (Beispiele hierzu siehe auch Tab. 6 in VDI 3405 (2014)), um die Funktionserfüllung unter i.d.R. geänderten fertigungstechnischen Randbedingungen zu gewährleisten. Insbesondere im Rahmen des OM kann es zudem vorkommen, dass sich ursprünglich an das identifizierte bzw. vorgegebene Bauteil gestellte Anforderungen, über die Nutzungsdauer geändert haben (z.B. Betriebsumfeld, Zweckentfremdung, Regularien). Jedoch können mit Hilfe der Möglichkeiten der additiven Fertigung diesbezüglich vergleichsweise einfach Änderungen am Bauteil realisiert werden.

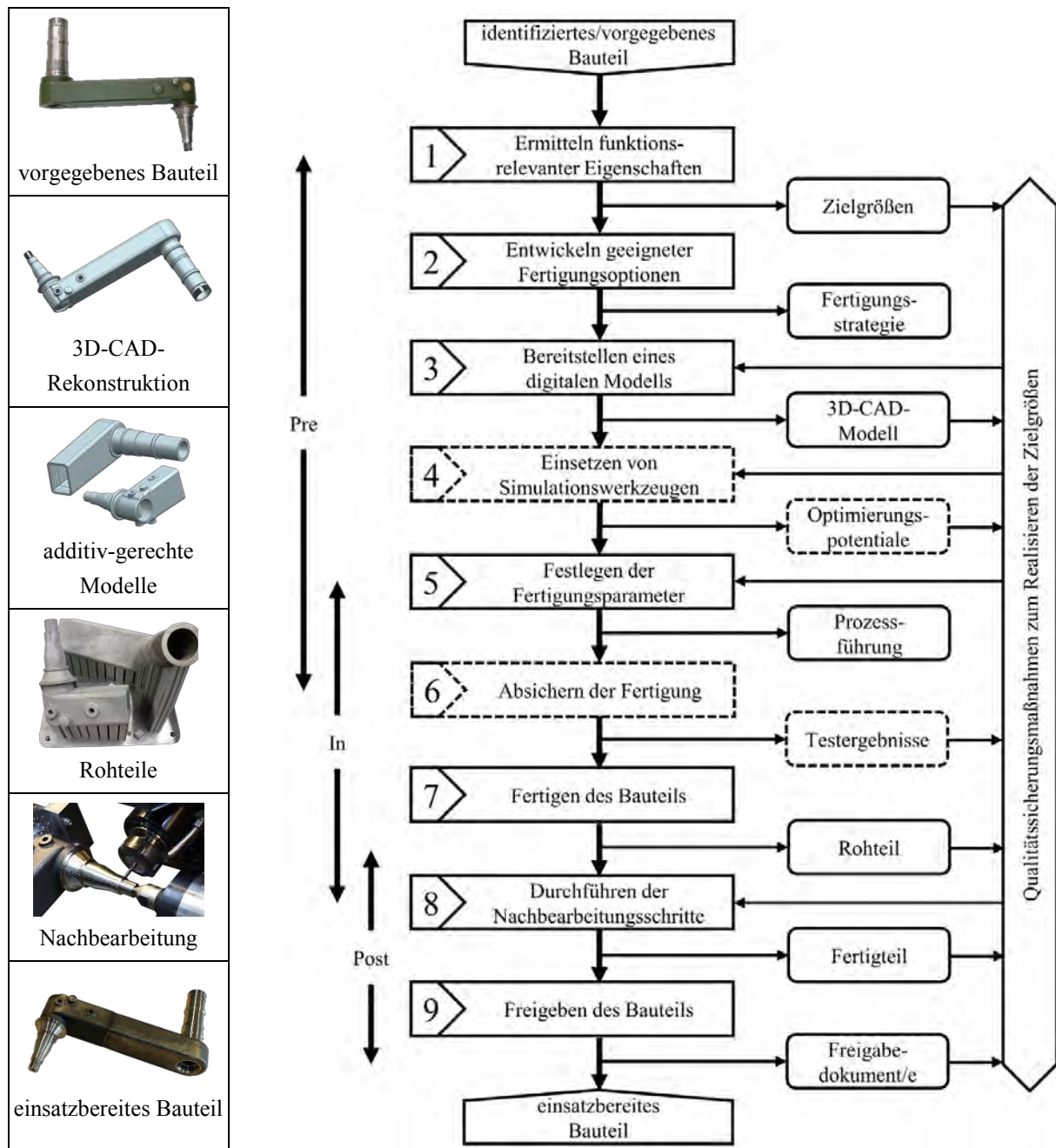


Bild 2: Prozesskette für die additive Ersatzteilerstellung
(links: Praxisbeispiel (Hilbert et al. 2016a und 2016b))

Bei der im zweiten Schritt stattfindenden Entwicklung geeigneter Fertigungsoptionen sind u.a. die strukturellen Zielgrößen maßgebend für die Auswahl einer Fertigungsstrategie. Werden die geforderten Eigenschaften bspw. von einem Kunststoff gewährleistet, gilt es aus den entsprechenden Verfahren (u.a. LS und FLM) ein geeignetes zu wählen. Für eine erste Abschätzung diesbezüglich kann Tab. 7 aus VDI 3405 (2014) genutzt werden. Randbedingungen können hierbei die je nach Verfahren verfügbaren Materialien, geforderten Genauigkeiten oder auch unternehmensinterne Ressourcen sein. Insbesondere bei metallischen Bauteilen können neben den Optionen des Laser-Strahlschmelzens (LBM) und Elektronen-Strahlschmelzens (EBM) auch hybride Fertigungsstrategien in Betracht gezogen werden. Hierzu zählen z.B. das „Rapid Tooling“, bei dem sowohl Positiv- als auch Negativformen additiv gefertigt und nachfolgend einem konventionellen Gießprozess zugeführt werden. Insbesondere aber auch die Kombination von konventionell einfach herstellbaren (vgl. Hauptfilter Bild 1) und komplexen additiv gefertigten Elementen zu einem hybriden Gesamtbauteil ist relevant.

Während bei konventionellen Fertigungsverfahren oftmals mit technischen Zeichnungen gearbeitet wird, ist für die additive Fertigung das Bereitstellen eines digitalen Modells (3D-CAD-Modell) des zu fertigenden Bauteils zwingend erforderlich. Speziell bei Funktionsbauteilen ist daher, basierend auf der ursprünglichen Fertigungsgeometrie des konventionell hergestellten Bauteils, eine additiv-gerechte Konstruktionsgeometrie abzuleiten. Bei deren Erstellung müssen insbesondere die Fertigungsrestriktionen beachtet werden (z.B. Zugänglichkeiten zur Restmaterial- und Stützstrukturentfernung, Bearbeitungsaufmaße für die Nachbearbeitung von Funktionsflächen, weitere Aspekte siehe VDI 3405 Blatt 3 (2015)). Der Anpassungsaufwand ist dabei zum einen maßgeblich von den geforderten Maß-, Form- und Lagetoleranzen und zum anderen von der geometrischen Komplexität sowie ursprünglichen Fertigungsstrategie anhängig. Im Rahmen der Substitution einer gesamten Baugruppe durch ein Integralteil bspw. müssen alle Bestandteile der Baugruppe zu einem Bauteil verschmolzen werden, wobei für die ursprünglichen Verbindungstechniken, wie z.B. Kleben, Schweißen, Schrauben etc. an den Schnittstellen neue konstruktive Lösungen zu entwickeln und auszulegen sind. Gerade im Rahmen der Ersatzteilbereitstellung oder auch bei der Untersuchung von Wettbewerbsprodukten, kann es vorkommen, dass ein Teil nur (noch) physisch vorliegt und u.U. einen Defekt aufweist. In solchen Fällen ist vorab eine Modellerstellung mittels Reverse Engineering unumgänglich. Das, meist im STL-Format vorliegende, Digitalisierungsergebnis kann prinzipiell direkt als digitales Modell für die additive Fertigung genutzt werden. Oftmals ist jedoch eine Reparatur und Anpassung notwendig, wodurch eine Rekonstruktion des Digitalisierungsergebnisses erforderlich wird. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes (3D-CAD-Modell) kann zu Qualitätssicherungsmaßnahmen, z.B. zum Soll-Ist-Abgleich mit dem Fertigungsergebnis sowie als Basis für nachfolgende, optionale Simulationen genutzt werden.

Im vierten (optionalen) Prozessschritt (Einsetzen von Simulationswerkzeugen) werden numerische Simulationen durchgeführt. Hiermit können u.a. durch Fertigungsrestriktionen bedingte Änderungen an der Geometrie auf das strukturelle Bauteilverhalten überprüft werden. Zudem können aus bspw. strukturmechanischen oder fluiddynamischen Simulationen Optimierungspotentiale abgeleitet und vergleichsweise einfach in der Geometrie umgesetzt werden. In diesem Kontext ist auch die Topologieoptimierung zu nennen, da bionische, lastgerechte Strukturen bei der additiven Fertigung ebenfalls vergleichsweise einfach realisierbar sind. Des Weiteren bietet sich die Möglichkeit, Einflüsse aufgrund einer Materialsubstitution zu untersuchen und ggf. Anpassungen vorzunehmen.

Zentrale Aspekte der im Arbeitsschritt 5 festzulegenden Prozessführung sind die Definition der Bauteilpositionierung und -orientierung, ggf. notwendiger Stützgeometrieerzeugung sowie der Fertigungsparameter. Position und Orientierung des Bauteils im Bauraum sind dabei möglichst früh im Prozess festzulegen (Schritt 2), da sie die nachfolgenden Schritte maßgeblich beeinflussen. Üblicherweise werden vom Betreiber die durch den Anlagenhersteller oder Materiallieferanten zur Verfügung gestellten Fertigungsparameter verwendet. Je nach Zugriffsregelung seitens des Anlagenherstellers können diese Parameter in unterschiedlichem Umfang angepasst werden. Dies ermöglicht eine zielgrößenabhängige Prozessführung (z.B. geringe Schichtdicke für hohe Oberflächenqualität). Abhängig von der Komplexität der Fertigungsaufgabe kann eine individuelle Anpassung der Standardparameter erstrebenswert sein. Diesbezüglich ist das Detailwissen und Know-How bisher jedoch meist personen- bzw. unternehmensgebunden. Eine Absicherung der gewählten Parameter kann sich daher als zielführend erweisen.

Bei der Absicherung der Fertigung stehen verschiedene Hilfsmittel zur Auswahl. Soll das Bauteil bspw. aus Metall gefertigt werden, was i.d.R. mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist, bietet sich eine vorgelagerte additive Prototypenfertigung, z.B. mittels FLM an. Mit einem solchen Prototypen kann die Qualität der digitalen Modelle geprüft sowie Einbau- und Kollisionsuntersuchungen vorgenommen werden. Des Weiteren können mit Hilfe eines Prototypen Nachbearbeitungsschritte im Vorfeld abgestimmt werden. Auch Prozesssimulationen, wie sie sich für konventionelle Fertigungsverfahren etabliert haben, sind Gegenstand intensiver Forschung und kommen bspw. zur Beurteilung und Vermeidung von Eigenstressungen bzw. Bauteilverzug bereits vereinzelt zur Anwendung (Branner 2010). Eine weitere Absicherungsmöglichkeit ist die Fertigung von Probenkörpern mit den zuvor gewählten Parametern, um im Vorfeld bestimmte Eigenschaften zu überprüfen (siehe hierzu auch VDI 3405 Blatt 2 (2013)). Die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes können dann hinsichtlich der Zielgrößen bewertet und ggf. in Simulationsmodelle eingepflegt werden oder auch eine Anpassung der Fertigungsparameter bedingen.

Alle unmittelbar vor, während und nach dem eigentlichen Fertigungsprozess stattfindende Arbeitsschritte sind unter Punkt 7 (Fertigen des Bauteils) zusammengefasst. Dazu gehören z.B. die Anlagen-

einrichtung und -inbetriebnahme, das Starten des Druckauftrags, die Prozessüberwachung, das Entnehmen des gefertigten Bauteils und dessen Reinigung (z.B. Absaugen und Lösen von der Substratplatte) sowie die Anlagenvorbereitung für den nächsten Druckauftrag. Am Ende dieses Schrittes liegen Rohteile vor. Für prototypische Anwendungen kann dieser Zustand bereits ausreichend sein. Eine Verwendung als Funktionsbauteil ohne detailliertere Nachbearbeitung ist i.d.R. jedoch nicht möglich. Diese schließt sich nachfolgend an. Qualitätssicherungs- bzw. -dokumentationsmaßnahmen können bereits fertigungsprozessbegleitend z.B. mittels Parametermonitoring und (automatisierter) optischer Überwachung erfolgen. An Rohteilen können ebenfalls Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt werden. Mittels Digitalisierung der Rohteilgeometrie und Soll-Ist-Abgleich mit dem entsprechenden CAD-Modell aus Schritt 3 können bspw. fertigungsbedingte Abweichungen detektiert und je nach Ausmaß bspw. Einfluss auf die sich anschließende Nachbearbeitung genommen werden, um eine Funktionserfüllung dennoch zu gewährleisten. Somit ist im Falle von Abweichungen nicht zwingend ein Zurückspringen zu vorgelagerten Prozessschritten notwendig.

Damit gewährleistet ist, dass die unter 8 (Durchführen der Nachbearbeitungsschritte) erfolgenden und geforderten bzw. notwendigen Nachbearbeitungsschritte durchgeführt werden können, werden diese bereits im zweiten Prozessschritt erarbeitet und bei alle nachfolgenden Schritten berücksichtigt (z.B. Gewährleistung von Zugänglichkeiten). Der Umfang der Nachbearbeitungsschritte gestaltet sich je nach Bauteilanforderungen unterschiedlich. Prinzipiell werden eine Vielzahl der konventionellen Fertigungsverfahren zur Nachbearbeitung additiv hergestellter Bauteile eingesetzt. Qualitätssicherungsmaßnahmen, wie z.B. das Prüfen von Maß-, Form- und Lagetoleranzen werden dabei prozessschrittbegleitend durchgeführt.

Bevor eine Anwendung des Bauteils in Betracht gezogen werden kann bzw. darf, durchläuft es oftmals betriebsintern und/oder behördlich einen Freigabeprozess. Dabei ist insbesondere die europäische Produktsicherheitsgesetzgebung (z.B. Richtlinie 2014/68/EU (2014)) zu beachten. In den Freigabeprozess können u.a. die Ergebnisse der Qualitätssicherungsmaßnahmen einfließen. Auch eine umfangreiche Dokumentation der einzelnen Arbeitsschritte kann gefordert und zusätzliche zerstörende Bauteilprüfungen notwendig sein. Weitere Aspekte sind in Abschnitt sieben und acht der VDI 3405 (2014) sowie deren Anhang aufgeführt.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Der Identifikationsalgorithmus und die Prozesskette sind im Rahmen industrieller Forschungsk Kooperationen entstanden und haben sich bei diesen bereits bewährt. Mit der Ersatzteilthematik wurde ein Ausschnitt der immer wiederkehrenden Themenkomplexe in Verbindung mit Anwendungsfällen für die additive Fertigung aufgegriffen und näher beleuchtet. Die in der Prozesskette beschriebenen Arbeitsschritte sind prinzipiell auch bei Produktneuentwicklungen notwendig. Eine Validierung bzgl. von der Ersatzteilthematik abweichender Entwicklungsaufgaben steht zum jetzigen Zeitpunkt noch aus.

Um auch weitere Aspekte des OM zu beleuchten und auch bereits bestehende Potentiale besser zu nutzen, beschäftigen sich aktuelle Weiterentwicklungen mit der Integration der Filtersystematik in bestehende PLM-Systeme sowie der automatisierten Erkennung von Möglichkeiten zur Funktionsintegration und die Erweiterungen des Prozesses bzgl. hybrider Fertigungsstrategien (z.B. Rapid Tooling). Darüber hinaus wird sich in aktuellen Arbeiten der Herausforderung einer fundierten und somit verlässlichen wirtschaftlichen Bewertung gestellt.

Literatur

- | | |
|----------------------|--|
| Berger et al. 2013 | BERGER, Uwe ; HARTMANN, Andreas ; SCHMID, Dietmar: <i>Additive Fertigungsverfahren</i> . Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2013. |
| Bergmann et al. 2013 | BERGMANN, André ; GROSSER, Hendrik ; GRAF, Benjamin ; UHLMANN, Eckart ; RETHMEIER, Michael ; STARK, Rainer: <i>Additive Prozesskette zur Instandsetzung von Bauteilen</i> . In: <i>Laser-Technik-Journal</i> 10 (2013), Nr. 2, S. 31-35. |

- Branner 2010 BRANNER, Georg: *Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Dissertation, 2010.
- Emmelmann et al. 2011 EMMELMANN, Claus ; PETERSEN, Maren ; KRANZ, Jannis ; WYCISK, Eric: *Bionic light-weight design by laser additive manufacturing (LAM) for aircraft industry*. In: Proc. SPIE 8065, SPIE Eco-Photonics 2011: Sustainable Design, Manufacturing, and Engineering Workforce Education for a Green Future, 80650L (April 29, 2011).
- Feldhusen und Grote 2013 FELDHUSEN, Jörg ; GROTE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 8. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- Gebhardt et al. 2016 GEBHARDT, Andreas ; KESSLER, Julia ; THURN, Laura: *3D-Drucken*. München: Hanser Verlag, 2016.
- Hilbert et al. 2016a HILBERT, Karsten ; LEY, Maximilian ; DESCHNER, Constantin ; BLECKMANN, Matthias ; SCHINDLER, Christian: Einsatz der additiven Fertigungstechnologie für die Ersatzteilversorgung. In: BERNS, Karsten et al. (Hrsg.): *Proc. 4th Commercial Vehicle Technology Symposium*. Kaiserslautern, 2016, S. 259-270.
- Hilbert et al. 2016b HILBERT, Karsten ; LEY, Maximilian ; DESCHNER, Constantin: *Ersatzteilversorgung in der Nutzfahrzeugtechnik, unterstützt durch additive Fertigung (Vortrag)*. Kaiserslautern: Additive Manufacturing in der Nutzfahrzeugproduktion – Ergebnistransfer CVC-Leitprojekt, 26.09.2016.
- Hofmann et al. 2012 HOFMANN, Eric ; MAUCHER, Daniel ; HORNSTEIN, Jens ; DEN OUDEN, Rainer: *Investitionsgütereinkauf*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- Khajavi et al. 2014 KHAJAVI, Siavash H. ; PARTANEN, Jouni ; HOLMSTRÖM, Jan: *Additive manufacturing in the spare parts supply chain*. In: *Computers in Industry* 65 (2014), Nr. 1, S. 50-63.
- Klocke 2015 KLOCKE, Fritz: *Fertigungsverfahren 5*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2015.
- Lachmayer et al. 2016 LACHMAYER, Roland ; LIPPERT, Rene Bastian ; FAHLBUSCH, Thomas: *3D-Druck beleuchtet*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2016.
- Reiher und Koch 2016 REIHER, Thomas ; KOCH, Rainer: Product optimization with and for additive Manufacturing. In: BOURELL, David L. et al. (Hrsg.): *The 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. Austin, Texas, 2016.
- Richtlinie 2014/68/EU Richtlinie 2014/68/EU Mai 2014: *Richtlinie zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt*.
- Tomlin und Meyer 2011 TOMLIN, Matthew ; MEYER, Jonathan: *Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part*. In: The 7th Altair CAE Technology Conference. Gaydon Warwickshire, 2011.
- VDI 2882 Entwurf 2016 Richtlinie VDI 2882 Entwurf August 2016: *Obsoleszenzmanagement*.
- VDI 3405 2014 Richtlinie VDI 3405 Dezember 2014: *Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*.
- VDI 3405 Blatt2 2013 Richtlinie VDI 3405 Blatt 2 August 2013: *Additive Fertigungsverfahren: Strahlschmelzen metallischer Bauteile Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung*.
- VDI 3405 Blatt3 2015 Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 Dezember 2015: *Additive Fertigungsverfahren: Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*.

Prozess zur computergestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen

Florian Weiss¹, Lasse Ahlgrimm¹, Hansgeorg Binz¹, Daniel Roth¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Germany
Florian.weiss@ikt.uni-stuttgart.de

Abstract: Bei der additiven Fertigung spielt die Bauteiloptimierung wegen der damit verbundenen Material- und somit Kosteneinsparung eine besondere Rolle. Zur Durchführung einer Optimierung sind dabei mehrere Arbeitsschritte durchzuführen. In diesem Beitrag wird ein computergestützter Prozess zur Anpassung von Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen für additiv gefertigte Bauteile vorgestellt. Der Prozess ist dafür schrittweise beschrieben und wird an einem durchgängigen Beispiel veranschaulicht.

Keywords: Additive Fertigung, Strukturoptimierung, Konstruktionsmethodik

1 Einführung und Motivation

Additive Fertigungsverfahren (AM) bieten aufgrund ihres Schichtbauprinzips die Möglichkeit, Bauteile mit komplexen Geometrien herzustellen. Sie werden dabei nicht nur zur Erstellung von Prototypen, sondern auch zur Fertigung von Endprodukten genutzt. Endprodukte sind marktfähige Produkte mit Serieneigenschaften ab Stückzahl eins (VDI 3405). Die Kosten der Bauteile sind bei den Verfahren nur bedingt von ihrer Komplexität abhängig, sondern werden vornehmlich durch das Volumen der Bauteile und den benötigten Bauraum beeinflusst (Zäh 2006). Durch die werkzeuglose Fertigung können bspw. Hinterschnitte und gekrümmte Flächen realisiert werden. Diese Geometriefreiheit der AM kann durch die Optimierung des Festigkeits- zu Gewichtverhältnisses zur Erstellung leichtbaugerechter Strukturen bei gleichzeitiger Verringerung der Fertigungskosten genutzt werden. Bei additiv gefertigten Bauteilen stehen im Gegensatz zu konventionell gefertigten die funktions- und montagegerechte Konstruktion mehr im Vordergrund als die fertigungsgerechte Gestaltung (Wegner und Witt 2012). Die Funktionen, die ein additiv hergestelltes Produkt erfüllt, lassen sich mit der gleichen Systematik beschreiben wie die konventionell hergestellter Produkte. Ihre Gesamtfunktionen lassen sich in die gleichen allgemeinen Funktionen, wie bspw. von Roth (Roth 2000) definiert, aufgliedern. Die Erfüllung der Funktionen erfolgt durch Lösungsprinzipien (Pahl et al. 2007). Lösungsprinzipien für die gleichen Funktionen können dabei für verschiedene Produkte übereinstimmen, also auf den gleichen physikalischen Effekten beruhen, sich allerdings in ihren geometrischen und stofflichen Merkmalen unterscheiden. Die gegebene Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren ermöglicht es, die Struktur des verwendeten Lösungsprinzips je nach Anwendungsfall zu optimieren. Das heißt, die entstehende Struktur ist genau auf den spezifischen Anwendungsfall abgestimmt, berücksichtigt bspw. den verfügbaren Bauraum, die Krafterleitung sowie die gewollte Steifigkeit der Struktur und reduziert die Fertigungskosten.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Lösungsprinzipien einzelner Teilfunktionen additiv hergestellter Bauteile lassen sich parametrisch vordefinieren. Ein einfaches Beispiel zur Leitung eines Moments zwischen zwei Orten ist ein durch seine Bauraumbeschränkungen beschriebener Biegebalken. Im Fall der additiven Fertigung kann der Biegebalken, als das Lösungsprinzip zur Erfüllung der Funktion Kraft leiten, nach seiner Optimierung für die bauteilspezifischen Randbedingungen direkt aus den entstehenden CAD-Daten gefertigt werden. Während des Durchführens einer Strukturoptimierung können zudem Ergebnisse entstehen, die keine kraftflussgerechte oder AM-gerechte Struktur darstellen und entweder weiterer Anpassung bedürfen oder ein erneutes Durchlaufen vorangegangener Schritte erfordern. Potenzielle Fehlerquellen

sollten daher durch eine gezielte Vorgehensweise möglichst vermieden und Iterationskriterien beschrieben werden.

Um vordefinierte Lösungsprinzipien für Funktionen additiv hergestellter Bauteile bereitstellen zu können und eine einheitlich Prozessbeschreibung zu haben, wird in diesem Beitrag ein computergestütztes Vorgehen zur Anpassung von Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen untersucht. Die Forschungsfrage, welche in diesem Beitrag erörtert wird, lautet wie folgt: Wie muss vorgegangen werden, um Prinziplösungen an geänderte Randbedingungen anzupassen, um eine AM-gerechte Geometrie zu erhalten?

3 Prinzipielles Vorgehen zur Strukturoptimierung für additiv gefertigte Bauteile

In der Literatur sind bereits Vorgehensweisen zur computergestützten Strukturoptimierung im Kontext der Additiven Fertigung beschrieben. Das in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehen ist vornehmlich in Anlehnung an die in (Brackett et al. 2011) und (Hilbert 2016) beschriebenen Prozesse entstanden, wobei Arbeitsschritte konkretisiert und Handlungsempfehlungen ausgeführt werden. Die Hauptschritte der beiden Prozesse sind im Folgenden dargestellt:

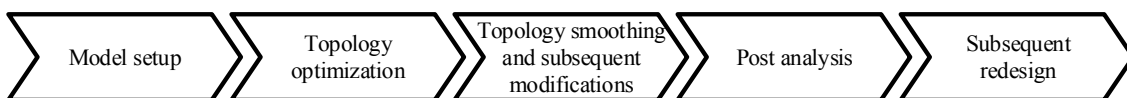


Bild 1: Vorgehen zur Optimierung nach (Brackett et al. 2011)

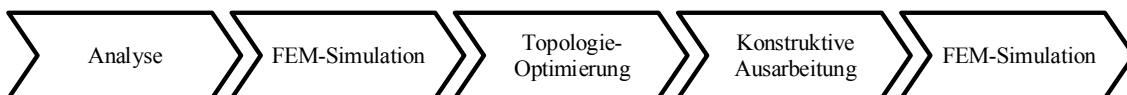


Bild 2: Vorgehen zur Optimierung nach (Hilbert 2016)

Im grundlegenden Vorgehen ähneln sich die beiden dargestellten Prozesse. Der Topologie-Optimierung liegt beides Mal ein Modell zugrunde, welches dem gegebenen Bauraum und weiteren Randbedingungen entspricht. Im Vorgehen nach (Hilbert 2016) ist der Optimierung zusätzlich noch eine optionale FEM-Simulation vorgeschaltet. Nach der durchgeführten Optimierung beinhalten die Prozesse Arbeitsschritte, um das Ergebnis hinsichtlich seiner Gestalt und der entstehenden Daten in eine nutzbare Form rückzuführen. Anschließend wird die entstandene Geometrie nochmals in einem Analyseschritt auf seine Erfüllung der Anforderungen hin überprüft. Im Vorgehen nach (Brackett et al. 2011) sind ferner weitere Schritte der Überarbeitung der Strukturen vorgesehen.

4 Prozess zur computergestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird in diesem Beitrag ein schrittweises Vorgehen zur Optimierung bestehender Lösungsprinzipien für spezifische Randbedingungen additiv hergestellter Produkte vorgestellt. Die Vorgehensweise baut auf der bereits bestehenden Entscheidung für die additive Fertigung eines Bauteils auf und unterstützt somit nicht den Entscheidungsprozess als solchen. Die Vorgehensweise ist in Bild 3 dargestellt und in den nachfolgenden Kapiteln 5 bis 7 genauer ausgeführt. Das Vorgehen ist schrittweise beschrieben, wobei es Iterationen unterworfen sein kann. Alle Schritte des beschriebenen Vorgehens können zu einem Erkennen eines Fehlers führen und somit eine Iteration notwendig machen. An den Stellen, an denen eine explizite Analyse des bisher erarbeiteten Ergebnisses von besonderer Bedeutung ist, beinhaltet der vorgestellte Prozess explizit Analyseschritte, die in ihrer Konsequenz eine Iteration erfordern können. Allen Arbeitsschritten ist jeweils ein erwartetes Ergebnis zugeordnet. In der Ausführung der Schritte wird Bezug zu den Randbedingungen der additiven Fertigung wie z. B. der Auflösung der Fertigungsverfahren, einzuhaltender Konstruktionsregeln und der Anisotropie genommen.

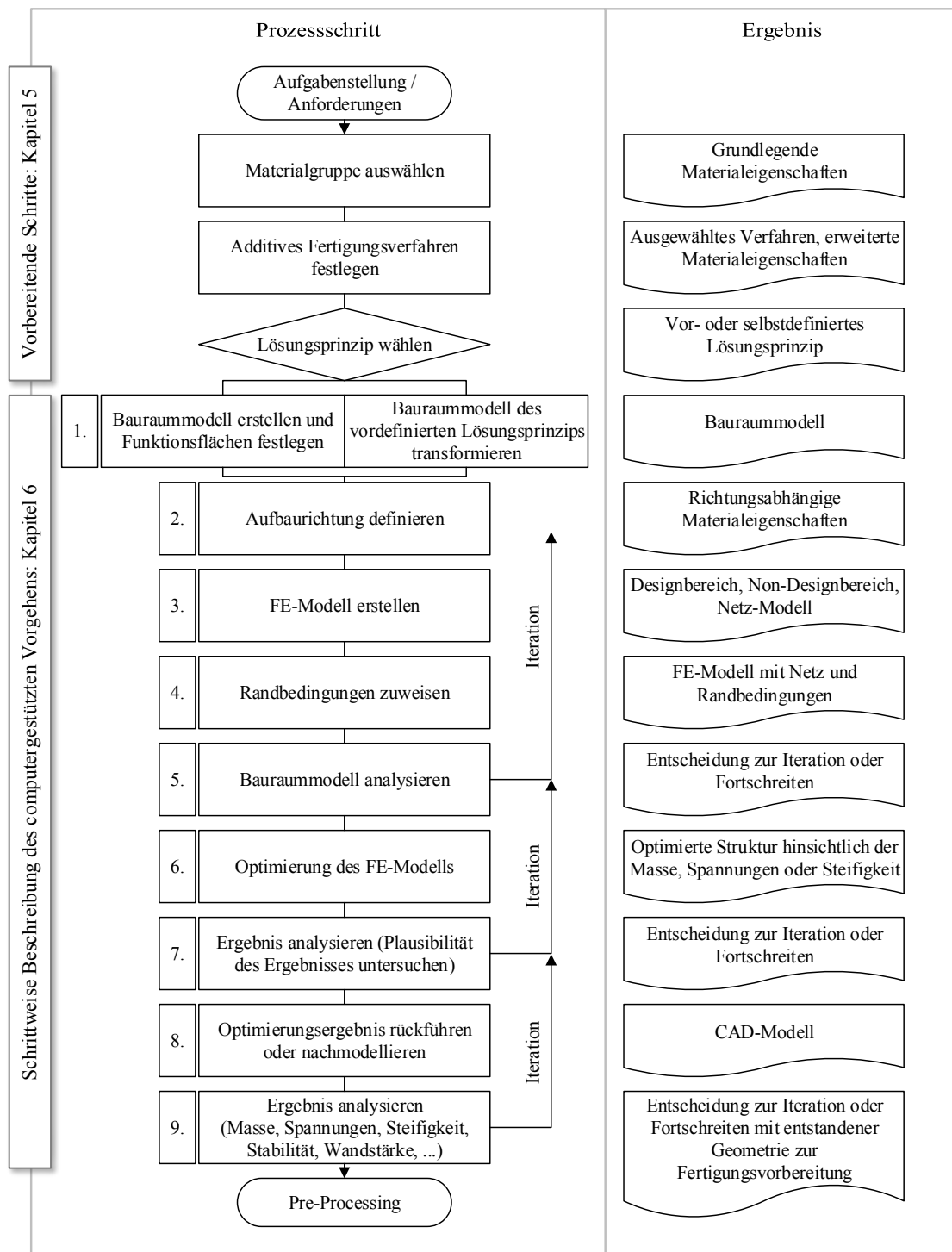


Bild 3: Prozess zur computergestützten Optimierung von Lösungsprinzipien

Das vorgestellte Vorgehen baut auf den notwendigen Arbeitsschritten unter Nutzung aktuell verfügbarer Software auf. Die in Vorarbeit des hier vorgestellten Prozesses auf ihre Funktionalitäten hin untersuchten Programme sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die untersuchten Programme bieten unterschiedliche Umfänge an Einstellmöglichkeiten. Programme mit weniger Möglichkeiten der Einflussnahme bieten im Gegenzug eine erleichterte Durchführung des Vorgehens und ermöglichen es, auch nicht spezialisierten Konstrukteuren auf einfache Weise optimierte Strukturen zu erstellen. Im Rahmen des durchgehenden Beispiels wurde vornehmlich das Programm Inspire von solidThinking eingesetzt.

Tabelle 1: Funktionalitäten der untersuchten Programme

	Hyperworks Optistruct	3DS Simulia TOSCA	Inspire 2017	Catia	Inventor 2017	Z88
Netzerstellung	++	++	+	+	+	++
FE-Analyse	++	++	+	+	+	++
Formoptimierung/ Dimensionierung	++	++	-	-	-	-
Topologie-Optimierung	++	++	+	+	+	++
Geometrierückführung	++	++	+	+	+	-
CAD	-	-	+	++	++	-
++ = hohe Einflussnahme, + = vorhanden, aber geringe Einflussnahme, - = nicht vorhanden						

Im allgemeinen Fall wird mittels Topologie-Optimierung die Steifigkeit im verfügbaren Bauraum unter Beachtung des Masseziels optimiert. Für Anwendungen, in denen nicht die Steifigkeit, sondern andere Faktoren, wie z. B. die Elastizität unter Einhaltung vorgegebener Restriktionen, die Wärmeübertragungs- oder die Dämpfungseigenschaften angepasst werden sollen, sind Ansätze notwendig, die in den Grundzügen des Vorgehens zur Optimierung dem hier vorgestellten Prozess entsprechen. Da diese Optimierungen aber nur mit erweitertem Wissen durchgeführt werden können und je nach Software zum Teil nur eingeschränkt abbildbar sind beschränkt sich das hier verwendete Beispiel auf die Funktion der Kraftübertragung.

5 Vorbereitende Schritte

Die in diesem Beitrag beschriebene Vorgehensweise bezieht sich auf die Schritte der computergestützten Optimierung von Strukturen innerhalb der Produktentwicklung. Die Produktentwicklung als solche umfasst somit vor- und nachgelagerte Schritte. Die vorbereitenden Schritte stellen den Ausgangspunkt des computergestützten Vorgehens dar.

5.1 Aufgabenstellung und Anforderungen erfassen

Vor Beginn des hier beschriebenen Vorgehens sollten die Anforderungen an das entstehende Bauteil bekannt sein und der Arbeitsschritt des Klärens und Präzisierens der Aufgabenstellung, wie in Richtlinie (VDI 2221) beschrieben, abgeschlossen sein. In Bezug auf die Optimierung des zu entwickelnden Elements bedeutet dies vor allem, dass alle möglichen Lastfälle auf das Bauteil über seinen Produktlebenszyklus bekannt sind. Dies beinhaltet sowohl die entstehenden Belastungen während der Nutzung als auch während verschiedener Schritte der Handhabung des entstehenden Produkts. Weiterhin sind die Anforderungen an das Material hinsichtlich chemischer, thermischer und mechanischer Belastung von besonderem Interesse.

Das Optimierungsziel sollte bekannt sein oder festgelegt werden. Im Normalfall ist das Optimierungsziel bei der additiven Fertigung, wegen des Zusammenhangs zwischen Materialverbrauch und den entstehenden Kosten, die Massereduktion unter Verschiebungs- oder Spannungsrestriktionen.

5.2 Materialgruppe auswählen

Für die additive Fertigung steht mittlerweile eine große Anzahl verschiedener Materialien zur Verfügung. Die Verfestigungsprinzipien zur Entstehung des Bauteils unterscheiden sich dabei zwischen den unterschiedlichen verfügbaren additiven Fertigungsverfahren. In den frühen Phasen der Produktentwicklung ist allerdings im Normalfall noch nicht bekannt, welche Kombination aus Material und Fertigungsverfahren letztlich Verwendung findet. Die zuvor ermittelten grundlegenden Materialanforderungen hinsichtlich chemischer, thermischer und mechanischer Belastung müssen

durch die gewählte Materialgruppe prinzipiell erfüllt werden können. Die Auswahl der Materialgruppe findet zwischen Kunststoff, Metall oder Keramik statt.

5.3 Additives Fertigungsverfahren festlegen

Durch die Eingrenzung der Materialgruppe wird gleichzeitig die mögliche Auswahl an Fertigungsverfahren eingeschränkt. Eine Übersicht zur Zuordnung der Materialgruppen zu kommerziell etablierten additiven Fertigungsverfahren kann bspw. Richtlinie (VDI 3405) entnommen werden. Die letztliche Auswahl des verwendeten Verfahrens bedarf der Beachtung vielfältiger Einflussfaktoren und kann bspw. nach dem Vorgehen nach (Weiss et al. 2015) erfolgen.

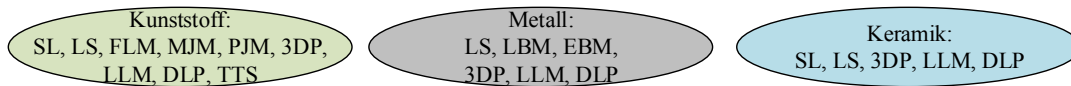


Bild 4: Auswählbare Fertigungsverfahren der additiven Fertigung

5.4 Lösungsprinzip wählen

Die in diesem Beitrag thematisierte Optimierung bezieht sich auf technische Elemente, welche eine oder mehrere definierte Funktionen über den Lebenszyklus eines Produkts erfüllen sollen. Die Elemente können ein eigenständiges Produkt, aber auch Teilelemente eines komplexeren Produkts darstellen und somit Teilfunktionen der späteren Gesamtfunktion des Produkts erfüllen. Die Summe der Lösungsprinzipien, die zur Erfüllung der Gesamtfunktion kombiniert werden, wird als Wirkstruktur (Lösungskonzept) bezeichnet (Pahl et al. 2007). Beispielhafte Lösungsprinzipien zur Erfüllung mechanischer Funktionen sind in Bild 5 dargestellt. Die letztliche Ausprägung ihrer Gestalt ist hier nicht als vorgegeben anzusehen, sondern muss den produktspezifischen Randbedingungen angepasst werden.

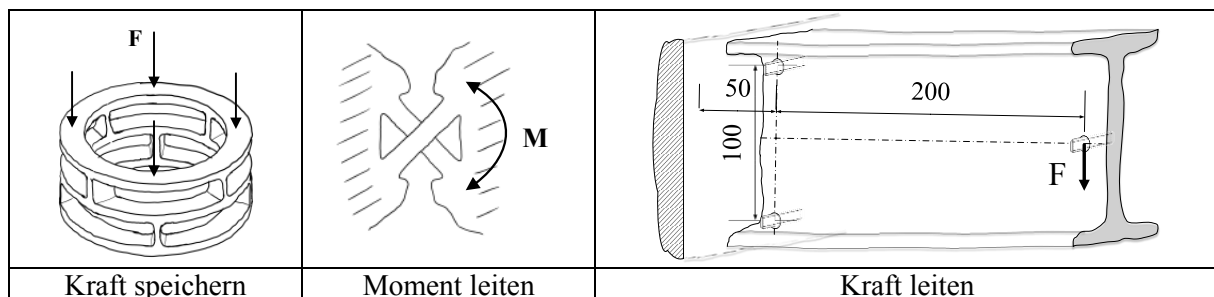


Bild 5: Lösungsprinzipien für unterschiedliche mechanische Funktionen

Zur Veranschaulichung des in diesem Beitrag vorgestellten Vorgehens wird das einfache Beispiel eines Strukturelements gewählt, welches die Funktion der Leitung einer vertikalen Kraft zu zwei Bolzenverbindungen in 200 mm horizontalem Abstand erfüllen soll (siehe Bild 5 rechts). Das Strukturelement stellt somit ein einzelnes Bauteil dar, dessen Randbedingungen durch die Bolzenverbindungen, die Größe der Kraft und den verfügbaren Bauraum definiert sind. Das Optimierungsziel des Bauteils ist die Maximierung der Steifigkeit bei einer vorgegebenen Masse.

6 Schrittweise Beschreibung des computergestützten Vorgehens anhand eines durchgehenden Beispiels

In diesem Abschnitt wird der Prozess der computergestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen schrittweise beschrieben. Die Unterkapitelnummern entsprechen dabei den Nummerierungen der Gesamtdarstellung des Vorgehens in Bild 3.

6.1 Bauraummodell erstellen und Funktionsflächen festlegen

Im ersten Prozessschritt sind der Bauraum und die Funktionsflächen des Lösungsprinzips festzulegen. Die realitätsnahe Abbildung ist im Kontext der additiven Fertigung von besonderer Bedeutung, da im Idealfall das Optimierungsergebnis direkt dem Fertigungsergebnis entsprechen kann und nachfolgend keine umfassenden Anpassungen durch das angewandte Fertigungsverfahren notwendig sind. Anschlussstellen und Funktionsflächen sollten aus diesem Grund mit dem tatsächlich gewollten Maß modelliert werden und bspw. den Mittelwert der zulässigen Toleranzen abbilden. Das Modell kann auch bereits als vordefiniertes Lösungsprinzip vorliegen und muss in diesem Fall angepasst werden. Allgemein ist der Bauraum für die Topologie-Optimierung maximal groß zu wählen, um optimale Lösungen nicht von vornherein auszuschließen. In Bild 6 sind verschiedene Ausprägungen des Bauraums bei gleichen Abmaßen der Funktionsflächen des hier genutzten Beispiels der Kraftleitung dargestellt.

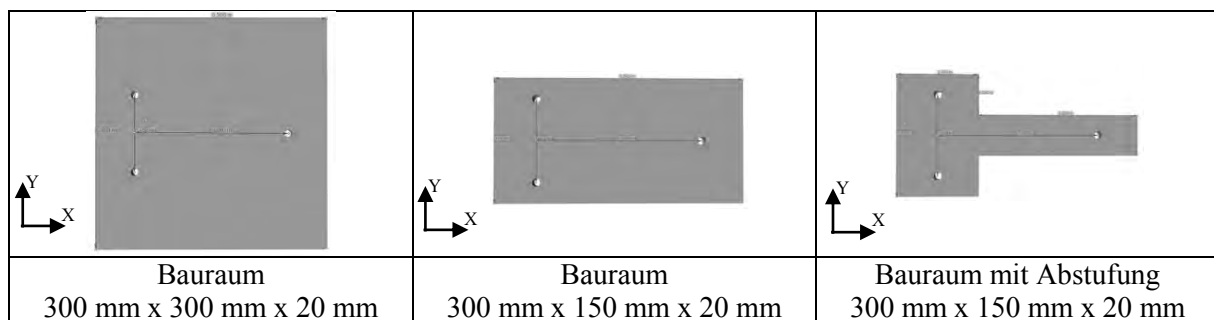


Bild 6: Verschiedene Bauraummodelle des gleichen Lösungsprinzips

6.2 Aufbaurichtung definieren

Bedingt durch den schichtweisen Aufbau der additiven Fertigung ergibt sich ein richtungsabhängiges Materialverhalten, eine Anisotropie. Dieses hat durch die Aufbaurichtung des Bauteils direkten Einfluss auf dessen Eigenschaften. Die Eigenschaften eines vollständig anisotropen Materials werden durch 21 verschiedene Werte in der Materialmatrix abgebildet, welche durch Versuche bestimmt werden müssen. Die Werte spiegeln Dehnung und Schub entlang der Hauptachsen, die Querkontraktionen, also Dehnung-Dehnung-Beziehungen, die Kopplung von Dehnung und Schub sowie die Kopplung für Schub-Schub wieder. Besitzt ein Material Dehnung-Schub- oder Schub-Schub-Kopplungen, wird von anisotropem Material gesprochen. Weist das Material diese Abhängigkeiten nicht auf, ist ein Material orthotrop. Im Falle eines anisotropen Materialverhaltens müssen geeignete Festigkeitshypothesen angewendet werden.

Derzeit ist kein Richtwert bekannt, welcher auf Grund des „*Grades der Anisotropie*“ eine Nichtbeachtung oder einen Einbezug der Anisotropie in die Rechnung empfehlen lässt. Ob anisotrope Materialeigenschaften für die Berechnung von optimierten Strukturen angewandt werden können, ist maßgeblich durch die eingesetzte Optimierungssoftware bedingt. Der Grad der Annäherung an eine optimale Struktur ist dann von der Kenntnis der korrekten Materialeigenschaften für die Berechnung abhängig. Herstellerangaben liefern allerdings in Bezug auf die Materialdaten normalerweise keine ausreichenden Informationen zur Durchführung einer anisotropen Optimierung. Falls anisotrop gerechnet wird, sollte zunächst die Orientierung des Bauteils so gewählt werden, dass die kleinste Bauraumabmessung in Aufbaurichtung liegt, um die Kosten zu reduzieren.

Im Allgemeinen ist die Festigkeit eines Bauteils in Aufbaurichtung geringer als in Schichtrichtung und der Grad der Anisotropie lässt sich bei Metallen durch Wärmebehandlung verringern. Auch kann die Schwankung der Materialeigenschaften so gering sein, dass sie während der Optimierung keiner Beachtung bedarf.

Für das in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehen wird vorgeschlagen, die Materialeigenschaften des Bauteils als isotrop anzunehmen und mit dem schlechtesten Materialkennwert zu approximieren. Zusätzlich sollte die Hauptbelastungsrichtung des Materials in Schichtrichtung liegen. Auch hier sollte allerdings beachtet werden, dass evtl. Mehrkosten durch eine größere Abmessung in Aufbaurichtung

entstehen können, da die Richtung der Hauptbelastung nicht der größten Bauteilabmessung entsprechen muss. Für das hier verwendete Beispiel der Kraftleitung wird von isotropem Material ausgegangen und die Platzierung des Bauteils erfolgt durch parallele Anordnung der Bohrungen zur Aufbaurichtung.

6.3 FE-Modell erstellen

Durch eine automatische oder manuelle Vernetzung des Bauraums wird ein FE-Modell erstellt und es werden Designbereiche und Non-Designbereiche definiert. Es stehen verschiedene Netzelemente zur Verfügung. Mit Tetraeder-Elementen wird ein Modell tendenziell steifer abgebildet. Geometrische Eigenschaften wie Bohrungen oder Lager lassen sich damit aber besser abbilden. Die Elementgröße sollte 1/3 der angestrebten minimalen Strukturgröße des Bauteils nicht überschreiten (Brackett et al. 2011). Die angestrebte Strukturgröße richtet sich nach der minimalen fertigbaren Strukturgröße des Fertigungsverfahrens und ist in diesem Schritt so klein wie möglich anzunehmen. Dies erhöht die Rechenzeit, kann aber zu einem steiferen Optimierungs-Ergebnis führen.

Das Ergebnis der Optimierung ist netzabhängig. Ein unsymmetrisches Netz kann zu nicht symmetrischen Designvorschlägen führen. Existieren aufgrund der gegebenen Kräfte und Einspannungen Symmetrien, sollten diese zugewiesen werden.

Der gegebene Belastungsfall des Beispiels weist eine Symmetrie auf. Wird diese nicht zusätzlich als Restriktion aufgeführt, kann als Ergebnis der Optimierung ein nicht symmetrischer Designvorschlag entstehen. Eine fehlende Angabe äußert sich, wie in der Vorder- und Rückansicht in Bild 7 dargestellt, in einem asymmetrischen Designvorschlag. Das daraus resultierende Bauteilverhalten einer Torsion um die X-Achse (überhöht in Bild 7 rechts dargestellt) kann durch das Einfügen der Symmetriebedingung vermieden werden.

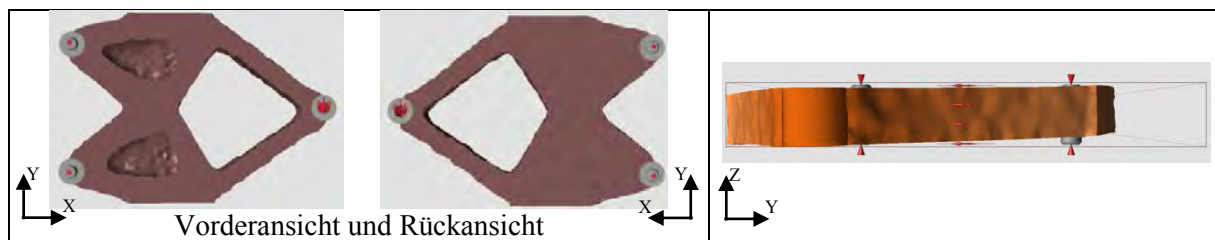


Bild 7: Unsymmetrisches Optimierungsergebnis

6.4 Randbedingungen zuweisen

Die Randbedingungen umfassen Lager- und Kraftbedingungen. Das Optimierungsergebnis kann bei der additiven Fertigung im Gegensatz zu konventionellen Verfahren im Idealfall nahezu ohne Fertigungseinschränkungen umgesetzt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass am Designvorschlag manuell möglichst wenig geändert werden sollte, um das Optimalitätskriterium beizubehalten. Lager- und Kraftbedingungen sind deshalb so realitätsgetreu wie möglich zu modellieren. In Bild 8 sind zur Veranschaulichung des Einflusses der Randbedingungen zwei Designvorschläge bei geänderten Lagerarten der Krafteinleitung und sonst gleichen Einflussfaktoren gegenübergestellt.

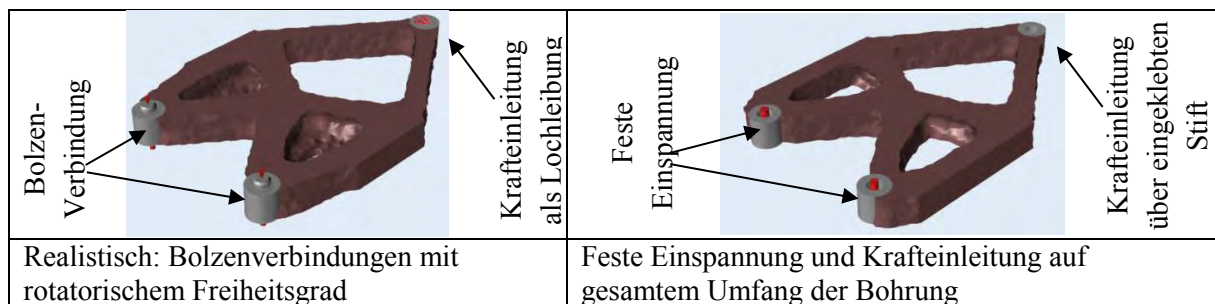


Bild 8: Optimierungsergebnisse bei unterschiedlichen Randbedingungen

6.5 Bauraummodell analysieren

Vor der Durchführung der Optimierung sollte zunächst das Bauraummodell analysiert werden. Der Hauptkraftfluss muss innerhalb des Bauraummodells liegen und sollte keine Randbereiche einschließen. In Bild 9 sind die Analysen der zuvor definierten verschiedenen Bauräume dargestellt und die Ausprägungen des Kraftflusses sind zu erkennen. Während sich in der Zug/Druck-Analyse der linken beiden Darstellungen die Spannungen auf die Krafteinleitungspunkte beschränken und kaum Kraftfluss zum Bauraumrand besteht, ist im rechten Bauraum eine deutliche Spannungsüberhöhung an den Kerbstellen zu beobachten. Der Kraftfluss wird hier extrem eingeschränkt, was durch eine Optimierung nur geringfügig verbessert werden kann. Der Bauraum sollte hier vergrößert werden bzw. sollten zumindest Entlastungen vorgesehen und eine Formoptimierung durchgeführt werden.

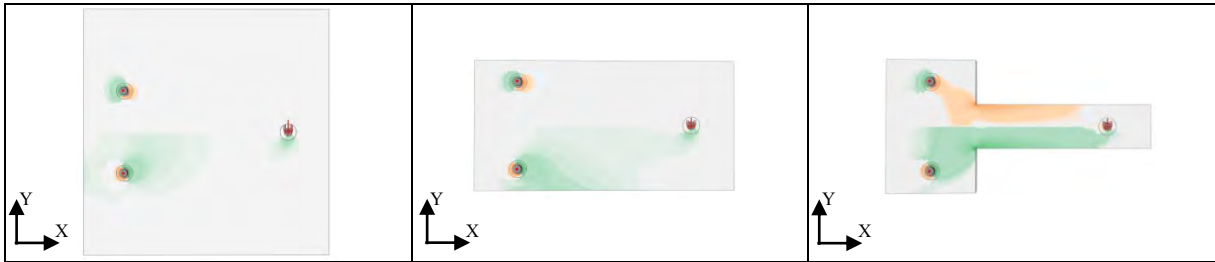


Bild 9: Analyseergebnis der unterschiedlichen Bauräume

6.6 Optimierung des FE-Modells

Bei der Optimierung des FE-Modells werden verschiedene Ansätze eingesetzt. Zunächst ist ein Optimierungsziel zu wählen, z. B. eine minimale Masse oder eine maximal zulässige Verschiebung. Die möglichen Optimierungsziele sind vom angewandten Optimierungsprogramm abhängig. Neben dem Optimierungsziel sind Randbedingungen der Optimierung zu wählen. Diese umfassen erlaubte Verschiebungen, maximale Spannungen, minimale Strukturgrößen und Symmetrien. Die entstehende Struktur setzt sich aus den Einzelstrukturen der unterschiedlichen Lastfälle zusammen.

Die minimale Strukturgröße wird maßgeblich durch das gewählte Fertigungsverfahren eingeschränkt und kann durch die Verfahrensparameter beeinflusst werden. Durch die Wahl einer kleineren minimalen Strukturgröße werden filigranere Geometrien erstellt. Allgemein wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass die Bildung feiner Strukturen die Maximierung der Steifigkeit begünstigt. In Bezug auf die Optimalität sollte deshalb die minimale Struktur so klein wie möglich gewählt werden. Je kleiner die Strukturgröße ist, desto höher ist allerdings die Rechenzeit. Auch sollte die Strukturgröße mindestens der dreifachen Elementgröße des FE-Netzes entsprechen (Brackett et al. 2011), um die Strukturen ausreichend abbilden zu können (siehe Schritt 3).

In Bild 10 sind für verschiedene Masseziele die aus der Optimierung resultierenden Verschiebungen in Abhängigkeit der Strukturgröße aufgetragen. Für die Berechnung wurde der Bauraum so erweitert, dass Randeefekte nicht auftreten. In Bild 11 sind für das Masseziel 1,5 kg die dazugehörigen Optimierungsergebnisse mit resultierender Masse dargestellt. Der Wert von 16 mm für die minimale Strukturgröße stellt den vom Optimierungsprogramm vorgeschlagenen Wert dar.

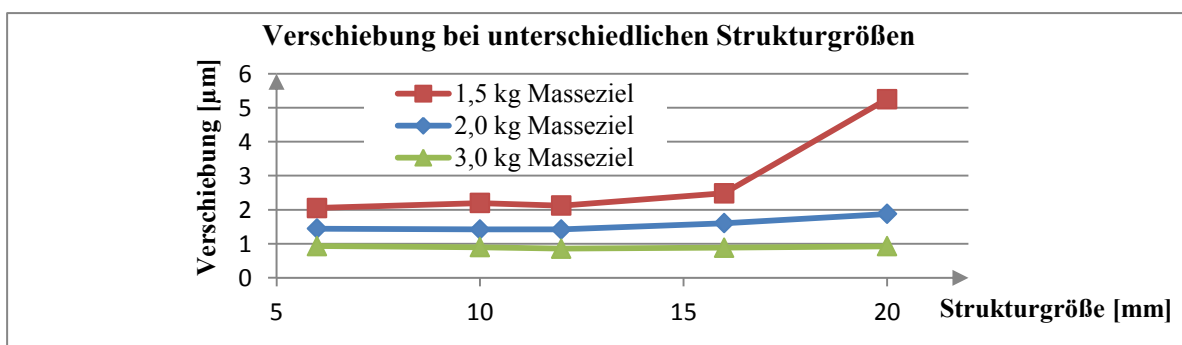


Bild 10: Zusammenhang zwischen Masse- und Steifigkeitsreduktion



Bild 11: Einfluss unterschiedlicher Strukturgrößen auf das Optimierungsergebnis

Es kann erkannt werden, dass bei geringer Massereduktion (höheres Masseziel) zwischen den unterschiedlichen Strukturgrößen nahezu keine Differenz bei der Verschiebung erkennbar ist. Dies kann damit erklärt werden, dass sich die Optimierung in diesem Bereich noch auf die niedrig belasteten Bereiche beschränkt, die nur geringen Einfluss auf die Steifigkeit haben. Bei geringerer Masse allerdings besitzt die feinere Struktur die geringste Verschiebung. Es wird vorgeschlagen, Rechnungen zunächst mit gröberer Struktur zu rechnen und zu kontrollieren, ob das Masseziel bereits hiermit erreicht werden kann. Ist das Masse- oder Steifigkeitsziel dagegen ambitioniert, sollten feinst mögliche Strukturen gewählt werden.

6.7 Ergebnis analysieren (Plausibilität des Ergebnisses untersuchen)

In diesem Arbeitsschritt ist vorrangig die Plausibilität des Optimierungsergebnisses, aber auch die Einhaltung von Fertigungsrestriktionen zu prüfen. Die Überprüfung der Plausibilität kann in Hinblick auf die Beurteilung von Lastpfaden erfolgen. Bei Optimierung auf Steifigkeit sollten Zug-Druck-Hauptpfade und dazwischenliegende Stützpfade erkennbar sein. Tragwerksähnliche Strukturen sollten, im Gegensatz zur ausgebildeten Struktur in Bild 12c, keine Biegebeanspruchung enthalten, sondern ausschließlich Zug oder Druck in den Einzelstrukturen vorherrschen. Indikatoren für eine Biegebeanspruchung sind auch T-Stöße in tragwerkähnlichen Strukturen. Die Struktur sollte auf Kerbstellen hin untersucht werden. Querschnittsprünge bedeuten dabei Steifigkeitssprünge und somit Kraftflussveränderungen. In Hinblick auf die Fertigungsrestriktionen sollte untersucht werden, ob die Entfernung von Stützstrukturen und Pulverresten möglich ist, also z. B. keine geschlossenen Hohlräume existieren. Bei flachen Überhangwinkeln sind Stützstrukturen notwendig und die Zugänglichkeit zur Entfernung muss gewährleistet sein. Offensichtliche Fehler im Designvorschlag sind freischwebende oder abgebrochene Strukturelemente, die eine Veränderung der abgeschnittenen Elementdichte (Cutoff) oder eine Verkleinerung der Elementgröße in Schritt 3 erfordern.

Im Ergebnis Bild 12c kann sich, wie erwartet, keine optimierte Struktur ausbilden. Die linken beiden Ergebnisse weisen prinzipiell eine geeignete Struktur für die Funktionserfüllung auf, allerdings sind im Ergebnis Bild 12b Bauraumgrenzen enthalten (siehe Markierung), was die Struktur verzerrt und eine Iteration mit vergrößertem Bauraum in Y-Richtung erfordert. Auch sollte für das linke Ergebnis eine Iteration mit verbreitertem Bauraum (Z-Richtung) in Betracht gezogen werden, um die entstehende Struktur hier nicht zu beschränken (Ergebnis siehe Bild 12d).

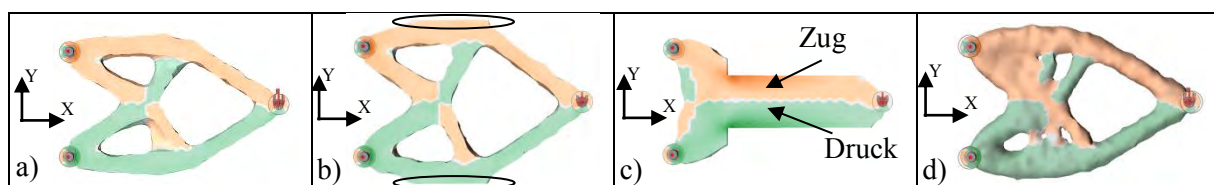


Bild 12: Analyse der Optimierungsergebnisse und Ergebnis mit erweitertem Bauraum in Z-Richtung

6.8 Optimierungsergebnis rückführen oder nachmodellieren

Basierend auf der entstandenen Struktur und dem Einsatzzweck des Bauteils sollte entschieden werden, ob eine computerbasierte Rückführung der Geometrie oder eine Nachmodellierung erfolgt. Die Rückführung erfolgt durch eine Glättung des entstandenen Ergebnisses, bspw. mit dem Programm OSSmooth, und anschließende Fehlerausbesserung der entstandenen Datei, bspw. mit CATIA. Die

Nachmodellierung des Designvorschlags kann entweder manuell oder teilautomatisiert erfolgen, wie bspw. bei Inspire über Freiformflächen, sogenannter PolyNURBS. Bei einer Optimierung aus Leichtbaugründen, d. h. hinsichtlich des Verhältnisses der Masse zur Steifigkeit, sowie bei höheren ästhetischen Anforderungen an das Bauteil ist eine möglichst gute Modellierung der zu fertigenden Oberfläche zweckmäßig. Ist die Optimierung rein durch die Kosteneinsparung motiviert, also in dem Bereich, in dem die Massenreduktion noch keinen erheblichen Einfluss auf die Steifigkeitsreduktion hat (siehe Bild 10), ist sie nicht zwingend notwendig.

6.9 Ergebnis analysieren (Masse, Spannungen, Steifigkeit, Stabilität, Wandstärke, ...)

Das letztlich entstandene Ergebnis des Prozesses sollte nochmals auf die Erfüllung aller Anforderungen, aber besonders hinsichtlich seiner Masse, der auftretenden Spannungen und der Steifigkeit überprüft werden. Auch sollten etwaige Stabilitätsprobleme, wie z. B. Knicken, ausgeschlossen werden. In Bezug auf die Fertigbarkeit sind neben der Prüfung der Kriterien aus Schritt 7 weitere Fertigungsrestriktionen zu untersuchen, wie minimale Spaltmaße und Strukturgrößen. Nach erfolgreicher Optimierung des Bauteils und abschließender Freigabe für die Fertigung in der Ergebnisanalyse erfolgt die Vorbereitung der Daten zur Fertigung, welche auch als Pre-processing bezeichnet wird.

7 Diskussion und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Prozess zur computergestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen schrittweise vorgestellt. Der Prozess wurde im Rahmen studentischer Arbeiten evaluiert, bedarf aber noch seiner Erprobung in der industriellen Praxis, um die Vorgehensweise weiter zu verfeinern. Bezüglich der untersuchten Software lässt sich feststellen, dass benutzerfreundliche Optimierungssoftware mittlerweile auch nicht spezialisierten Konstrukteuren die Möglichkeit bietet, Optimierungen einfach durchzuführen. Programme mit eingeschränkten Möglichkeiten zur Einflussnahme aber einfacherer Bedienbarkeit sind für viele Anwendungsfälle durchaus ausreichend. Die bestehenden Auswertungsmöglichkeiten unterstützen den Anwender bei den Analyseschritten, allerdings ist für die Beurteilung der Ergebnisse Ingenieursfachwissen unumgänglich. Dies umfasst auch die beschränkenden Randbedingungen von AM, da diese in aktueller Software noch nicht ausreichend implementiert sind.

Literatur

- | | |
|----------------------|---|
| VDI 2221 | Verein Deutscher Ingenieure e.V., Mai 1993. <i>Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte</i> |
| VDI 3405 | Verein Deutscher Ingenieure e.V., Dezember 2014. <i>Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen.</i> |
| Brackett et al. 2011 | BRACKETT, D.; ASHCROFT, I.; HAGUE, R.: <i>Topology optimization for additive manufacturing</i> , 2011 |
| Hilbert 2016 | HILBERT, K.: <i>Topologieoptimierung und additive Fertigung in der Produktentwicklung für die Nutzfahrzeugtechnik</i> (10. Altair Anwendertreffen für Hochschulen). Böblingen, 7. März 2016 |
| Pahl et al. 2007 | PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: <i>Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung</i> , 7. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007. |
| Roth 2000 | ROTH, K.: <i>Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band I Konstruktionslehre</i> , 3., wesentlich erw. Aufl, Berlin: Springer, 2000. |
| Wegner und Witt 2012 | WEGNER, A.; WITT, G.: Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern. In: <i>Zeitschrift Kunststofftechnik</i> 3 (2012), S. 225–277. |
| Weiss et al. 2015 | WEISS, F.; BINZ, H.; ROTH, D.: <i>Approach to consider rapid manufacturing in the early phases of product development</i> , ICED 2015 |
| Zäh 2006 | ZÄH, M.: <i>Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren</i> , München: Hanser, 2006. |

Marktorientierte Variantenplanung als Grundlage der Produktentwicklung

Tom Schneider, Dr. Maria Fritz, Arne Herberg, Dr. Matthias Kreimeyer

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg - Schweinfurt, Schweinfurt, Deutschland

tom.schneider@student.fhws.de

MAN Truck & Bus AG, 80995 München, Deutschland

maria.fritz@man.eu

arne.herberg@man.eu

matthias.kreimeyer@man.eu

Abstract

Die weltweite Vernetzung im Zuge der Globalisierung gekoppelt mit den sich wandelnden Kundenforderungen nach sowohl preiswerten als auch individualisierbaren Produkten birgt neue Herausforderungen für Unternehmen und deren zukunftsorientiertes Handeln. Gerade in der Nutzfahrzeugbranche spielt die marktinduzierte Individualisierung und die daraus resultierende Variantenvielfalt eine entscheidende Rolle, da die Fahrzeuge investitionsintensive Arbeitsmaschinen darstellen, die aufgrund der zahlreichen variablen Einsatzgebiete und Aufgabenbereiche eine Vielzahl von spezifischen Anforderungen erfüllen müssen. Die Herausforderung von Nutzfahrzeugherstellern liegt in der Erarbeitung einer marktorientierten Variantenplanung, um sowohl schnell als auch passend auf Marktanforderungen reagieren zu können. Ziel ist ein marktorientiertes modulares Design des Gesamtfahrzeugs und seiner Komponenten selbst sowie dazu passender Prozesse zu erreichen. Das Paper beschäftigt sich mit einer Adaption der Methode „Modular Function Deployment“ (MFD) zur Etablierung der marktorientierten Variantenplanung, und deren Anwendung am Beispiel einer Nutzfahrzeugachse.

Keywords:

Variantenplanung, Marktorientierung, Wissensmanagement, Modularisierung

1 Thematische Einführung und Problemdarstellung

Die weltweite Vernetzung im Zuge der Globalisierung gekoppelt mit den sich wandelnden Kundenforderungen nach sowohl preiswerten als auch individualisierbaren Produkten birgt neue Herausforderungen für Unternehmen und deren zukunftsorientiertes Handeln.

Die aktuelle Situation bietet viele Herausforderungen für heutige Unternehmen. Aufgrund des globalen Wettbewerbs ändern sich die Kundenanforderungen und der Wunsch nach kostengünstigen Produkten rapide. Unternehmen sind immer kürzeren Produktlebenszyklen und immer längeren Entwicklungszeiten aufgrund der hohen Komplexität von Produktstrukturen ausgesetzt. (Spath, Sternemann 2013, S. 495) Um zukünftig wettbewerbsfähig bleiben zu können, müssen Unternehmen durch angepasste Varianten und hohe Flexibilität, eine schnelle Reaktionszeit und starke Kundennähe gewährleisten können. (Erixon 1998, S. 7) Im Zusammenhang mit diesen Entwicklungen hat sich das neue Paradigma der kundenindividuellen Massenproduktion bzw. der Mass Customization etabliert (Jianxin, Mitchell 1999, S. 4; Piller 2006, S. 194). Mass Customization versucht die Vorteile der Kleinserien- und Einzelfertigung mit denen der Massenproduktion zu kombinieren, um die Fähigkeit eines Unternehmens ein hohes Volumen und steigende Flexibilität bei niedrigen Kosten und schneller Lieferzeit weiterhin gewährleisten zu können (Al-Zaher, ElMaragahy, Pasek 2011, S. 446; Jianxin, Mitchell 1999, S. 5; Kesper 16.04.2012, S. 4). Die steigenden Marktanforderungen führen in vielen Fällen zu einer "Explosion" an Varianten, die das Planen und Managen der Varianz und zugehöriger Prozesse auch zukünftig weiter erschweren werden. (Erixon 1998, S. 7)

Die Hauptprobleme des Variantenwachstums sind das erschwerte Wissensmanagement in den beteiligten Abteilungen, das unübersichtliche Produktportfolio und die ungenügende Betrachtung von indirekten Kosten durch die Erhöhung der Varianz (Erixon 1998, S. 32). Aufgrund der zuvor beschriebenen Unübersichtlichkeit wird auch die Kommunikation der technischen Lösungen an den Kunden erschwert (Kesper 16.04.2012, S. 7)

Um diese Herausforderungen zukünftig ökonomisch lösen zu können, muss die Grundlage der Produktentwicklung in der Marktorientierung liegen.

Das Ziel ist durch marktorientierte Variantenvielfalt ein modulares Design der Fahrzeugkomponenten und zugehöriger Prozesse zu erreichen und durch eine bereichsübergreifende Methodik das komplexe System Gesamtfahrzeug in beherrschbare Bausteine zu zerlegen.

2 Stand der Forschung / Stand der Technik

Das Unternehmensziel muss es sein, die Systemkomplexität (Variantenvielfalt) und die damit verbundenen Herausforderungen mit Hilfe von modularisierter Produktentwicklung zu verringern.

Das Konzept der Modularisierung nimmt eine zentrale Rolle in der mit den Mass Customization zusammenhängenden Entwicklungen ein. Das Prinzip der Modularität beschreibt die Aufspaltung eines Systems in Teile oder Module, die als logische Einheiten betrachtet werden. (Jianxin, Mitchell 1999, S. 7)

In der Literatur wird eine Vielzahl von Methoden für modulares Produktdesign beschrieben. Folgende Methoden sind allgemein bekannt und werden in der Produktentwicklung eingesetzt.

Das durch Suh (2001) eingeführte Axiomatic Design ist eine Methode in der Systementwicklung, bei der auf Basis von Matrizen Kundenanforderungen in funktionelle Anforderungen, Entwicklungsparameter und Prozess Variablen übertragen werden.

Eine weitere Methode, um Modularität im Produktentwicklungsprozess zu etablieren, ist das Functional Modeling (FM). Durch die FM Methodik wird versucht, die Produktfunktionsstrukturen für das modulare Design nutzbar zu machen und in diesem Zusammenhang Strukturregeln zum Erstellen von Modulen zu extrahieren. (Hirtz u. a. 2002)

Die von Caesar (1991) beschriebene Variant mode and effect analysis beschreibt den Einfluss von Produktvarianten in allen Bereichen eines Unternehmens von Beginn bis zum Ende der Wertschöpfungskette. Die optimale Produktstruktur wird über die bestmögliche Anzahl von Teilen und Varianten bestimmt. Der Vorteil der Variant mode and effect analysis liegt in der strukturierten Variantenübersicht und einer verbesserten Kommunikation der Varianten zwischen Abteilungen.

Unterstützt werden die zuvor genannten Vorgehensweisen durch die Methode der Design Structure Matrix. Die Design Structure Matrix Methode wird angewendet, um komplexe Verbindungen und Abhängigkeiten wie z.B. Komponentenschnittstellen visuell darzustellen. (Eppinger, Browning 2012) Abschließend ist die von Erixon beschriebene Modular Function Deployment Methode (MFD) zu nennen. Die MFD Methode verfolgt den Gedanken, dass die multidimensionale Betrachtung von ökonomischen Faktoren im Zusammenhang mit der technischen Zuordnung der Funktionen eine verlässliche Grundlage für marktorientierte Produktentwicklung bildet. (Stjepandić u. a. 2015, S. 402)

Die MFD Methode basiert auf fünf Grundsritten:

Zu Beginn werden relevante Kundenanforderungen erarbeitet, um ein anforderungsgerechtes Produkt zu gewährleisten. Dieser Prozess wird nach Erixon durch den ersten Schritt der Methode des Quality Function Deployment (QFD) gewährleistet, die von Yōji Akao und Bob King entwickelt wurde.

Nach der Erarbeitung der Produktfunktionen werden diese, wie bereits in der Functional Modeling (FM) Methode aufgeführt, in Subfunktionen aufgeteilt und technischen Lösungen zugeordnet. Für jede Anforderung sind hier mehrere technische Lösungen möglich.

Darauf folgend werden über eine Module Indication Matrix (MIM) logische Module erzeugt. Dies geschieht über die Analyse der Abhängigkeiten zwischen den Modultreibern wie z.B. Varianz oder Produktentwicklung und den erarbeiteten Subfunktionen.

Neben der oben beschriebenen Analyse der Abhängigkeiten zwischen Subfunktionen und Modultreibern bietet die MIM Methode auch die Möglichkeit Funktionen zu Modulen mit Hilfe einer Schnittstellenmatrix zusammenzufassen. Hierbei werden Module anfangs in der erwarteten Konfiguration angeordnet und am Ende über die MIM in einer Schnittstellenmatrix dargestellt. Anschließend können Szenarien in Bezug auf die Änderungen von Schnittstellen oder Anordnungsmustern auf Grundlage der Schnittstellenmatrix diskutiert und bewertet werden.

Über einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess werden die entstandenen Module, die mit Hilfe von Rankingmethoden dargestellt werden können, dauerhaft verbessert. (Erixon 1998, S. 65)

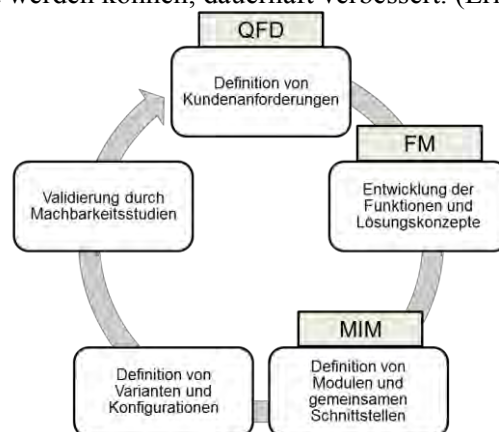


Bild 1 Grafische Darstellung der MFD Methode

Jede der beschriebenen Methoden unterstützt den Produktentwicklungsprozess im Hinblick auf die technische Umsetzung der notwendigen Modularisierung im Produktentwicklungsprozess. Jedoch sollte zukünftig im modularen Produktentwicklungsprozess eine Methodik etabliert werden, die eine gemeinsame und unternehmensweit nutzbare Grunddatenbasis für eine marktorientierte Variantenplanung schafft. Diese sowohl vom Vertrieb als auch von der Entwicklung nutzbare Datenbasis soll als Produkt einer angepassten Produktentwicklungsmethodik entstehen und kontinuierlich erweitert bzw. verbessert werden. Die aktuelle Problematik liegt in der mangelnden Verknüpfung des Marktes mit den technischen Lösungen des Unternehmens. Die daraus resultierenden Kommunikationsschleifen führen zu einer steigenden Belastung der beteiligten Abteilungen und Prozesse. Durch die steigende Anzahl von Kommunikationsschleifen wird dem Vertrieb und Verkauf das Wissensmanagement erschwert und somit die Verkaufsqualität gesenkt.

Eine gemeinsame Datenbasis als Quelle zur Abfrage von technischen Lösungen basierend auf den Kundenanforderungen steigert sowohl die Beratungsqualität des Verkaufs als auch das interdisziplinäre Produktverständnis und verkürzt vorhandene Kommunikationsschleifen.

3 Die Anwendung der abgewandelten MFD-Methode im Kontext der modularen Achsentwicklung

Basierend auf der Ausgangssituation der sich wandelnden Kundenanforderungen, der steigenden Variantenzahl und dem dadurch erhöhten internen sowie externen Kommunikationsbedarf, wird in diesem Kapitel eine neue Methodik zur Etablierung einer marktorientierten Variantenplanung beschrieben. Um die Beherrschbarkeit der Systemkomplexität zu sichern, sollte zukünftig eine unternehmensweite Methodik eingeführt werden, die sowohl den Modularisierungsgedanken trägt als auch eine gemeinsame bereichsübergreifende Datenbasis schafft. Die MFD-Methode verfolgt den Gedanken, dass verbesserte Produktmodularität den Fluss von Informationen und Materialien im Zusammenhang mit jeder beteiligten Abteilung verbessert. Die multidimensionale Betrachtung der ökonomischen Faktoren im Zusammenhang mit der technischen Zuordnung der Funktionen bildet eine verlässliche Grundlage für marktorientierte Produktentwicklung. (Stjepandić u. a. 2015, S. 403)

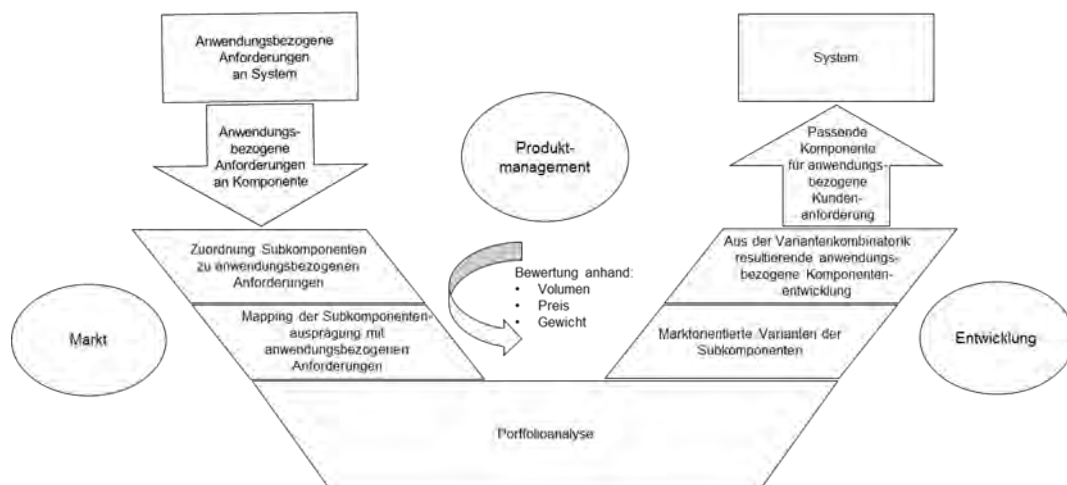


Bild 2 V-Modell marktorientierte Variantenplanung

In Bild 2 ist das V-Modell der marktorientierten Variantenplanung dargestellt, welches eine Adaption der in Bild 1 beschriebenen MFD-Methode darstellt, und darauf abzielt, die bestehenden Herausforderungen ökonomisch lösen und die aus dem Stand der Technik resultierende Forschungslücke zu füllen. Die in Bild 1 aufgezeigten fünf Prozessabschnitte sind am Beispiel der Neuentwicklung einer Achskomponente dargestellt. Im Rahmen der Modularisierung eines neu zu entwickelnden Achsmoduls wird die in Bild 2 abgebildete Methodik aktuell als Pilotprojekt angewendet, um den Blueprint-Charakter für zukünftige Entwicklungsprojekte zu analysieren. Während bei der Anforderungsdefinition vom Gesamtsystem LKW ausgegangen wurde umfasste der Projekt-Scope nur die Variantenplanung einer spezifischen Komponente, im betrachteten Fall die Hinterachse mit Fahrwerk.

3.1 Ermittlung der Kundenanforderungen und Ausprägungen

Unter dem Begriff Kundenanforderungen werden jegliche einsatzbedingte Einflüsse auf die Qualität des Fahrzeugs verstanden, die sich auf die Wahl einer Achsvariante auswirken. Die Kundenanforderungen an die Komponente Achse wurden im Rahmen des Projektes in Workshops mit Vertretern aller relevanten Unternehmensbereiche ausgearbeitet, besprochen und diskutiert. Die bereits von Erixon beschriebene Notwendigkeit einer bereichsübergreifenden Teamzusammensetzung (Erixon 1998, S. 82) ergibt sich aus dem ganzheitlichen Ansatz der Anforderungsbetrachtung. So bietet die Konsolidierung der Kundenanforderungen aus projektbeteiligten Bereichen wie z.B. dem After Sales und der Entwicklung unterschiedliche Betrachtungsweisen der Kundenwünsche. Aus diesen Sichtweisen entsteht im nächsten Schritt eine ganzheitliche Anforderungsabbildung. Das Ergebnis der eingesetzten Arbeitsgruppe resultiert in 120 für die Achse relevanten Kundenanforderungen, deren Ausprägungen jeweils durch qualitative oder quantitative Werte

beschrieben wurden. Während die technisch geprägten Anforderungen, wie beispielsweise maximales Zugsgesamtgewicht, durch quantitative Werte z.B. 40 t beschrieben werden, besitzen die ökonomischen Aspekte wie Empfindlichkeit gegenüber dem Treibstoffverbrauch einen qualitativen Charakter. Die final abgestimmten Ausprägungen leiten sich aus den technischen Anforderungen, gesetzlichen Grundlagen sowie dem Gesamtsystem LKW bestimmt durch Faktoren wie das Gewicht, dem Aufbau oder Maßen und aus dem Erfahrungsschatz der Teilnehmer ab.

3.2 Subkomponenten und deren Korrelation zu Kundenanforderungen

Der zweite Schritt der aufgezeigten Methodik beschreibt die Erzeugung von Subkomponenten der Komponente Achse und einer anschließenden Korrelationsuntersuchung mit den Kundenanforderungen.

Bei der ökonomisch und technisch sinnvollen Zerlegung der Komponenten in Subkomponenten ist es notwendig, den Erfahrungsschatz von crossfunktionalen Teams voll auszuschöpfen, um den Erfolg der Methodik zu gewährleisten.

Die Kundenanforderungen werden unter Berücksichtigung ihres Zusammenhangs mit den Subkomponenten untersucht. Hierbei kann eine Kundenanforderung mit mehreren Subkomponenten zusammenhängen. Die Kundenanforderung bezogen auf die Straßenunebenheit korreliert sowohl mit dem Achsgehäuse, als auch mit dem Fahrniveau, dem Fahrwerk und verwendeten Stoßdämpfern. Umgekehrt ist es ebenfalls möglich, dass mehrere Kundenanforderungen nur im Zusammenspiel eine eindeutige Korrelation mit der Subkomponente ergeben. In diesem Zusammenhang wird es beispielsweise als sinnvoll erachtet, die Korrelationsuntersuchung der Straßenunebenheit mit der Kundenanforderung des Fahrerkomforts bezogen auf Vibrationen zu verbinden.

Die Korrelationsuntersuchung zwischen den in Schritt eins gesammelten Kundenanforderungen und den ermittelten Subkomponenten führen zu einer Korrelationsmatrix. Diese Korrelationsmatrix beschreibt die funktionellen Einflüsse der Kundenanforderungen auf die jeweilige Subkomponente.

	SK1	SK2	SK3
KA1	C	C	
KA2		C	
KA3		C	C

Bild 3 Korrelationsmatrix der Kundenanforderungen mit Subkomponenten

In Bild 3 ist ein abstrahiertes Modell der beschriebenen Korrelationsmatrix dargestellt. Während die Zeilenbeschriftung KA[n] die jeweilige Kundenanforderung bezeichnet, werden in der Spaltenbeschriftung über SK[n] die zuvor ermittelten Subkomponenten aufgetragen. Das crossfunktional aufgestellte Team ermittelt auf Basis der Erfahrungswerte und physikalischen Begebenheiten Korrelationen, die in der Matrix über ein „C“ dargestellt werden. Die generische Erzeugung der Subkomponenten ist ein iterativer Prozess, der basierend auf den erarbeiteten Erkenntnissen dynamisch angepasst werden kann. Gerade in Bezug auf die Praxis ist eine Ausarbeitung dieser Korrelationen für die spätere Konzeptgenerierung und anschließende Entwicklung der Subkomponenten von hoher Bedeutung, da nicht beachtete Kundenanforderungen oder falsch angenommene Korrelationen mit jedem weiteren Schritt in der Methodik einen erheblichen Mehraufwand bedeuten.

3.3 Definition der Schnittstellen

Der Erfolg von modularen Konzepten hängt maßgeblich von der Anzahl und der exakten Definition der verwendeten Schnittstellen ab (Göpfert, Steinbrecher 2000, S. 3). Je höher die Zahl der Subkomponenten desto herausfordernder ist die Entwicklung genau definierter Schnittstellen. Die durch Erixon vorgeschlagene Module Indication Matrix (MIM) bietet neben der Modulerzeugung ebenfalls die Möglichkeit, Funktionen zu Modulen mit Hilfe einer Schnittstellenmatrix zusammenzufassen. Hierbei werden Module anfangs in der erwarteten Konfiguration angeordnet und abschließend über die MIM in einer Schnittstellenmatrix dargestellt. Anschließend werden mögliche

Änderungen von Schnittstellen oder Anordnungsmustern auf Grundlage der Schnittstellenmatrix diskutiert und bewertet. (Erixon 1998, S. 65)

3.4 Konzeptgenerierung über eine dreidimensionale Korrelationszuordnung

Die theoretische Konzeptgenerierung basiert auf der Erstellung einer dreidimensionalen Zuordnung der Subkomponentenvariante oder auch Ausprägung zu den Kundenanforderungen, aufbauend auf der in 3.2 beschriebenen Basis der Korrelationsuntersuchung zwischen Subkomponenten und Kundenanforderungen. Unter einer Subkomponentenausprägung wird eine für den Kunden relevante Variante der Subkomponente wie z.B. des Achsgetriebes mit verschiedenen Leistungsstufen bzgl. der Drehmomentübertragung und den Übersetzungen 2,1 bis 5,8 verstanden. In der Praxis wurden nach diesem Prinzip zukünftige, im Rahmen der neuen Achsentwicklung relevante, Varianten der Subkomponenten in Workshops erarbeitet. Die Ergebnisse basieren auf dem Abgleich zwischen Kundenforderungen und der Möglichkeit der technischen Umsetzung, durchgeführt durch Experten des Vertriebs und der Achsentwicklung sowie koordiniert durch das Produktmanagement. Die Verbindung von Kundenanforderungen mit den Ausprägungen der Subkomponenten wird über eine Korrelations-Verhältnis-Matrix (K-V-Matrix) dargestellt, basierend auf den Erkenntnissen nach Bongulielmi (2002). Die systemische Basis bildet die K-Matrix. In dieser Matrix werden die Subkomponenten SK[n] mit den erarbeiteten Ausprägungen SK[n]A[m] auf Subkomponentenebene und die Kundenanforderungen KA[n] mit den Ausprägungen KA[n]A[m] auf Anforderungsebene definiert. Der Erfüllungsgrad der Subkomponentenausprägung KA[n]A[m] in Verbindung mit der jeweiligen betrachteten Ausprägung der Anforderung KA[n]A[m] wird über einen Bewertungsmaßstab beschrieben, um eine mehrstufige Abgrenzung der Ausprägungserfüllung darzustellen. Die Korrelation wird eindimensional über die Deklarationen „empfohlen bzw. recommended (R)“, „technisch möglich bzw. possible (P)“ und „nicht möglich bzw. not possible (NP)“ beschrieben. In diesem Schritt werden die bereits vorliegenden Ergebnisse aus 3.1 bis 3.3 konsolidiert und eine bereichsübergreifend nutzbare Datenbank erzeugt. Bild 4 beschreibt eine modellhafte Darstellung der K-Matrix, basierend auf der über den Ausprägungsgrad definierten Korrelation zwischen Kundenanforderung und Subkomponenten. Als Beispiel wäre zu nennen, dass das dritte Ausprägungsmerkmal der Kundenanforderung (wie z.B. KA1 = Topografie, KA1A3 = sehr hügelig) aufgrund der NP Deklaration nicht über die dritte Variante der Subkomponente eins (SK1 = Achsgetriebe, SK1A3 = 1,9) realisiert werden kann.

		SK1			SK2		
		SK1A1	SK1A2	SK1A3	SK2A1	SK2A2	SK2A3
KA1	KA1A1	R	R	P	R	R	R
	KA1A2	R	P	P	R	R	P
	KA1A3	R	P	NP	R	P	P
KA2	KA2A1	R	R	R	R	R	P
	KA2A2	R	R	P	R	P	P
	KA2A3	R	P	P	R	P	NP

Bild 4 Modellhafte K-Matrix der dreidimensionalen Zuordnung

Über diese Methodik ergeben sich über eine Auswahl von Kundenanforderung auf den Deklarationen basierende Empfehlungen von mindestens zwei zu wählenden Subkomponenten. Um diese Empfehlungen mit einem technischen Kombinatorikregelwerk abzugleichen, benötigt es eine Verhältnismatrix (V-Matrix), die über binäre Zuordnung die Schnittstellen in Matrizenform darstellt.

SK1			SK2				
SK1A1	SK1A2	SK1A3	SK2A1	SK2A2	SK2A3		
			1	1	0	SK1A1	SK1
			1	0	1	SK1A2	
			1	1	1	SK1A3	
1	1	0				SK2A1	SK2
0	0	1				SK2A2	
1	0	1				SK2A3	

Bild 5 Modellhafte V-Matrix der Schnittstellen

Eine mit 1 gekennzeichnete Korrelation zwischen den Subkomponentenausprägungen beschreibt eine eindeutige Subkomponentenkombination während eine Null diese ausschließt. Nach dieser Logik ist die Ausprägung SK2A3 (z.B. SK2 = Achsgetriebe, SK2A3 = z.B. 2,1) mit den Ausprägungen SK1A2 (z.B. SK1 = Achsgehäuse, SK1A2 = Achsgehäuse 2) und SK1A3 (SK1A3 = Achsgehäuse 3) technisch möglich.

Um eine ganzheitliche Datenbasis zu schaffen wird die in Bild 4 beschriebene K-Matrix mit der in Bild 5 aufgezeigten V-Matrix in einer K-V-Matrix (Bild 6) konsolidiert.

			1	1	0	SK1A1	SK1	
			1	0	1	SK1A2		
			1	1	1	SK1A3		
SK2	1	1	0				SK2A1	
	0	0	1				SK2A2	
	1	0	1				SK2A3	
			SK1			SK2		
			SK1A1	SK1A2	SK1A3	SK2A1	SK2A2	SK2A3
KA1	KA1A1	R	R	P	R	R	R	
	KA1A2	R	P	P	R	R	P	
	KA1A3	R	P	NP	R	P	P	
KA2	KA2A1	R	R	R	R	R	P	
	KA2A2	R	R	P	R	P	P	
	KA2A3	R	P	P	R	P	NP	

Bild 6 Modellhafte Darstellung eines K-V-Matrix Systems

Die K-V-Matrix ermöglicht dem Anwender die Verbindung zwischen V-Matrix wie z.B. technische Kombinatoriken und abhängige Kundenanforderungen über eine K-Matrix.

Die K-V-Matrix beschreibt eine bereichsübergreifend nutzbare Datenbasis, die dynamisch verbessert und angepasst werden kann.

3.5 Bewertung der Konzepte und Empfehlung für den Kunden

Die unter 3.4 generierten Korrelationen zwischen Subkomponenten und Anforderungen werden unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit und technischen Umsetzung analysiert und bewertet. Hierfür eignen sich die bereits von Erixon vorgeschlagenen Rankingmethoden. (Erixon 1998, S. 83–85)

Durch diese Methodik wird eine bereichsübergreifend nutzbare Datenbasis geschaffen, die umfassend alle gesammelten Ergebnisse beinhaltet. Diese dynamisch veränderbare Auflistung schafft somit eine Portfoliübersicht, die sowohl die Perspektiven der Technik als auch des Vertriebs vertritt. Durch die Auseinandersetzung und Anwendung der Methodik entwickeln die Teammitglieder ein tiefes Produktverständnis, durch welches Raum für Kreativität und damit verbundene innovative Ideen gefördert werden.

Eine verlässliche, auf den Kundenanforderungen fundierte, Komponentenempfehlung auf Basis der in Bild 6 beschriebenen K-V-Matrix wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie überprüft und validiert. Die Entwicklung eines Hilfstools bestätigt die Annahme, dass über die beschriebene Methodik und die dadurch erzeugte Datenbasis eine auf den Kundenanforderungen basierende Komponentenempfehlung ausgesprochen werden kann und somit eine marktorientierte Variantenplanung möglich ist. Die Methodik fungiert damit nachweislich als gemeinsame Sprache zwischen technischen Lösungen und Marktanforderungen.

4 Voraussetzungen für die Methodik und Blueprint-Charakter der erzeugten Daten anhand eines Konfiguratormodells

Um den Erfolg von zukünftigen Modularisierungsprojekten zu gewährleisten wird im Rahmen des Pilotprojektes der Blueprint-Charakter der angewandten Methodik untersucht. Die durch Erixon definierten Voraussetzungen sollten als Grundlage beachtet und in der Vorplanung der Methodik etabliert werden. (Erixon 1998, S. 67; Erixon 1998, S. 69–71; Erixon 1998, S. 82) Sowohl die Interdisziplinarität des eingesetzten Teams als auch das Methodenverständnis und die Erfahrungskompetenz der Teammitglieder sind für das Ergebnis ausschlaggebende Qualitätsfaktoren.

Eine genaue und umfassende Definition der Kundenanforderungen sowie der zugehörigen Ausprägungen, unterstützt durch die QFD-Methode, schafft eine solide Ausgangsbasis für den erfolgreichen Methodenverlauf. Für die unter 3.4 beschriebene Konzeptgestaltung sollten die Ausprägungen der Kundenanforderungen genauen Maßstäben entsprechen, um die passende Zuordnung von Kundenanforderungen zu Subkomponenten zu gewährleisten. Vor allem qualitative Ausprägungen von Kundenanforderungen führten während der Zuordnungsphase von Subkomponenten zu Kundenanforderungen zu Unklarheiten.

Beispielsweise beschreiben aktuell die Ausprägungsstufen „glatt“, „uneben“, „sehr uneben“ und „extrem uneben“ die Kundenanforderung bezüglich der Straßenunebenheit. Aufgrund des qualitativen Charakters dieser Ausprägungsstufen konnten die Fachexperten keine klare Eingrenzung der technischen Lösungen vornehmen, da die dazu notwendige Quantifizierung nicht gegeben war. Die agile Quantifizierung von qualitativen Ausprägungsmerkmalen verringert nachfolgende Unklarheiten während der Zuordnung der Subkomponenten. Diese sollten sowohl nach Komplexität der Gesamtkomponente als auch unter Berücksichtigung der benötigten Schnittstellenanzahl sinnvoll durch Expertengruppen definiert werden. Die Ergebnisse der Abstimmungsrunden des bereichsübergreifenden Teams sollten in jedem Workshop standardisiert dokumentiert und abgelegt werden.

Der Erfolg einer neu eingeführten Methodik basiert auf dem Methodenverständnis jedes Teammitgliedes, einer stringenten Vorgehensweise, der exakten Dokumentation aller Ergebnisse und einem passenden Durchführungszeitraum. Die Erprobung der angewandten Methodik empfiehlt sich für Projekte, die sich durch eine geringe Gesamtkomplexität auszeichnen, da die Lernkurve während der Methodenanwendung zwar steil ansteigt, sich jedoch für die Erstanwendung auf strategische und komplexe Projekte als herausfordernd darstellen kann. Sobald die Methodik jedoch standardisiert im Unternehmen angewendet werden kann, eignet sich diese über das gesamte Komponentenportfolio mittels einer übergreifenden Datenbasis als Fundament für einen zielgerichteten und marktorientierten Produktentstehungsprozess.

Basierend auf diesen Voraussetzungen wurde die erzeugten Daten im Rahmen eine Machbarkeitsstudie mit Hilfe eines auf dem K-V-Matrix System basierenden Demonstrators untersucht. Der Fokus dieser Studie lag auf dem Nachweis, dass über die methodisch erzeugten Ergebnisse eine passende Komponente basierend auf den Kundenanforderungen ausgewählt und dem Benutzer mit dem zugehörigen Ausprägungsgrad vorgeschlagen werden kann. Über die Verwendung des mit VBA programmierten Demonstrators (Bild 7) konnten die beteiligten Bereiche die Konzeptgenerierung und fehlerhaft zugeordnete Ausprägungen der K-Matrix (Bild 4) identifizieren und diskutieren.

Wie wünschen Sie Ihr Fahrzeug zu konfigurieren?



Bei dieser Auswahl besteht die Möglichkeit, die Komponenten ohne Befragung zu wählen. Diese Variante eignet sich vor allem für Kunden mit einem fundierten technischen Hintergrund oder einem besonderen Komponentenwunsch.



Bei der Befragung über die Kundenanforderungen wird dem Kunden eine Auswahl von Fragen präsentiert, die durch Beantwortung zu den passenden Komponenten führt. Diese Variante ist empfohlen, wenn der Kunde stark anwendungsbezogene Vorschläge generieren oder ein Beispielfahrzeug für eine neue Transportaufgabe konfigurieren will.

Bild 7 Konfigurationsauswahl Demonstrator

Vertriebsseitig wurde über den modellhaften Demonstrator ein Einblick geschaffen, inwieweit entwicklungsbasierendes Komponentenwissen über eine gemeinsame Datenbasis für die Kundenberatung verfügbar gemacht werden kann. Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch die gemeinsame und bereichsübergreifend nutzbare Datenbasis der beidseitige Fluss von Informationen zwischen Kunden und technischer Lösung verkürzt und optimiert wird. Somit ist bewiesen, dass die sich stellenden Herausforderungen der Variantenvielfalt, der erschwerten Kommunikation und der geringeren Portfolioübersicht, sich effektiv und effizient über eine problemgerechte Adaption der MFD-Methode lösen lassen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die bestehenden Herausforderungen der steigenden Variantenanzahl und der damit verbundenen Portfoliokomplexität sowie des erhöhten Kommunikationsbedarfs können über einen MFD-basierten Ansatz effizient gelöst werden. Die gemeinsame und bereichsübergreifend nutzbare Datenbasis bietet die Grundlage für ein bereichsübergreifendes Verständnis der Varianten und kann über Softwaresysteme zu einer effizienten Portfolioverwaltung weiterverwendet werden. Das notwendige tiefe Produkt- und Methodenverständnis der interdisziplinären Teammitglieder wird durch die Analyse- und Syntheszyklen im Anwendungsprozess der Methodik generiert. Diese Zyklen werden über die gemeinsame Datenbasis über den Konfigurationsprozess validiert und bilden somit eine agile Qualitätsprüfung der erarbeiteten Ergebnisse.

Zusammenfassend unterstützt die gewählte und adaptierte Methode bei der Lösung aktueller und zukünftig durch den Individualisierungswunsch des Kunden auftretender Herausforderungen. Jedoch ist zu prüfen, bis zu welcher Komplexität der zu entwickelnden Komponente die Methodik ökonomisch angewendet werden kann. Bereits während des laufenden Projektes konnten Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge für weitere Projekte dokumentiert werden. Die parallele Methodensensibilisierung der teilnehmenden Bereiche etabliert das vorausgesetzte tiefe Methodenverständnis und gleichzeitige unternehmensweite Akzeptanz des neuen Denkansatzes. Auch zukünftig werden die Kunden individuelle und weitgefächerte Anforderungen an die Produkte von heutigen Unternehmen stellen. Sowohl der Modularisierungsgedanke als auch die methodische Verbindung von bestehendem Wissen mit externer Kundenkommunikation werden zukünftig weiterhin eine wichtige Rolle in Bezug auf den Unternehmenserfolg spielen. Die Fähigkeit, zeitnah über marktorientierte Varianten anforderungsgerecht auf Kundenanfragen zu reagieren, stellt einen wichtigen Erfolgsfaktor aus heutiger Marktsicht dar. Die gewählte Methodik generiert durch ihren Ansatz aus anwendungsbezogenen Anforderungen marktgerechte Komponenten, die dem Individualisierungswunsch des Kunden gerecht werden.

Literaturverzeichnis

- AL-ZAHER, A. ; ELMARAGAHY, W. ; PASEK, Z. J.: Enabling Car Body Customization through Automotive Framing System Design. In: *Enabling Car Body Customization through Automotive Framing System Design*, 2011, S. 446–447
- BONGULIELMI, Luca: *Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule. Dissertation. 2002
- CAESAR, Christoph: *Kostenorientierte Gestaltungsmethodik für variantenreiche Serienprodukte : Variant Mode and Effects Analysis (VMEA)*. Aachen, Technische Hochschule. Dissertation. 1991
- EPPINGER, Steven D. ; BROWNING, Tyson R.: *Design Structure Matrix Methods and Applications* : MIT University Press Group Ltd, 2012
- ERIXON, Gunnar: *Modular Function Deployment - A Method for Product Modularisation*. Stockholm, The Royal Institute of Technology. 1998
- GÖPFERT, Jan ; STEINBRECHER, Michael: *Modulare Produktentwicklung leistet mehr : Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen*. In: *Harvard Business Manager* (2000), Nr. 3, S. 1–17
- HIRTZ, Julie ; STONE, Robert B. ; MCADAMS, Daniel A. ; SZYKMAN, Simon ; WOOD, Kristin L.: *A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts*. In: *NIST Technical Note* (2002), Nr. 1447
- JIANXIN, Jiao ; MITCHELL, M. Tseng: *A methodology of developing product family architecture for mass customization*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* (1999), Nr. 10, S. 3–20
- KESPER, Heiner: *Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden*. München, Technische Universität. Dissertation. 16.04.2012
- PILLER, Frank Thomas: *Mass Customization : in wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. In: PICOT, Arnold; REICHWALD, Ralf; FRANCK, Egon (Hrsg.): *Markt- und Unternehmensentwicklung*. 4. Aufl. Wiesbaden : Deutsche Universitäts-Verlag, 2006, S. 1–425
- SPATH, Dieter ; STERNEMANN, Karl-Heinz: *The Operating Models of Tomorrow Require New Control Concepts Today*. In: KOVÁCS, George L.; BERTÓK, Peter; HAIDEGGER, Géza (Hrsg.): *Digital Enterprise Challenges : Life-Cycle Approach to Management and Production* : Springer, 2013, S. 494–505
- STJEPANDIĆ, Josip ; OSTROSI, Egon ; FOUGÈRES, Alain-Jérôme ; KURTH, Martin: *Modularity and support Tools and Methods*. In: STJEPANDIĆ, Josip; WOGNUM, Nel; VERHAGEN, Wim J.C. (Hrsg.): *Concurrent Engineering in the 21st Century : Foundations, Developments, Challenges* : Springer International Publishing AG Switzerland, 2015, 389-420
- SUH, Nam Pyo: *Axiomatic Design : Advances and Applications*. New York : Oxford University Press, 2001

Suche nach neuen Lösungsansätzen zur Losteilgeräuschreduktion bei Doppelkupplungsgetrieben

Benjamin Heumesser¹, Bernd Bertsche²,

¹Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, Deutschland
benjamin.heumesser@ima.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, Deutschland
bernd.bertsche@ima.uni-stuttgart.de

Abstract: Losteilgeräusche kommen prinzipbedingt bei allen mehrgängigen Getrieben in Stirnradbauweise vor und stellen ein Komfortproblem dar. Im vorliegenden Beitrag wird am Beispiel der Losteilgeräuschreduktion bei Doppelkupplungsgetrieben ein Vorgehenszyklus vorgestellt, um neue Lösungsansätze zu generieren. Der Vorgehenszyklus beruht auf der Kombination von Systemelementen mit Wirkprinzipien. Die Grundlage dabei bildet eine Systemanalyse und eine Problemanalyse. Mit Auswahl- und Bewertungsverfahren werden letztlich aus den Kombinationen erfolgversprechende Lösungskonzepte abgeleitet. Der vorgestellte Zyklus ist darauf ausgerichtet, Lösungen für Probleme in bestehenden Systemen zu erarbeiten. Er kann ohne weiteres auf andere Probleme und in anderen Systemen angewendet werden. Der Zyklus liefert Lösungsprinzipien und Lösungskonzepte und stellt damit eine mögliche Alternative für die Abschnitte 1 bis 3 der methodischen Produktentwicklung nach VDI 2221 dar.

Keywords:

Konzepterstellung, Losteilgeräuschreduktion, Doppelkupplungsgetriebe

1 Losteilgeräusche

Neben den Antriebs-, Reifenabroll- und Windgeräuschen ist das Getriebe eine bedeutsame Geräuschquelle im Fahrzeug (Zeller 2009). Es wird unterschieden in Heul- und Pfeifgeräusche, welche durch Schwingungen belasteter Zahnräder entstehen, Lastwechselanschlaggeräuschen, die bei beginnender oder endender Verspannung von spielbehafteten Bauteilen entstehen, Schaltgeräuschen bei mangelnder Funktion der Synchronisierung, Lagergeräuschen durch defekte Lager und Losteilgeräuschen (Dogan 2001). Zu Losteilgeräuschen kommt es, wenn unbelastete, spielbehaftete Bauteile im Getriebe zu Schwingungen angeregt werden und an ihren Spielgrenzen anschlagen. Zu den Losteilen zählen neben den Losrädern auch Synchronringe und Schaltmuffen von nicht geschalteten Gängen. Da die Losteile durch das Anschlagen in ihren jeweiligen Eigenfrequenzen schwingen, handelt es sich bei Losteilgeräuschen im Gegensatz zu den Heul- und Pfeifgeräuschen um ein breitbandiges Geräusch. Losteilgeräusche werden aufgrund ihrer lästigen Charakteristik und aufgrund der Tatsache, dass sie nur in bestimmten Betriebsbereichen auftauchen als sehr störend empfunden. Sie stellen damit ein Komfortproblem dar. Je nach Last- und Betriebszustand werden Losteilgeräusche als Klappern oder Rasseln bezeichnet. Von Klappern wird im Leerlauf gesprochen, von Zug- oder Schubrasseln dagegen bei eingelegetem Gang.

1.1 Schwingungsanregung

Die wichtigste Erregerquelle von Torsionsschwingungen in Antriebssträngen ist der Verbrennungsmotor. Anders als beispielsweise bei Gasturbinen wird die Energie beim Otto- oder Dieselmotor nicht von einem kontinuierlichen Verbrennungsvorgang erzeugt, sondern diskontinuierlich durch Einzelzündungen. Die so entstehenden pulsierenden Gaskräfte werden auf die Kurbelwelle übertragen und bewirken dort ein ebenfalls pulsierendes Moment. Auch der Kurbeltrieb führt aufgrund von ungleichmäßig beschleunigten und unausgeglichenen Massen zu Drehschwingungen der Kurbelwelle. Beide Effekte, die Drehschwingungsanregung aufgrund von Gas- und Massekräften, überlagern sich. Bei

niedrigeren Drehzahlen überwiegt der Einfluss der Gaskräfte, bei hohen Drehzahlen dominieren jedoch die Massenkkräfte die Drehschwingung (Rach 1998). Maßnahmen, um den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zu steigern, wie beispielsweise das Downsizing oder das Downspeeding, führen zu einer erheblichen Zunahme der Drehungleichförmigkeit (Boussuge und Hervet 2009).

Neben der Anregung über die Getriebeeingangswelle kommt es auch zu Schwingungsanregungen über die Abtriebsseite. Beispielsweise führen Gelenkwellen mit Kardangelenken zum Übertragen des Moments am Getriebeausgang aufgrund ihrer Kinematik zu einer Schwingungsanregung 2. Ordnung. Die Amplitude der Schwingung ist abhängig vom Beugewinkel der Gelenke. Die Schwingungen der beiden Kardangelenke einer Gelenkwelle überlagern sich in jedem Betriebspunkt. Normalerweise ist es dadurch möglich, ein Teil der Schwingung zu kompensieren. Vor allem bei falsch montierten Gelenkwellen addieren sich jedoch die Amplituden der Drehungleichförmigkeiten. Wie von Tasche (Tasche 2009) in einer Mehrkörpersimulation nachgewiesen wurde, kommt es aber auch bei korrekt montierten Kardangelenkwellen zur Schwingungsanregung, da sich die Schwingungen durch die Trägheit der Gelenke sowie der Zwischenwelle, vor allem bei höheren Drehzahlen, nicht komplett kompensieren.

Auch Nebenabtriebe können zu Torsionsschwingungen im Antriebsstrang führen. Bühl (Bühl 2015) beschreibt Klapperphänomene bei Nutzfahrzeug-Getrieben mit kupplungsabhängigem Nebenabtrieb (PTO, Power Take Off). Durch das Moment am PTO wird die Kupplung belastet und in ihrem steifen Hauptdämpfer betrieben. So werden Torsionsschwingungen des Motors nicht mehr gedämpft, sondern in das Getriebe eingeleitet. Die Folge sind deutliche Klappergeräusche im Getriebe.

Zuletzt kann die Ursache für Drehschwingungen im Antriebsstrang auch an einer unebenen Fahrbahn liegen. Gipser (Gipser 1999) untersuchte die Reaktionskräfte auf ein Rad beim Überfahren von verschiedenen Hindernissen. Aus seinen Ergebnissen lassen sich am Rad Anregungen von mehreren hundert rad/s^2 abschätzen. Die Seitenwellen leitet diese Schwingungen in das Getriebe ein und regen es damit von der Abtriebsseite her zu Losteilschwingungen an.

1.2 Losteilgeräusche bei Doppelkupplungsgetrieben

Doppelkupplungsgetriebe (DCT, Dual-Clutch-Transmission) neigen, wie alle Stirnradgetriebe, zu Klapper- und Rasselgeräuschen. Es gibt aber im Vergleich zu automatisierten Schaltgetrieben oder Handschaltgetrieben bei den Doppelkupplungsgetrieben einige Besonderheiten.

Doppelkupplungsgetriebe sind Automatgetriebe, die aus zwei Teilgetrieben aufgebaut sind. In einem Teilgetriebe befinden sich die ungeraden Gänge (1, 3, 5, ...), im anderen Teilgetriebe die geraden Gänge (2, 4, 6, ...). Jedes Teilgetriebe besitzt eine eigene Kupplung. Während ein Gang im aktiven Teilgetriebe eingelegt und die entsprechende Kupplung geschlossen ist, kann im passiven Teilgetriebe, bei geöffneter Kupplung, der nächste Gang schon vorgewählt werden. Der eigentliche Schaltvorgang erfolgt durch einen Wechsel der Kupplungen. Dieser Wechsel findet durch eine Überschneidungsschaltung der beiden Kupplungen ohne Unterbrechung der Zugkraft statt. In Bezug auf Losteilgeräusche ist vor allem das passive Teilgetriebe interessant. Dieses passive Teilgetriebe wird, aufgrund der offenen Kupplung, zwar nicht direkt vom Motor angeregt, jedoch werden die Schwingungen vom Abtrieb des aktiven Teilgetriebes eingeleitet. Es kommt gang- und vorwählabhängig zu langen Losteilketten, die bei anderen Getriebebauarten in dieser Weise nicht vorhanden sind. Ebenfalls interessant ist die extrem laute Rasselstelle am vorgewählten Gang selbst. Hier schwingt die Getriebeeingangswelle des passiven Teilgetriebes samt Kupplungsscheibe gegen den Getriebeabtrieb.

1.3 Maßnahmen zum Minimieren von Losteilgeräuschen

In der Literatur und entsprechenden Patentmeldungen sind einige Maßnahmen gegen Losteilgeräusche bekannt. Das Zweimassenschwungrad (ZMS) (DE 4206921 B4), als Weiterentwicklung der direkt in die Kupplungsscheibe integrierten Feder-Dämpfer-Systeme, senkt die Eigenfrequenz des Antriebsstrangs unter die Leerlauf Frequenz des Motors. Es wirkt als Tiefpassfilter gegen die motorseitigen Anregungen. Die aktuellen Entwicklungen bei den Motoren, vor allem das Downsizing und Downspeeding führen allerdings dazu, dass das ZMS an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit stößt (Pfleghaar 2014). Für Schwingungsanregungen, deren Ursprung nicht im Verbrennungsmotor liegt, ist das ZMS aufgrund seiner Position ohnehin wirkungslos. Weitere Nachteile des ZMS sind neben

Kosten und Bauraum, dessen hohe Trägheit, die gerade bei sportlichen Fahrzeugen unerwünscht ist, sowie die Verlustleistung, die auch in rasselunkritischen Betriebsbereichen entsteht.

Eine andere Maßnahme gegen Losteilgeräusche stellt Weidner (Weidner 1991) vor. Hier wird axial am Losrad eine zusätzliche Zahnscheibe drehbar gelagert. Sie ist ebenfalls mit der Verzahnung des Festrades in Eingriff, besitzt jedoch einen Zahn mehr als das Losrad. Es ergibt sich demnach eine Drehzahldifferenz zwischen Losrad und Zahnscheibe. Die Zahnscheibe wird mit einer Feder an das Losrad gepresst. Das dadurch entstehende Reibmoment bremst das Losrad ab, verspannt somit die Verzahnung und verhindert letztlich Losteilgeräusche. Allerdings senkt die Maßnahme in den meisten Betriebsbereichen unnötigerweise den Wirkungsgrad des Getriebes.

Eine dritte Möglichkeit beruht auf der Festridentkopplung und wurde von Stockmeier (Stockmeier 2008) und Novak (Novak 2010) vorgestellt. Werden alle Festräder durch Losräder ersetzt, gibt es bis auf das Klappern bzw. Rasseln von Synchronringen oder Schiebemuffen keine Losteilgeräusche mehr. Es können auch einzelne Festräder in einem Getriebe als Losräder ausgeführt werden, um die Anzahl der Klapper- oder Rasselstellen zu reduzieren. Nachteile der Festridentkopplung sind vor allem die höheren Kosten sowie die aufwendige Aktorik. Bei DCT kommt als weiterer Nachteil hinzu, dass der vorgewählte Gang nicht entkoppelt werden kann, wenn zugkraftunterbrechungsfrei geschaltet werden soll.

Es bleibt festzuhalten, dass es zwar einige Lösungsansätze gegen Losteilgeräusche gibt. Jedoch bis auf das ZMS kaum ein Konzept in der Serie Anwendung findet. Die Maßnahmen wirken sich meist negativ auf den Wirkungsgrad aus, was gerade in Zeiten strenger CO₂ Regulierungen nicht in Kauf genommen wird. Bei Bedarf zuschaltbare Maßnahmen scheitern beim Handschaltgetriebe meist an den Kosten für die zusätzlich nötigen Sensoren, Aktoren und Steuergeräte. Das DCT bietet in diesem Zusammenhang bessere Rahmenbedingungen. Sensoren, Aktoren und Steuergerät sind hier bereits vorhanden. Dadurch sind neue Antiklapper- bzw. Antirasselmaßnahmen denkbar. In diesem Beitrag wird ein Ablaufplan vorgestellt, um hierfür neue Konzepte zu finden.

2 Ablaufplan für neue Ansätze

In Bild 1 ist der Ablaufplan schematisch dargestellt. Er wird von oben nach unten durchlaufen. Im ersten Schritt findet die Systemanalyse statt. Das System „Doppelkupplungsgetriebe“ wird auf Ebene der Bauteile und Bauteilschnittstellen untersucht.

Parallel zur Systemanalyse findet die Wirkanalyse statt. Aus vorhandenen Lösungen, Patenten und Veröffentlichungen wird ein Ordnungsschema abgeleitet. Jede bekannte Maßnahme gegen Losteilgeräusche lässt sich mit den Kriterien des Ordnungsschemas beschreiben.

Es folgt die erste Lösungskombination. Die Bauteile und Bauteilschnittstellen werden mit den Einträgen des Ordnungsschemas kombiniert. Von vornherein undenkbare Lösungskombinationen werden mit einer Auswahlliste herausgefiltert. Sinnvollerweise wird hier in mehreren Schritten der Detaillierungsgrad des Ordnungsschemas sowie der Systemanalyse gesteigert.

Nach dieser ersten Auswahl steht eine Vielzahl an denkbaren Lösungskombinationen zur Verfügung. Im folgenden Schritt müssen diese lösungsneutral formulierten Ideen konkretisiert werden. Die Anzahl der Lösungen steigt damit wieder an, da für eine lösungsneutrale Formulierung mehrere lösungsorientierte Formulierungen möglich sein können. Im Allgemeinen liegen nun sehr viele Lösungsideen vor, die mit einem einfachen und somit effektiven Bewertungsverfahren bewertet werden müssen. Als Ergebnis dieses Schrittes entsteht eine Rangliste von vielversprechenden Lösungen. Eine Auswahl dieser Rangliste kann im Folgenden weiter konzipiert, ausgearbeitet und zuletzt validiert werden.

2.1 Systemanalyse - Doppelkupplungsgetriebe

Zur Analyse eines Systems wird ein Bauteilblockdiagramm nach Bertsche (Bertsche 2004) verwendet. In diesem Bauteilblockdiagramm werden alle Bauteile des Systems sowie ihre Bauteilschnittstellen dargestellt. Der Aufbau des Bauteilblockdiagramms sollte dabei möglichst dem Aufbau der Konstruktion entsprechen. Dadurch wird gewährleistet, dass das System in seiner Gesamtheit verstanden wird. Dieser Systemüberblick ist als Grundlage für die folgende Lösungserarbeitung unabdinglich.

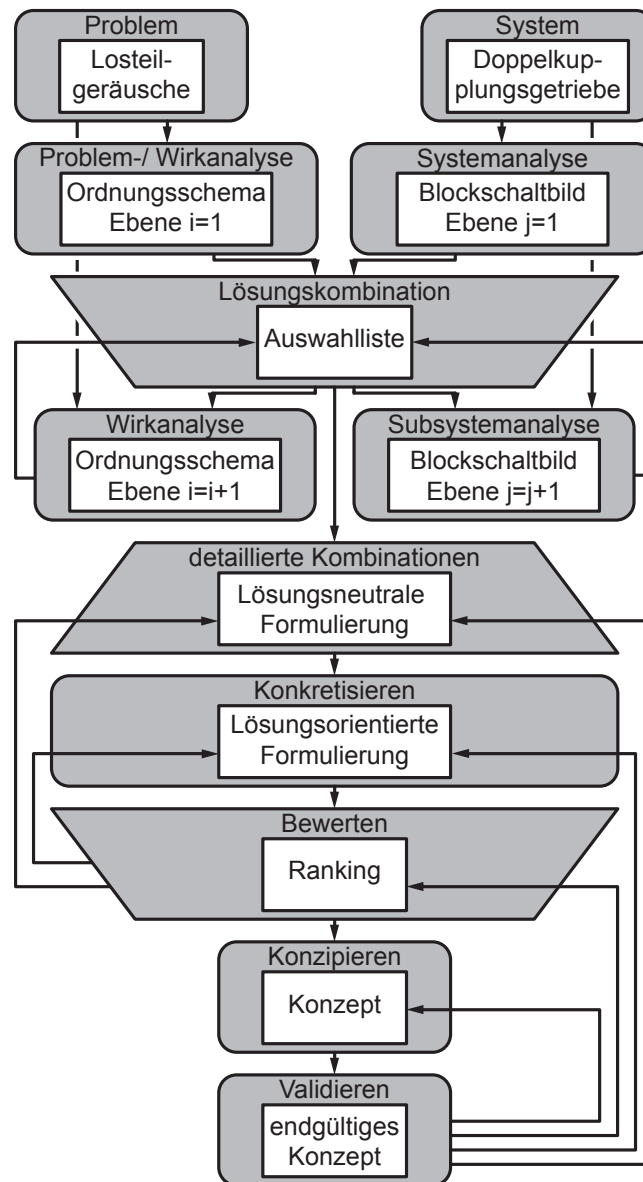
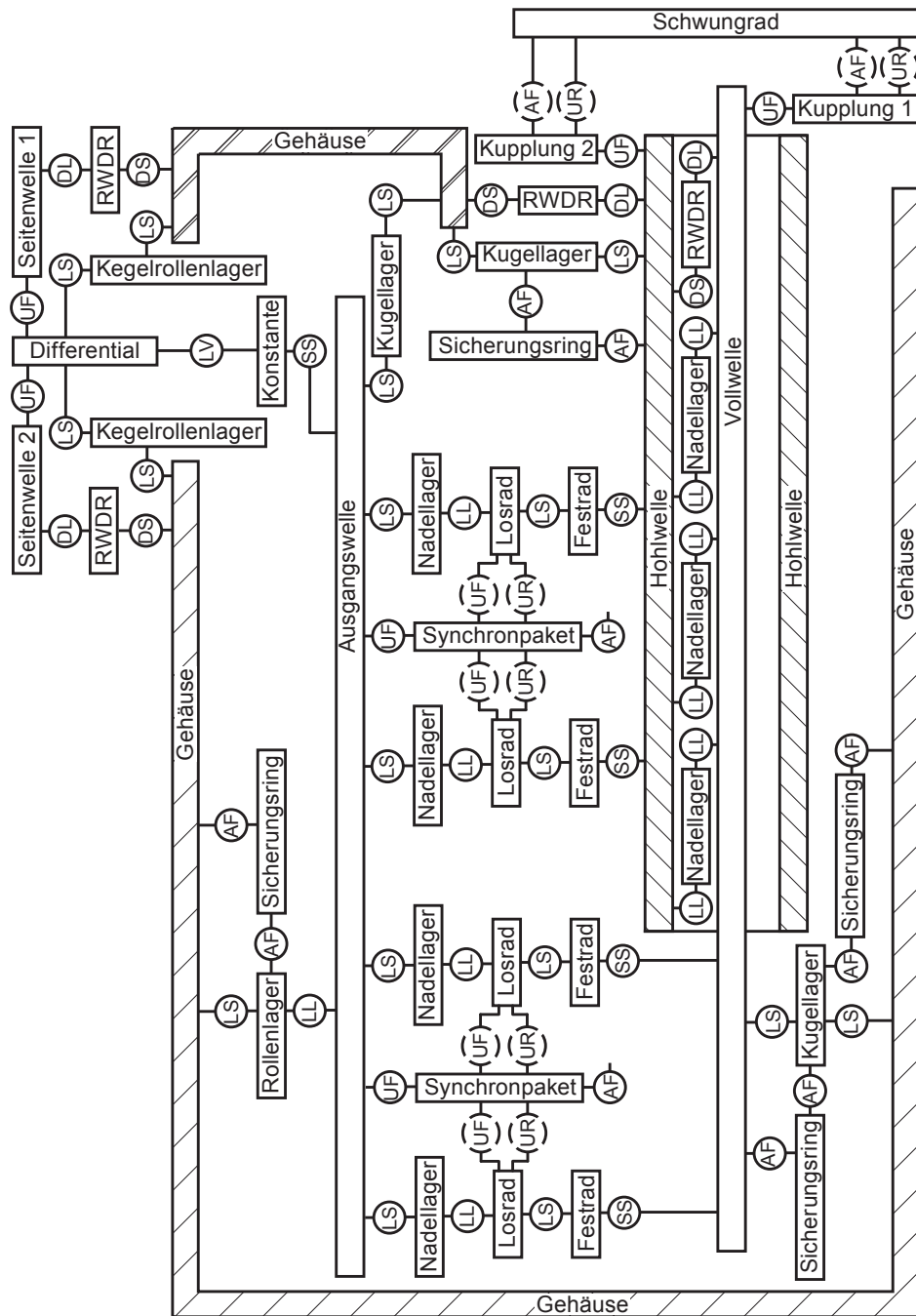


Bild 1: Ablaufplan zum Generieren neuer Konzepte

In Bild 2 ist ein Blockdiagramm eines einfachen Doppelkupplungsgetriebes mit 4 Gängen für den Quereinbau und in Zweiwellenausführung abgebildet. Es sind zentrale Bauteile und Bauteilschnittstellen dargestellt. Das Schwungrad ist das erste Element im Leistungsfluss. Es ist axial formschlüssig und in Umfangsrichtung reibschlüssig mit einer der beiden Kupplungen verbunden. Von der entsprechenden Getriebeeingangswelle ausgehend folgen die Elemente: Festrad, Losrad mit Nadel-lager und Synchronpaket. Die Ausgangswelle mit Abtriebskonstante, Differential und letztlich die Seitenwellen bilden die letzten Elemente entlang des Leistungsflusses. Die Lagerungen der Wellen und Losräder sind ebenfalls im Diagramm dargestellt.

Zwischen je zwei Bauteilen befindet sich mindestens eine Bauteilschnittstelle. Das Schwungrad beispielsweise besitzt zur Kupplungsscheibe eine temporäre Verbindung in Form einer reibschlüssigen Kraftübertragung in Umfangsrichtung. Die Kupplungsscheibe wiederum hat als Bauteilschnittstelle zur Getriebeeingangswelle eine formschlüssige Verbindung zur Übertragung von Umfangskräften. Als Entstehungsort für Losteilgeräusche besonders wichtig ist die Laufverzahnung, die Verbindung zwischen Losrad und Festrad. Der Detaillierungsgrad wurde hier bewusst niedrig gehalten, um einen Systemüberblick zu bekommen. Im Laufe der Konzeptfindung kann es sinnvoll und nötig sein, einzelne Bereiche detaillierter zu betrachten.



- | | | | |
|----|------------------------|--|----------------------|
| SS | Stoffschluss | | Bauteil |
| AF | Axial Formschluss | | Bauteilschnittstelle |
| UF | Umfang Formschluss | | Temporäre Verbindung |
| UR | Umfang Reibschluss | | |
| LL | Lager-Laufläche | | |
| LS | Lagersitz | | |
| DS | Dichtsitz | | |
| DL | Dichtungsgegenaufläche | | |
| LV | Laufverzahnung | | |
| ZW | Zahnwelle | | |

Bild 2: Bauteilblockdiagramm eines Doppelkupplungsgetriebes

2.2 Problemanalyse - Wirkanalyse

Die bekannten Maßnahmen zur Reduzierung von Losteilgeräuschen lassen sich anhand ihrer Wirkstrategie, der Wirkposition, des Wirkverhaltens sowie nach dem zugrundeliegenden physikalischen Wirk-

mechanismus einteilen. Eine entsprechende Einteilung ist in Bild 3 dargestellt. Die Wirkstrategie beschreibt die prinzipielle Strategie, die die Maßnahme verfolgt. Es gibt hier drei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit besteht darin, die Anregung zu reduzieren mit dem Ziel, die freie Schwingung und somit das Anschlagen der Losteile an ihren Spielgrenzen zu vermindern. Die zweite Möglichkeit zielt auf den Stoß selbst ab. Hierbei wird nicht versucht die Anregung der Losteile zu reduzieren, sondern die Intensität der Losteilstöße. Die dritte Möglichkeit besteht darin, den durch Losteilstöße entstandenen Schall an seiner Ausbreitung zu hindern. Die Wirkposition der losteilgeräuschkindernden Maßnahmen beschreibt die Lage der Maßnahme. Sie kann extern, also außerhalb des Getriebegehäuses, oder intern, innerhalb des Getriebegehäuses, sein. Bezüglich des physikalischen Wirkmechanismus können den Maßnahmen mechanische, hydraulische und elektrische bzw. magnetische Mechanismen zugrunde liegen. Die Maßnahmen können weiter nach ihrem Wirkverhalten in passive und aktive Maßnahmen eingeteilt werden. Voraussetzung für eine aktive Maßnahme sind Aktoren und eine gewisse Intelligenz im System, beispielsweise durch ein Getriebesteuergerät. So kann das System gezielt beeinflusst werden.

Wenn es der Lösungsfindung dienlich ist, kann bei Bedarf auch eine detailliertere Einteilung, wie in Bild 3 dargestellt, gewählt werden. So lässt sich beispielsweise die Strategie „Anregung reduzieren“ weiter unterteilen in „Anregung dämpfen“, „Anregung tilgen“ oder „Anregung entkoppeln“.

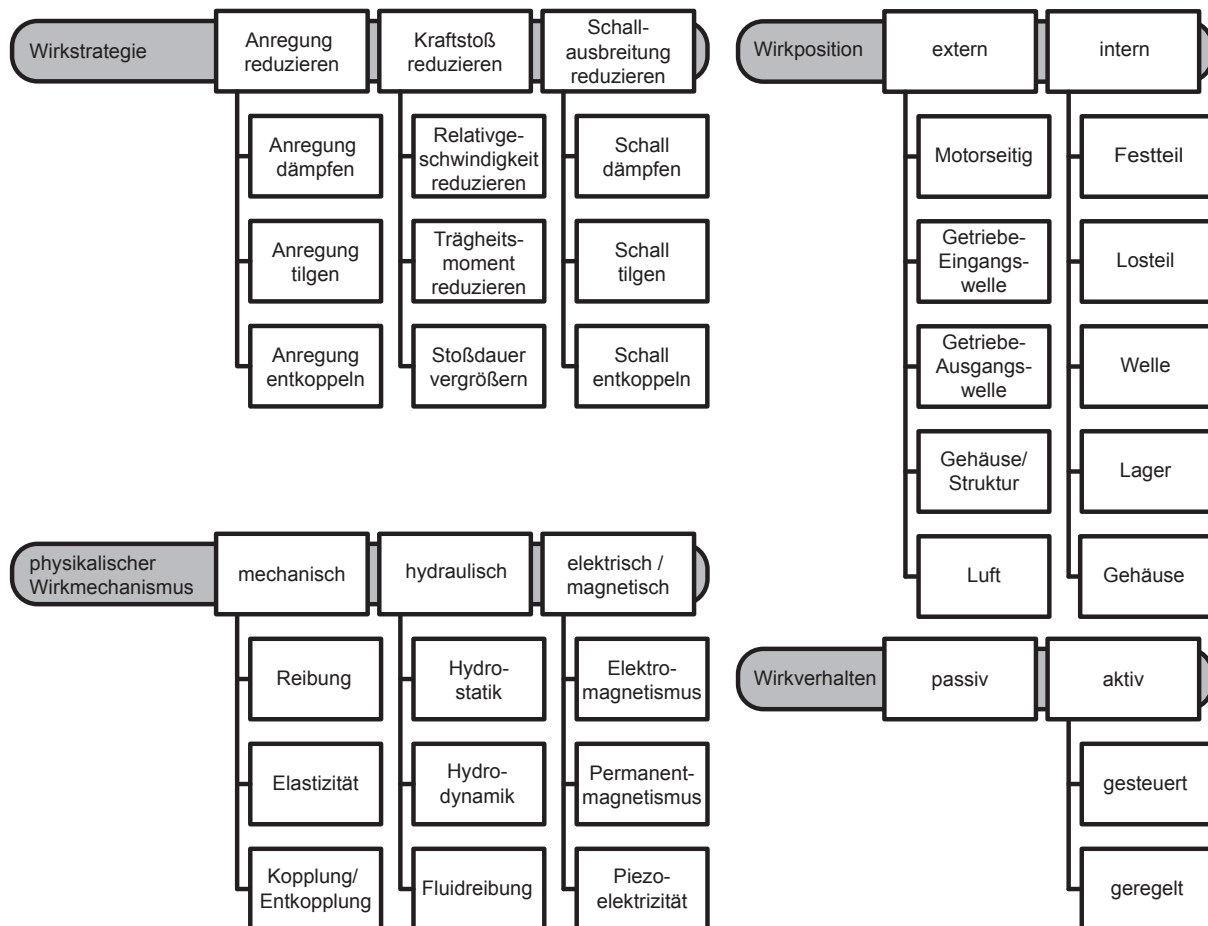


Bild 3: Ordnungsschema – Wirkanalyse

3 Lösungskombination - lösungsneutral

Aus dem Bauteilblockdiagramm lässt sich eine Liste aller Systemelemente, bestehend aus Bauteilen sowie Bauteilschnittstellen ableiten. Diese Elemente bilden die Grundlage der nachfolgenden Lösungskombinationen. Die Einträge aus der Systemanalyse werden nun mit den Einträgen aus der Wirkanalyse kombiniert. Um die Anzahl der Kombinationen handhabbar zu halten, wird vorgeschla-

gen nach jedem Oberbegriff der Wirkanalyse eine Auswahl denkbarer und sinnvoller Lösungskombinationen zu treffen. Dies kann in einer einfachen Auswahlliste, wie in Tabelle 1, erfolgen. Sinnvolle Kombinationen werden hier mit einem „+“, nicht sinnvolle mit einem „-“ gekennzeichnet. Alle mit „-“ gekennzeichneten Kombinationen werden nicht weiter verfolgt. Dieses Auswählen ist nötig, birgt aber die Gefahr letztlich doch gute Lösungen aufgrund von unzureichendem Wissensstand zu früh auszuschließen. Daher ist bei diesem Schritt sorgfältig vorzugehen und eine Lösungsidee im Zweifelsfall positiv zu bewerten.

Tabelle 1: Auswahlliste Wirkstrategie

Nr.:	Bauteil	Bauteilschnittstelle	Anregung reduzieren			Kraftstoß reduzieren			Schallausbreitung reduzieren			...
			dämpfen	tilgen	entkoppeln	Relativgeschw.	Trägheitsmoment	Stoßdauer	dämpfen	tilgen	entkoppeln	
1	Schwungrad		+	+	+	-	-	-	-	-	-	...
2		UR → Kupplung	-	-	-	-	-	-	+	-	+	...
3		AF → Kupplung	+	+	+	+	+	+	-	-	-	...
4	Kupplung		+	+	+	-	+	-	-	-	-	...
5		UF → Hohlwelle	-	-	+	-	-	-	-	-	-	...
6		UF → Vollwelle	-	-	+	-	-	-	-	-	-	...
7	Vollwelle		+	+	+	-	+	-	+	+	+	...
8		SS → Festrاد	+	+	+	-	-	+	-	-	-	...
9		LS → Kugellager	-	-	-	-	-	-	+	-	+	...
10	Kugellager		-	-	-	+	-	-	+	+	+	...
11		LS → Gehäuse	-	-	-	-	-	-	+	+	+	...
12	Gehäuse		-	-	-	-	-	-	+	+	+	...
13	Festrاد		+	-	+	+	+	+	+	-	+	...
14		LV → Losrad	-	-	-	+	-	+	-	-	-	...
15	Öl		-	-	-	+	-	+	-	-	-	...
16	Losrad		-	-	-	+	+	+	-	-	-	...
17		UR → Synchronpaket	-	-	-	+	-	-	-	-	-	...
18		LL → Nadellager	-	-	-	+	-	-	-	-	-	...
...

4 Konkretisieren und Bewerten – lösungsorientiert

Die lösungsneutralen Kombinationen aus Tabelle 1 müssen im nächsten Schritt konkretisiert und in lösungsorientierte Formulierungen überführt werden. Es kann sinnvoll sein, diesen Schritt durch Kreativitätstechniken und in Teamarbeit zu unterstützen. Für eine lösungsneutrale Kombination kann es mehrere lösungsorientierte Ausprägungen geben. In Tabelle 2 sind beispielhaft einige lösungsorientierte Formulierungen gegeben. Neben vielen bereits bekannten Lösungen finden sich darunter auch einige neue Ideen. Aufgrund der Vielzahl an Lösungen ist nun ein einfaches und effektives Bewertungsverfahren nötig. Beispielsweise können die Lösungen anhand der drei Kategorien: „Machbarkeit“, „Risiken“ und „Chancen“ mit einer einfachen Punkteskala nach (VDI 2225 Blatt 3 1998) bewertet werden. Die Skala der Bewertung reicht von 0 Punkten für eine nicht tragbare bis zu 4 Punkten für eine ideale Lösung. Auf der Grundlage dieser Bewertung kann ein Balkendiagramm, wie in Bild 4 dargestellt, erstellt werden. Für jede Lösungsidee sind der Neuheitsgrad, die Teilbewertung und die

Gesamtbewertungen angegeben. Im vorliegenden Beispiel wurden alle Kriterien gleichwertig behandelt. Bei Bedarf lassen sich aber ohne weiteres Gewichtungen vornehmen. Aus der Gesamtbewertung ergibt sich eine Rangliste der Lösungsideen. Mit dieser Rangliste wird eine Auswahl an vielversprechenden Lösungsideen identifiziert und diese daraufhin weiterverfolgt.

Tabelle 2: Bewertungsschema

Nr.:	Lösungsorientierte Formulierung	Machbarkeit	Risiken	Chancen	Gesamt
1	Drehschwingung zwischen Schwungrad und Kupplung mechanisch entkoppeln				
1.1	- Dauerschleupf zwischen Kupplungsscheibe und Anpressplatte reduziert Drehschwingungsspitzen	4	3	3	3,3
2	Kraftstoß zwischen Schwungrad und Kupplung mechanisch aktiv reduzieren				
2.1	- Die Kupplung des passiven Teilgetriebes wird leicht geschlossen und verspannt so den vorgewählten Gang	4	3	2	3
3	Drehschwingung zwischen Schwungrad und Kupplung aktiv mechanisch tilgen				
3.1	- Drehmomentspitzen werden durch gezielte Modulation des Anpressdrucks der Kupplung herausgefiltert	0	1	3	1,3
4	Kraftstoß zwischen Synchronpaket und Losrad aktiv mechanisch reduzieren				
4.1	- Verspannen der Laufverzahnung durch Synchronring	3	2	3	2,7
4.2	- Durch zusätzliches Einspritzen von Öl wird Lagerreibmoment des Nadellagers vergrößert und somit das Losrad verspannt.	1	3	1	1,7
5	Kraftstoß durch Zusatzaggregate aktiv elektrisch reduzieren				
5.1	- Eine E-Maschine im Getriebe verspannt gezielt Losteile	1	3	2	2
6	Drehschwingung im Schwungrad aktiv elektrisch tilgen				
6.1	- Eine E-Maschine im Getriebe tilgt die Motoranregung	1	2	2	1,7
7	Kraftstoß durch Zusatzaggregate aktiv mechanisch reduzieren				
7.1	- Das Schleppmoment einer Ölpumpe verspannt Losteile	1	2	2	1,7
8	Drehschwingungen im Schwungrad aktiv hydraulisch tilgen				
8.1	- Das pulsierende Moment zum Antrieb einer Radialkolbenpumpe tilgt die Motoranregung am Schwungrad	2	1	1	1,3
9	Kraftstoß an der Laufverzahnung aktiv hydraulisch reduzieren				
9.1	- Verlängerung der Stoßdauer durch dämpfenden, dicken Ölfilm bei erhöhtem Ölvolumenstrom einer Einspritzschmierung	4	4	1	3
10	Drehschwingungen zwischen Welle und Festrädern mechanisch entkoppeln				
10.1	- Entkopplung von Festrädern reduziert Klapper- und Rasselstellen	2	3	3	2,7
...

5 Konzeption und Validierung

Im Folgenden kann aus der Rangliste in Bild 4 eine Lösungsvariante ausgewählt, konzipiert und validiert werden. Je nach Situation kann es sinnvoll sein eine bekannte Lösung aufzugreifen, um ein dringendes Problem möglichst schnell und mit geringem Risiko anzugehen. Zu gegebener Zeit kann der Fokus aber auch gezielt auf neuen Ideen gelegt werden. Die Konzeption kann nach den Methoden der VDI 2221 ablaufen. Zur Validierung modifizierter oder neuer Konzepte, eignet sich am Beispiel der Losteilgeräuschreduktion bei DCT neben Prüfstandsversuchen auch die Mehrkörpersimulation (MKS).

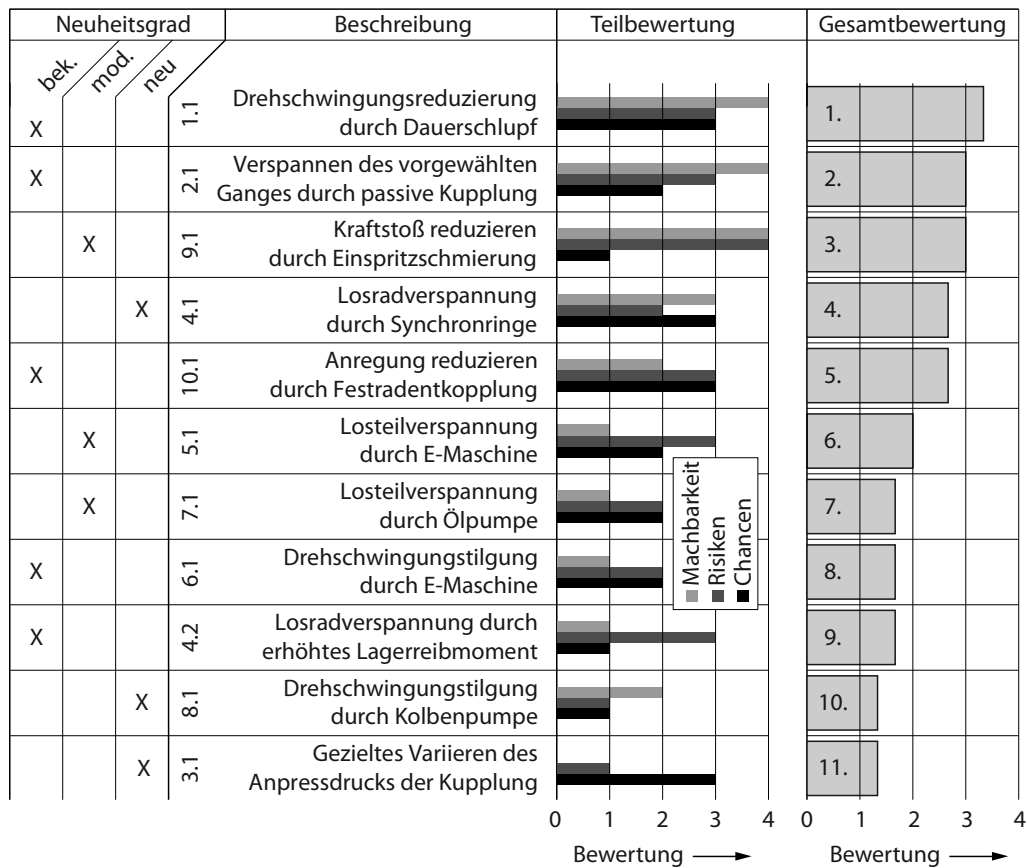


Bild 4: Rangliste der Lösungsvarianten

6 Einordnung des vorgestellten Ablaufplans in die VDI 2221

Die methodische Produktentwicklung nach (VDI 2221 1993) beschreibt ein strukturiertes Vorgehen bei der Entwicklung neuer Produkte oder bei der Umkonstruktion von Funktionsbereichen vorhandener Produkte. Sie beginnt mit dem Arbeitsabschnitt „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“. Als Ergebnis dieses ersten Abschnittes entsteht die Anforderungsliste. Aus der Anforderungsliste werden im zweiten Arbeitsabschnitt Funktionen und Funktionsstrukturen abgeleitet. Für diese Funktionen werden im dritten Arbeitsabschnitt Lösungsprinzipien gesucht, die im vierten Arbeitsabschnitt in realisierbare Module gegliedert werden. In den Arbeitsschritten 5 und 6 werden zuerst die Module und dann das gesamte Produkt gestaltet bevor es im 7. Arbeitsschritt ausgearbeitet wird. Der Fokus liegt während der gesamten Methodik klar auf der Konzeption und Konstruktion von Bauteilen und Baugruppen zur Erfüllung von Haupt- und Nebenfunktionen. Zur Behebung von prinzipbedingten Problemen bei bestehenden Produkten und Systemen ist die Vorgehensweise nicht direkt geeignet. Solche Probleme tauchen in der VDI 2221 nicht auf und können folglich auch nicht behoben werden. Ein Beispiel für ein solches prinzipbedingtes Problem stellen Loseilgeräusche bei Fahrzeuggetrieben dar. Die Übertragbarkeit des vorgestellten Zyklus auf andere Probleme als Loseilgeräusche und andere Systeme als Doppelkupplungsgetriebe ist ohne weiteres möglich. Das Ergebnis des Zyklus ist eine Vielzahl allgemeiner Lösungsprinzipien und Lösungskonzepte zur Behebung von Problemen in bestehenden Systemen. Dadurch ist ein Anknüpfungspunkt zur VDI 2221 gegeben. Die vorgestellte Methode kann die Arbeitsabschnitte 1-3 ersetzen und stellt damit eine mögliche Ergänzung bzw. Erweiterung der bewährten Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 dar.

7 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Vorgehenszyklus, um neue Ideen zum Lösen von Probleme in bestehenden Systemen zu generieren. Am Beispiel der Loseilgeräuschproblematik bei einem

fiktiven DCT wird der Zyklus durchlaufen. Der Aufbau dieses DCTs wurde auf Ebene der Bauteile und Bauteilschnittstellen analysiert. Parallel hierzu wurden bekannte Maßnahmen gegen Losteilgeräusche mithilfe eines Ordnungsschemas analysiert und kategorisiert. Aus der Kombination der Bauteile bzw. Bauteilschnittstellen mit den Einträgen des Ordnungsschemas ergibt sich eine Vielzahl von Konzepten gegen Losteilgeräusche. Durch den vorgestellten Zyklus werden drei Ziele erreicht: Bekannte Konzepte werden geordnet und kategorisiert. Modifikationen von bekannten Konzepten werden identifiziert und weitere gänzlich neue Ansätze werden gefunden. Auf diese Weise konnten am Institut für Maschinenelemente mehrere neue Maßnahmen gegen Losteilgeräusche gefunden und deren Wirksamkeit durch eine Mehrkörpersimulation oder durch Prüfstandsversuche nachgewiesen werden. Hieraus ergab sich bisher eine Patentanmeldung.

Literatur

- Bertsche 2004 BERTSCHE, Bernd; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- Boussuge und Hervert 2012 BOUSSUGE, René; HERVET, Pascal: *NVH Methodology for New Powertrain Concepts*, Bd. 8. In: CTI Symposium "Innovative Fahrzeuggetriebe". Berlin, 2012.
- Bühl 2015 BÜHL, Dominik: *Torsionsdämpfer mit Leichtlaststufe*, Bd. 8. In: VDI Fachkonferenz „Schwingungsreduzierung in mobilen Systemen“. Karlsruhe, 2015.
- DE 4206921 B4 ALBERS, Albert: *Einrichtung zum Dämpfen von Drehschwingungen*. Patentschrift. LuK Lamellen und Kupplungsbau GmbH, Bühl, 1992.
- Dogan 2001 DOGAN, Süreyya Nejat: *Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2001.
- Gipser 1999 GIPSER, Michael: *FTire, a New Fast Tire Model for Ride Comfort Simulation*, In: International ADAMS User's Conference. Berlin, 1999.
- Novak 2010 NOVAK, Wolfgang: *Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2010.
- Pfleghaar 2014 PFLEGHAAR, Jochen: *Energieeffiziente aktive Dämpfung von Torsionschwingungen im KFZ- Antriebsstrang*. Universität München, Lehrstuhl für Regelungstechnik, Dissertation, 2014.
- Rach 1998 RACH, Jens: *Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 1998.
- Stockmeier 2008 STOCKMEIER, Moritz: *Entwicklung von klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2008.
- Tasche 2009 TASCHE, Jochen: *Reduzierung gelenkwellenerregter Antriebsstrangschwingungen durch MKS-Simulation*, Bd. 6. In: VDI Fachkonferenz „Schwingungen in Antrieben“. Leonberg, 2009.
- VDI 2221 1993 VDI Richtlinie 2221 Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
- VDI 2225 Blatt 3 1998 VDI Richtlinie 2225 Blatt 3 November 1998. Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren: technisch-wirtschaftliche Bewertung.
- Weidner 1991 WEIDNER, Georg: *Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 1991.
- Zeller 2009 ZELLER, Peter: *Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH, 2009.

Requirements Engineering für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke

Clemens Honold¹, Hansgeorg Binz¹, Daniel Roth¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionslehre und Technisches Design
Clemens.honold@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Um im Bauwesen den immensen Ressourcenverbrauch bei gleichzeitig steigendem Bauvolumen bewältigen zu können, stellen adaptive Bauwerke einen interdisziplinären Ansatz für zukünftige Gebäude dar. Aufgrund der Komplexität dieser Bauwerke und deren Planung sind während des Planungsbeginns von Beteiligten der Architektur, dem Bauingenieurwesen und dem Maschinenbau zahlreiche Anforderungen zu identifizieren und verwalten, sodass ein spezifisches Requirements Engineering für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke erforderlich ist. In diesem Beitrag wird ein entsprechender Ansatz vorgestellt, der eingebettet in einem ganzheitlichen Planungsprozess die Planung adaptiver Bauwerke methodisch unterstützt. Der Beitrag analysiert zunächst die kontextrelevante Literatur sowie die Randbedingungen für das zu entwickelnde Konzept. Anschließend wird dieses einschließlich einer zugehörigen webbasierten Anforderungsliste für das Anforderungsmanagement vorgestellt.

Keywords:

Entwicklungsmethoden, Requirements Engineering, webbasierte Anforderungsliste, interdisziplinäre Produktentwicklung, adaptive Bauwerke

1 Motivation und Einführung

Adaptive Bauwerke stellen einen Ansatz für zukünftige Gebäude auf interdisziplinärer Basis dar, um den Spagat zwischen dem kontinuierlich zunehmenden Bauvolumen und dem bereits jetzt bestehenden Problem des immensen Ressourcenverbrauchs im Bauwesen bewältigen zu können. Zum Ressourcenverbrauch zählen insbesondere der Energiebedarf aller Lebenszyklusphasen und die vor allem bei der Errichtung erforderlichen Baustoffe, die jeweils große Anteile der weltweit benötigten Ressourcen darstellen. Hinter adaptiven Bauwerken steht daher eine im Forschungsstadium befindliche, sehr intensive und somit neuartige Kooperation zwischen dem Bauwesen, das heißt Bauingenieuren und Architekten, sowie dem Maschinenbau und weiteren Disziplinen, um neue Lösungen zu entwickeln. Auf Basis von Sensor-Aktor-Systemen stehen adaptive Tragwerke und Gebäudehüllen mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung (Sobek 2007), wodurch neue Maßstäbe im Leichtbau und im Energiebedarf sowie zudem auch bei der Aufenthaltsqualität innerhalb von Gebäuden erreicht werden sollen. Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass im Vergleich zu konventionellen Bauweisen adaptive Bauwerke durch die hohe Technifizierung und die damit verbundenen bzw. erforderlichen Fachdisziplinen eine bedeutende Zunahme an Komplexität zur Folge haben, sodass eine interdisziplinäre Bauplanung bzw. Entwicklung erforderlich ist (Honold et al. 2016). Bereits während der frühen Phasen ist eine Vielzahl technisch neuer sowie für beteiligte Disziplinen bisher nicht bekannter Anforderungen zu identifizieren. Anschließend sind diese für die beteiligten Disziplinen bereitzustellen und ggf. zu erläutern, um das gegenseitige Verständnis über die Herausforderungen der Fachdisziplinen zu ermöglichen sowie die zugehörigen Schnittstellen zu beschreiben. Gemäß der VDI Richtlinie 2206 (2004) stellt die kontinuierliche und differenzierte Berücksichtigung aller Anforderungen in allen Entwicklungsphasen einen Schlüsselfaktor zur Beherrschung eines komplexen Systems dar. Folglich wird ein spezifischer Requirements Engineering Ansatz benötigt, der den Anwender beginnend mit der interdisziplinären Identifikation von Anforderungen bis zu deren Verwaltung und Aktualisierung während der Bauplanung und Entwicklung methodisch unterstützt.

Aufgrund der Erfahrung bei der Entwicklung und Anwendung von Methoden entsteht dieser Beitrag im Forschungsfeld der methodischen Produktentwicklung, wobei die Teilergebnisse auf dem kontinuierlichen Austausch mit Ingenieuren und Architekten beruhen, die an der Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke beteiligt sind. Die erläuterte Vorgehensweise soll zeitnah in dem von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ angewandt und auf Basis erster Evaluationen für zukünftige Anwendungen weiterentwickelt werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

In der Softwarebranche und im Maschinenbau existieren zwar bereits etablierte Ansätze zum Requirements Engineering, im Rahmen des Beitrags zeigt sich jedoch, dass sich diese nicht unmittelbar für die benötigte Anwendung einsetzen lassen. In den genannten Branchen stellte sich heraus, dass entsprechende Ansätze für die zielführende Anwendung branchenspezifische Unterschiede aufweisen müssen (Krönert 2010, S. 70). In diesem Beitrag wird daher die Forschungsfrage beantwortet, wie sich die Herausforderungen bei der interdisziplinären Bauplanung und Entwicklung adaptiver Bauwerke auf Basis eines geeigneten Umgangs mit Anforderungen bzw. mit Hilfe eines speziellen Requirements Engineering Ansatzes für adaptive Bauwerke methodisch unterstützen lassen. Vor allem sicherheitskritische Produkte, zu denen adaptive Bauwerke zuzuordnen sind, erfordern eine gründliche Planung, Spezifikation und Dokumentation (Schulze 2016, S. 176). Zum angestrebten Forschungsergebnis gehört die Vorstellung eines erarbeiteten Vorschlags für eine entsprechende Vorgehensweise, einschließlich erforderlicher Methoden und Werkzeuge. Diskussionen mit den beteiligten Architekten und Ingenieuren aus dem Bauwesen und dem Maschinenbau haben ergeben, dass ohne die benötigte Unterstützung kein zielführendes Kooperieren möglich ist, sodass dies ein methodisches Problem für ein interdisziplinäres und ganzheitliches Planungs- und Entwicklungsvorgehen darstellt.

Aufgrund des Bedarfs eines hohen Anteils maschinenbaulicher Elemente und Systeme innerhalb adaptiver Bauwerke sind längerfristig der Bauplanungsprozess und bewährte Produktentwicklungsprozesse zu einem Prozess für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke zu vereinen (Honold et al. 2016). Der Ansatz dieses Beitrags soll in dem ganzheitlichen Prozess einen Baustein bilden und phasenübergreifend vernetzt sein. In Bild 1 sind die Aufgaben des Requirements Engineering im Kontext adaptiver Bauwerke dargestellt, die in dem hier vorzustellenden Ansatz Bestandteil haben.

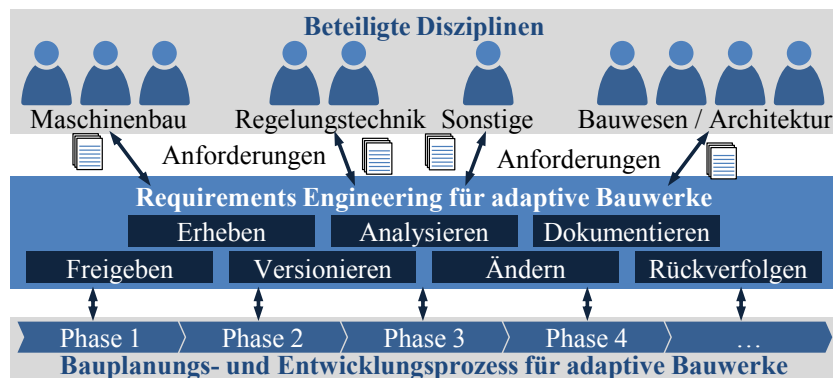


Bild 1: Einordnung des Requirements Engineerings in die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke

3 Aufbau des Beitrags

Der Beitrag sieht zunächst eine kurze Vorstellung des Konzepts adaptiver Bauwerke vor. Anschließend erfolgt eine Bedarfserhebung zur Identifikation der benötigten Unterstützung auf Basis einer Literaturrecherche und der Diskussion mit an der Bauplanung und Entwicklung adaptiver Bauwerke beteiligten Ingenieuren und Architekten (Analyse). Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse, weshalb derzeitige Ansätze nicht unmittelbar

angewandt werden können, wird das Konzept für ein entsprechendes Requirements Engineering zu der kontextbezogenen und zusammenhängenden Vorgehensweise entwickelt (Synthese). Der Beitrag schließt mit einer Diskussion der vorgestellten Ergebnisse sowie einem Ausblick ab.

4 Adaptive Bauwerke

Mit dem Ziel, durch adaptive Gebäudehüllen und Tragstrukturen mit den Einflüssen in der Umgebung in Wechselwirkung zu stehen, ergeben sich für adaptive Systeme verschiedene Einsatzmöglichkeiten. Bild 2 stellt hierzu einige Beispiele anhand eines Hochhauses und einer Brücke dar, um das Konzept adaptiver Bauwerke zu veranschaulichen.

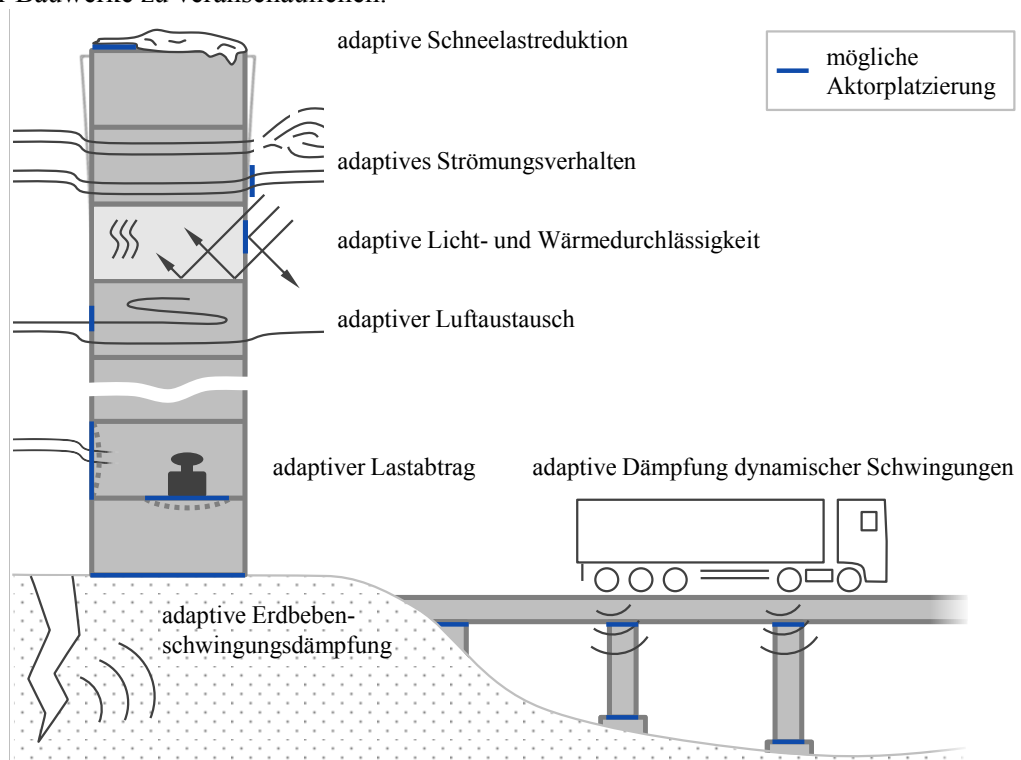


Bild 2: Mögliche Platzierung von Sensor-Aktor Systemen in adaptiven Hüllen und Tragwerken

Neben den bisherigen konventionellen Planungsaufgaben, wie beispielsweise dem Entwerfen des architektonischen Konzepts sowie der Konstruktion und Auslegung des Tragwerks, stellt die Entwicklung und Integration der Sensor-Aktor Systeme sowie deren Regelungskonzepte eine bedeutende Erweiterung des Bauplanungsprozesses, der zugehörigen Aufgaben und der planerischen Herausforderungen dar. Bisher unveröffentlichte Untersuchungen haben gezeigt, dass neben dem Architekten bereits in den frühen Planungsphasen verschiedene Fachplaner, wie beispielsweise Tragwerksplaner, gemeinsam mit Entwicklern von Aktoren, Sensoren und Regelungskonzepten aus dem Maschinenbau, der Systemdynamik bzw. der Informatik eingebunden sind, um das benötigte interdisziplinäre Fachwissen in ein integrales Planungsvorgehen einzubringen. Zu den neuen Planungsaufgaben, die einhergehend mit den neuen Beteiligten und deren Kooperation resultieren, sind bei der Planung adaptiver Bauwerke auch neue Fragestellungen in den etablierten Fachbereichen projektspezifisch zu beantworten. Hierzu zählen beispielsweise thermische Verhaltensweisen eines Gebäudes, die durch die Massereduktion und den somit wegfallenden Wärmepuffern zu einem schnelleren Auskühlen führen und von Seiten der Bauphysik zu beherrschen sind. Außerdem sind von allen Disziplinen sämtliche Phasen des Lebenszyklus zu berücksichtigen, um bereits während der Planung für den Wartungs- und Instandhaltungsfall geeignete Lösungen vorliegen zu haben. Sämtliche Aufgaben der Planung, Entwicklung und Konstruktion sind durch Anforderungen soweit zu definieren und quantifizieren bzw. der Lösungsraum der zugehörigen Ergebnisse abzugrenzen, wie dies für die Zielerfüllung notwendig ist (vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 666). Diese Anforderungen sind Teil des im Weiteren beschriebenen Requirements Engineerings für adaptive Bauwerke.

5 Grundlagen zum Requirements Engineering

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über das Requirements Engineering sowie Ergebnisse einer zugehörigen Literaturrecherche und sieht zwei Teile vor. Im ersten werden der allgemeine Bedarf und ein Überblick über die untergeordneten Aktivitäten erläutert. Das zweite Unterkapitel fasst die Literatur bzw. den Stand der Technik im Kontext mit der Bauplanung kurz zusammen.

5.1 Motivation und Tätigkeitsfelder im Requirements Engineering

Umfassende Literatur im Themenfeld des Requirements Engineering ist zahlreich vorhanden (Versteegen 2004; Pohl 2008; Ebert 2012; Rupp et al. 2014). Der Ansatz stammt ursprünglich aus der Softwareentwicklung und ist inzwischen Bestandteil bei der Entwicklung (komplexer) mechatronischer Produkte (VDI 2206 2004, S. 59; Baumgart 2016, S. 426). Auch im Bauwesen gewinnt das Requirements Engineering Einzug (Girmscheid 2010a; Girmscheid 2010b; Krönert 2010), nachdem in den Jahren vor den genannten Veröffentlichungen in der Baupraxis kein entsprechender Ansatz existierte (Fernie et al. 2003; Krönert 2010, S. 13, 89). Im Bauwesen lassen sich Bauprojekte unter Berücksichtigung des Requirements Engineerings schneller, zielorientierter und mit geringeren Nachträgen umsetzen, da sich das Ändern von Zielen und Anforderungen während verschiedener Projektphasen in Bauprozessen häufig folgenschwer auf die wirtschaftliche Bilanz des Projekts auswirkt (Girmscheid 2010a, S. 197). Gleichzeitig wird das Bauwesen durch die zeitliche Entwicklung mit Herausforderungen wie komplexere Bauten, schnellere Projektabwicklungen bzw. Realisierungszeiten, neuen Geschäftsmodellen und fehlendes Erkennen der zu erbringenden Bauleistungen konfrontiert (Krönert 2010, S. 19), deren Beherrschung sich mit dem Ansatz des Requirements Engineering Ansatz unterstützen lässt.

Während die allgemeine Zielsetzung in der Literatur zum Requirements Engineering über die verschiedenen Branchen und Literaturquellen hinweg einheitlich ist, werden die Begrifflichkeiten zu den im folgenden Abschnitt beschriebenen Kernprozessen und die Abgrenzungen der untergeordneten Aktivitäten nicht einheitlich gewählt. Die Begrifflichkeiten dieses Beitrags sind aufgrund der Nähe zur Produktentwicklung an Baumgart (2016) angelehnt.

Für einen systematischen, zielgerichteten und transparenten Umgang mit Anforderungen wird daher die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise empfohlen. Das Requirements Engineering basiert auf zwei Kernprozessen, die nach Baumgart (2016, S. 426 f.) als Aufgabenklärung bzw. Anforderungsmanagement betitelt werden. Bild 3 stellt die beiden Kernprozesse mit den jeweils untergeordneten Aktivitäten dar. Die Aufgabenklärung umfasst das Erheben, Analysieren sowie Dokumentieren der Anforderungen und stellt als Ergebnis die Anforderungsspezifikation, beispielsweise in Form einer Anforderungsliste, dar (Baumgart 2016). Die Aufgabenklärung und die darin verankerten Aktivitäten sind in der Produktentwicklung fester Bestandteil in diversen generischen Produktentwicklungsprozessen (VDI 2221 1993; VDI 2206 2004; Feldhusen et al. 2013, S. 319 ff.). Ergänzende Anforderungen, die durch einen fortschreitenden Erkenntnisgewinn während der Produktentwicklung resultieren, erlauben es nicht, die Aufgabenklärung sowie die Spezifikation nach der ersten Dokumentation als abgeschlossen anzusehen (vgl. Baumgart 2016, S. 427).

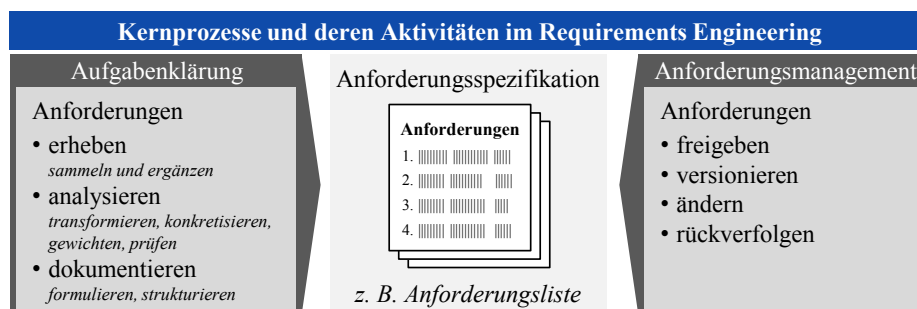


Bild 3: Kernprozesse und deren untergeordnete Aktivitäten im Requirements Engineering (vgl. Baumgart 2016)

Mit der ersten vorliegenden Version der Anforderungsspezifikation beginnt mit dem Anforderungsmanagement der zweite Kernprozess. Dessen Aktivitäten erfolgen bis zum Abschluss

der Produktentwicklung des jeweiligen Auftrags und sehen das Freigeben, Versionieren, Ändern und Rückverfolgen von Anforderungen vor (Baumgart 2016).

In der Literatur sind den jeweiligen Aktivitäten verschiedene Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung und zum Erhalt eines bestmöglichen Ergebnisses zugeordnet. Das Ziel und eine Auswahl zur Anwendung empfohlener Methoden sind für die jeweilige Aktivität im Kernprozess der Aufgabenklärung in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Dokumentation der Anforderungsspezifikation erfolgt je nach Projektumfang bzw. Unternehmensgröße als Anforderungsliste in einfachen Tabellen oder mit speziellen datenbankbasierten Softwaretools (Feldhusen et al. 2013, S. 341 f.). Ein führendes Softwaretool ist Rational DOORS von IBM (Versteegen 2004, S. 97 und 183), das hauptsächlich die Aktivitäten des Anforderungsmanagements unterstützt.

Tabelle 1: Ziele und unterstützende Methoden im Kernprozess Aufgabenklärung (vgl. Baumgart 2016)

Aktivität		Ziel	Methoden/Hilfsmittel
Anforderungen erheben	<i>sammeln</i>	Zusammentragen vorhandener Anforderungen (aus Auftrag, Unternehmensstrategie, Marktanalyse, Normen, ...)	Analyse der Vorgänger- und Wettbewerbsprodukte
	<i>ergänzen</i>	Vervollständigen der Anforderungen durch systematisches Absuchen	Hauptmerkmale, Funktions- und Lebenszyklusanalyse
Anforderungen analysieren	<i>transformieren</i>	Eindeutige, lösungsneutrale und prüfbare Formulierung der Anforderungen	QFD-Matrix / House of Quality
	<i>konkretisieren</i>	Klassifizieren mit Attributen (Forderung / Wunsch) und Quantifizierung sowie identifizieren von Unklarheiten	Attribute
	<i>gewichten</i>	Grundlage für Bewertung und Selektion von Lösungsalternativen sowie zur Vermeidung von Fehlentwicklungen	Paarweiser Vergleich, Nutzwertanalyse
	<i>prüfen</i>	Inhaltliche und formelle Kontrolle der Anforderungen	Reviewprozesse
Anforderungen dokumentieren	<i>formulieren</i>	Formulieren korrekter und eindeutiger Anforderungen	Qualitätskriterien
	<i>strukturieren</i>	Sicherstellen einer übersichtlichen Darstellung	Hauptmerkmale

Aus der Praxiserfahrung sind verschiedene branchenübergreifende Risiken im Requirements Engineering bekannt, die es für die erfolgreiche Projektumsetzung zu berücksichtigen gilt. Ebert (2012, S. 5 ff.) zählt dazu fehlende Anforderungen, falsche Anforderungen sowie sich ändernde Anforderungen. Diese Risiken sind eine Konsequenz, wenn keine ausreichende Kenntnis über die Stakeholder sowie kein Informationsaustausch mit diesen erfolgt. Stakeholder eines Systems sind dabei Personen oder Organisationen, die direkt oder indirekt Einfluss auf die Anforderungen des betrachteten Systems haben (Pohl und Rupp 2009, S. 27).

5.1 Anforderungsermittlung im Bauwesen

In der Bauplanung orientieren sich die planerischen Tätigkeiten an den in Deutschland verbindlich vorgeschriebenen neun Leistungsphasen der sogenannten Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI). Die erste Leistungsphase „Grundlagenermittlung“ sieht zwar unter anderem das Klären der Aufgabenstellung vor, das Ermitteln der Bedürfnisse von Bauherren und Nutzern sowie deren anschließende zielgerichtete Aufbereitung bzw. Umsetzung als bauliche Anforderungen sind darin jedoch nicht enthalten. Diese Tätigkeiten werden als Bedarfsplanung im Bauwesen bezeichnet, sind in der DIN 18205 erläutert und darin explizit als Aufgabe dem Bauherrn zugeordnet, der diese ggf. Fachleuten vergeben kann (DIN 18205 1996, S. 2). Die Norm stellt erprobte Prüflisten für die Projekterfassung, der Darstellung von Rahmenbedingungen, Mitteln und Zielen sowie für detaillierte Einzelanforderungen bereit. Die Prüflisten sind mit den Hauptmerkmalen nach Pahl und Beitz (Feldhusen et al. 2013, S. 331) vergleichbar und sollen die assoziative Suche nach Anforderungen unterstützen. Die Prüflisten decken dabei beispielsweise organisatorische, gesetzliche, normative, finanzielle und zeitliche sowie wesentliche entwerferische Anforderungen ab. Letztere wiederum betreffen das Grundstück und deren Umgebung, die Gebäudestruktur, die Räume sowie die spätere Einrichtung und Ausstattung (DIN 18205 1996, S. 4 ff.).

Evbuomwan et al. (2002, S. 7) unterteilen Anforderungen eines Bauprojekts in Anforderungstypen (vgl. Krönert 2010, S. 169). Diese sind in Bild 4 zusammen mit ihren Interaktionsbeziehungen zusammengefasst abgebildet. Die wichtigsten Anforderungen stellen die Nutzeranforderungen dar, die das Aussehen, die Funktionalität und Qualität des Bauprojekts beschreiben (Krönert 2010, S. 166). Die Nutzeranforderungen und die des Bauherren bzw. Investors werden von den Anforderungen durch

den Standort, dessen Umfeld sowie den geltenden Normen und Gesetze (Regulative Anforderungen) ergänzt. Zusammen haben diese Einfluss auf die Gestaltanforderungen, auf deren Basis der Entwurf des Bauwerks entwickelt wird. Der Entwurf führt abschließend zu den Ausführungsanforderungen und der entsprechenden baulichen Umsetzung (Krönert 2010, S. 60).

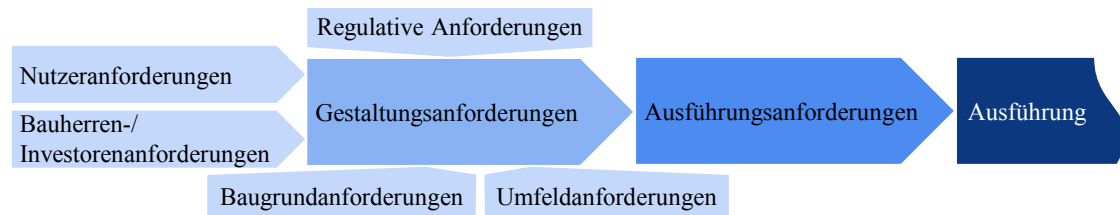


Bild 4: Anforderungstypen und deren Interaktionsbeziehung in der Bauplanung (in Anlehnung an Krönert 2010, S. 60; vgl. Evbuomwan et al. 2002, S. 7)

6 Einordnung des Requirements Engineering in den Bauplanungsprozess adaptiver Bauwerke mit anschließender Bedarfserhebung

Die beschriebenen Grundlagen sowie das in der Literatur beschriebene Erfahrungswissen für das Requirements Engineering in verschiedenen Disziplinen soll für die Konzeptionierung eines Ansatzes eingesetzt werden, mit dem die Planung adaptiver Bauwerke im Kontext der Aufgabenklärung bzw. der Bedarfsplanung sowie des Anforderungsmanagements unterstützt wird. Für die Entwicklung des Ansatzes sind jedoch zunächst die zugehörigen Randbedingungen im Umfeld der Bauplanung zu identifizieren. Wie bereits erwähnt, orientiert sich die Vorgehensweise mit den planerischen Tätigkeiten von Architekten und Fachplanern in Deutschland an den neun Leistungsphasen der HOAI, die den Zeitraum vom Beginn der Planung bis zur Objektbetreuung umfassen.

In vielen Ländern erfolgt die Planung inzwischen zunehmend mit Hilfe eines umfassenden digitalen Gebäudemodells, das neben der dreidimensionalen Geometrie viele weitere Zusatzinformationen beinhaltet. Dieses sogenannte Building Information Model (BIM) dient insbesondere dazu, ein digitales Abbild des Bauwerks bereitzustellen, auf das von allen an der Bauplanung Beteiligten zugegriffen und dadurch kooperativ und interdisziplinär weiterentwickelt werden kann. Das Modell bietet somit die Möglichkeit einer frühen präzisen Mengenermittlung und Kostenschätzungen, sodass Leistungsverzeichnisse für die Ausschreibung beschleunigt werden. Außerdem eignet sich das Modell als Datengrundlage für diverse Berechnungen und Simulationen. Nach Abschluss der Planung liefert das Modell auch bei der Bauausführung, während des Betriebs zur Unterstützung des Facility Managements und schließlich bei Modernisierungsmaßnahmen oder dem Rückbau benötigte Informationen. (vgl. Borrmann et al. 2015)

Aufgrund der vielseitigen Vorteile des digitalen Gebäudemodells und dessen weitläufig vorhergesagten Zukunft soll dieses auch in die Planung adaptiver Bauwerke eingebunden und in deren Prozess fester Bestandteil werden. Verglichen mit der konventionellen Bauplanung verschiebt der Einsatz von BIM den Aufwand in frühe Planungsphasen (Borrmann et al. 2015, S. 6). Da die digitale Gebäudemodellierung mit der Vorplanung beginnt, sollte idealerweise im Rahmen der Aufgabenklärung des Requirements Engineerings die Anforderungsspezifikation bis zum Beginn der Modellierung abgeschlossen sein.

Auf Basis der beschriebenen Grundlagen sowie Empfehlungen aus dem praxiserprobten Requirements Engineering und den analysierten Randbedingungen für die benötigte Unterstützung wird zunächst der konkrete Bedarf bzw. dessen Umfang für den kontextspezifischen Ansatz ermittelt:

- Identifizieren der Stakeholder von adaptiven Bauwerken
- Vollständiges Erheben von Anforderungen an das individuell zu planende adaptive Bauwerk
- Erstellen der Anforderungsspezifikation durch Analyse und Dokumentation der Anforderungen
- Aufbereitung bzw. Weitergabe der Anforderungen für die Umsetzung im BIM
- Umgang mit Anforderungen im Kontext des Anforderungsmanagements

Die aufgeführten Bedarfspunkte sind dahingehend zu untersuchen, inwieweit sich für das benötigte Konzept Bestehendes übernehmen lässt oder Anpassungen oder Neukonzeptionen vorzunehmen sind.

Aufgrund der einschlägig vorhandenen und in der Literatur beschriebenen Erfahrungen wird angestrebt, Anpassungen oder Neuentwicklungen nur vorzunehmen, sofern diese als erforderlich angesehen werden. Nach einer entsprechenden Bewertung ergibt sich folgender Handlungsbedarf:

- Mit der Adaptivität einhergehende Erweiterung der Funktionalitäten eines Bauwerks ergeben sich zusätzliche an der Bauplanung beteiligte Stakeholder, die zu identifizieren sind.
- Die neuen Funktionalitäten erfordern zugehörige neue Anforderungen. Das vollständige Erheben von Anforderungen stellt insbesondere zum jetzigen Zeitpunkt der Anfänge adaptiver Bauwerke eine Herausforderung dar, die näher untersucht werden muss.
- Zur Analyse und Dokumentation der Anforderungen sind beispielsweise in Pohl (2008), Rupp et al. (2014) und Baumgart (2016) eine Reihe an Empfehlungen und Methoden für die zugrundeliegenden Aktivitäten vorgeschlagen. Diese Erfahrungswerte sollen für die Anwendung übernommen werden, sodass zunächst kein Bedarf für weitere Untersuchungen erkannt wird. Zusammen mit dem Kernprozess des Anforderungsmanagements ist jedoch ein Dokumentationsformat auszuwählen.
- Die vorliegenden Anforderungen müssen derart vorliegen, dass sich diese bei der Umsetzung im Entwurf mit Hilfe des digitalen Gebäudemodells realisieren lassen und sind ggf. aufzubereiten.
- Die Aktivitäten des Anforderungsmanagements sind ebenfalls in der Literatur beschrieben. Diese sollen zunächst als vorhandene Grundlage ausreichen und sind zu übernehmen.

Die beschriebenen Bedarfspunkte und die Analyseergebnisse wurden mit Forschungspartnern adaptiver Bauwerke diskutiert und abgestimmt. Auf dieser Basis ist die Erkenntnis festzuhalten, dass grundlegende Bestandteile des Requirements Engineering beibehalten werden können, für den spezifischen Anwendungsfall jedoch Anpassungen, Erweiterungen bzw. die Entscheidung für ein geeignetes Format für die Anforderungsdokumentation notwendig sind.

7 Konzeptvorstellung des Requirements Engineering für adaptive Bauwerke

Das Konzept für das Requirements Engineering für adaptive Bauwerke beruht auf der in Kapitel 6 vorgenommenen Bedarfsanalyse. Anhand der Visualisierung in Bild 5 soll im Folgenden der Ansatz vorgestellt werden. Die Beschreibung der Bestandteile erfolgt in einzelnen Abschnitten, wobei deren Nummerierung eine Zuordnung zu den Elementen der Visualisierung ermöglicht.

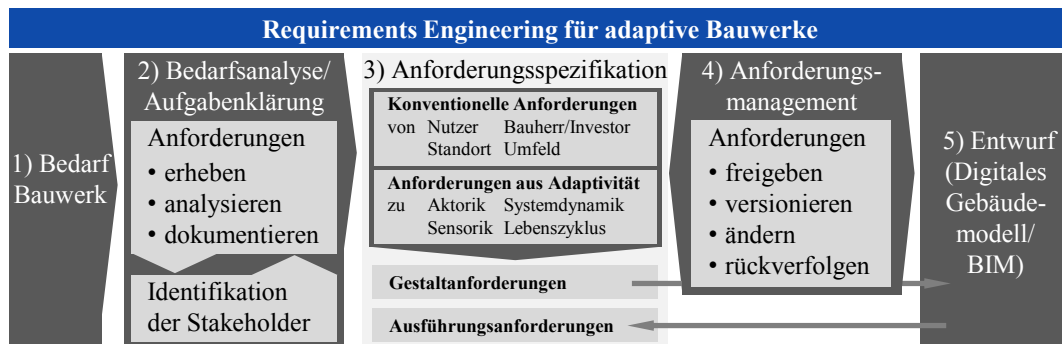


Bild 5: Requirements Engineering für adaptive Bauwerke

7.1 Bedarf Bauwerk

Der Beginn des Requirements Engineering für adaptive Bauwerke erfolgt mit dem aufkommenden Bedarf eines Bauwerks, ohne dass dieser bereits explizit in Form einer strukturierten Anforderungsspezifikation vorliegt. Der Bauherr bzw. Investor leitet an dieser Stelle die konkrete (technische) Planungsaktivität ein. Vertragliche Aspekte etc. sind an dieser Stelle nicht einbezogen.

7.2 Bedarfsanalyse bzw. Aufgabenklärung

Im zweiten Schritt wird der genaue Bedarf durch das Planungsteam analysiert. Hierbei sind die Aktivitäten der im Requirements Engineering erprobten Aufgabenklärung zu durchlaufen und die zu

diesem Zeitpunkt vorliegenden Anforderungen zu erheben, analysieren und dokumentieren. Die Dokumentation kann in einer einfachen Tabelle oder in einer Datenbank erfolgen. Im Rahmen der Entwicklung dieses Konzepts entstand zeitgleich eine webbasierte Anforderungsliste, die die Übersichtlichkeit einer tabellarischen Anforderungsliste mit den Vorteilen eines datenbankbasierten Systems verbindet. Diese wird in Kapitel 7.4 näher vorgestellt.

Um den Bedarf vollständig zu erheben, sind während der Bedarfsanalyse parallel die Stakeholder zu ermitteln. Zwischen der Bedarfsanalyse und der Identifikation von Stakeholdern wird eine Wechselwirkung gesehen, da spezifische Anforderungen spezielle Stakeholder im Planungsteam erfordern und diese wiederum weitere Anforderungen ermitteln bzw. Einfluss auf bereits bestehende Anforderungen ausüben. Zur Identifikation der Stakeholder wird auf bereits vorgenommene Untersuchungen zurückgegriffen, die sich ebenfalls im Veröffentlichungsprozess befinden. Daraus ergeht ein Vorschlag für die Zusammensetzung des interdisziplinären Planungsteams zur Beherrschung der technischen Umsetzung adaptiver Bauwerke, das auch die Anforderungen ermittelt. Zur möglichst vollständigen Identifikation der Anforderungen sind zunächst die bestehenden Methoden heranzuziehen, wie beispielsweise die zur Assoziation vorgeschlagene Prüf- und Hauptmerkmalliste. Als anwendungsgerechte Unterstützung sind in einem Ansatz bereits beide Listen zusammengeführt worden. Der Ansatz wird bei der im Forschungsprojekt vorgesehenen Bauplanung von adaptiven Bauwerken auf Basis der gewonnenen Erfahrungen weiter ausgearbeitet und gewinnt so mit jeder Planung adaptiver Bauwerke an Reife.

7.3 Anforderungsspezifikation

Der Ansatz der Hauptmerkmale für die Planung adaptiver Bauwerke dient gleichzeitig zur Strukturierung der Anforderungsspezifikation. Der Umfang der zu identifizierenden Anforderungen setzt sich nach derzeitigem Stand aus den Anforderungstypen der konventionellen Bauplanung sowie bereits identifizierter Anforderungen aus den Funktionalitäten der Adaptivität zusammen. Hierzu zählen beispielsweise Anforderungen zu den Aktoren und Sensoren sowie deren Integration in die Tragwerks- bzw. Hüllstrukturen, die Anforderungen an die Systemdynamik bzw. der zugehörigen Regelungstechnik sowie weitere Anforderungen, die aus der Betrachtung der Lebenszyklusphasen entstammen. Letztere sind von hoher Bedeutung, da diese die Wartung und Instandhaltung, den Rückbau und die Wiederverwendung der Bauelemente berücksichtigen. So sollte bereits vor Beginn des Entwurfs definiert sein, wie die Zugänglich- und Austauschmöglichkeiten von in die Tragstruktur eingebundenen Aktoren auszuführen sind.

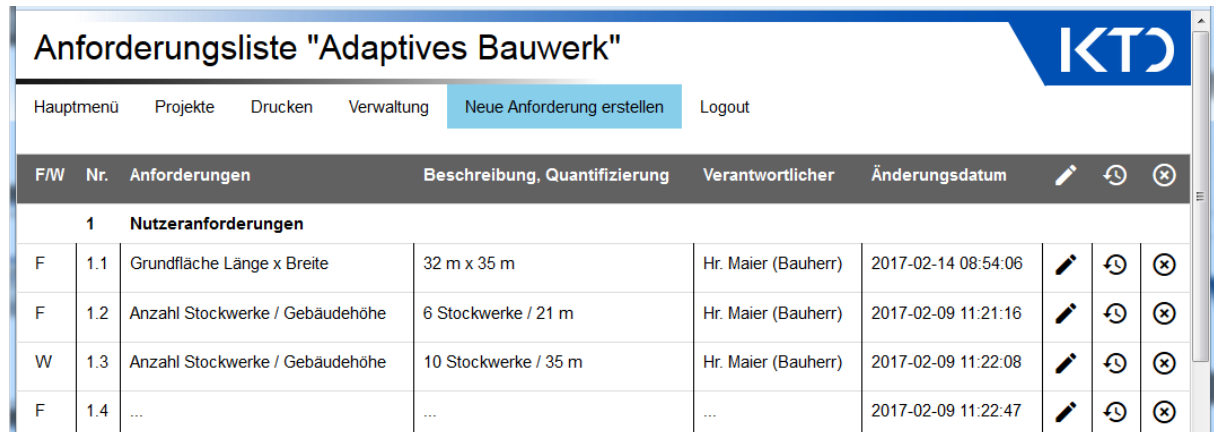
Die erhobenen Anforderungen sind mit dem Vorliegen eines möglichst vollständigen Stands und einer unterzogenen Prüfung in Form von Gestaltanforderungen für die erste Konzeptionierung bzw. die Erstellung eines Vorentwurfs, d. h. der Erstellung des digitalen Gebäudemodells, zu berücksichtigen.

7.4 Anforderungsmanagement

Die im Grundlagenteil beschriebenen Aktivitäten des Anforderungsmanagements laufen beispielsweise auf Basis der entwickelten webbasierten Anforderungsliste ab. Das Tool unterstützt für ein intuitives und transparentes Anforderungsmanagement alle untergeordneten Aktivitäten. Über ein Benutzersystem ist eine Benutzerrechtevergabe möglich, sodass definierte Fachverantwortliche Anforderungen eines spezifischen Fachbereichs für die Umsetzung freigeben oder auch zurückziehen können, sofern diese nicht mehr aktuell bzw. zutreffend sind. Das Tool kennzeichnet sämtliche vorgenommene Änderungen an einzelnen Anforderungen, beispielsweise Beschreibungen und Quantifizierungen. Die somit realisierte Versionierung ermöglicht die Rückverfolgbarkeit der Historie einzelner Anforderungen. Bild 6 stellt einen Screenshot einer Anforderungsliste des Tools dar.

Der Vorteil der webbasierten Anforderungsliste liegt im Vergleich zu dokumentenbasierten Anforderungslisten darin, dass mehrere Beteiligte des Planungsteams gleichzeitig und global auf die Liste zugreifen können und somit eine parallele Bearbeitung möglich ist. Außerdem lassen sich zur einfachen Informationsweitergabe einzelne Einträge weiterleiten („teilen“) oder Benutzer mit Hilfe automatischer versendeter E-Mails über vorgenommene Änderungen automatisch hinweisen. Auf Basis von Rückmeldungen von verschiedenen Anwendungen wird das Tool den Bedürfnissen entsprechend

weiter ausgearbeitet. Der Funktionsumfang ist jedoch für eine Anwendung in kleinen Entwickler- bzw. Planungsteams abgestimmt und unterscheidet sich somit von den mächtigen Softwaretools. In der Visualisierung des Konzepts (Bild 5) ist das Anforderungsmanagement zwischen der Anforderungsspezifikation und dem Entwurf eingeordnet. Dies hat den Grund, dass Änderungen an der Anforderungsspezifikation mit Hilfe des Anforderungsmanagements im Entwurf Berücksichtigung finden und gleichermaßen Anforderungen angepasst werden, sofern diese bei der Umsetzung Änderungsbedarf hervorrufen. Die Anforderungsspezifikation und die Umsetzung sollten demzufolge übereinstimmen, sodass die Anforderungen beispielsweise als Basis für die Bewertung und Auswahl verschiedener Konzepte herangezogen werden kann.



The screenshot shows a web application interface for managing requirements. At the top, there is a navigation bar with the title 'Anforderungsliste "Adaptives Bauwerk"' and the KTO logo. Below the navigation bar, there are menu items: 'Hauptmenü', 'Projekte', 'Drucken', 'Verwaltung', 'Neue Anforderung erstellen', and 'Logout'. The main content area is a table with the following columns: 'F/W', 'Nr.', 'Anforderungen', 'Beschreibung, Quantifizierung', 'Verantwortlicher', 'Änderungsdatum', and three action icons (edit, refresh, delete). The table contains a section for '1 Nutzeranforderungen' with the following data:

F/W	Nr.	Anforderungen	Beschreibung, Quantifizierung	Verantwortlicher	Änderungsdatum			
1 Nutzeranforderungen								
F	1.1	Grundfläche Länge x Breite	32 m x 35 m	Hr. Maier (Bauherr)	2017-02-14 08:54:06			
F	1.2	Anzahl Stockwerke / Gebäudehöhe	6 Stockwerke / 21 m	Hr. Maier (Bauherr)	2017-02-09 11:21:16			
W	1.3	Anzahl Stockwerke / Gebäudehöhe	10 Stockwerke / 35 m	Hr. Maier (Bauherr)	2017-02-09 11:22:08			
F	1.4	2017-02-09 11:22:47			

Bild 6: Screenshot aus der webbasierten Anforderungsliste

7.5 Entwurf - Digitales Gebäudemodell (BIM)

Mit der Umsetzung der einzelnen Anforderungen im digitalen Gebäudemodell nimmt der Entwurf die geforderte Gestalt an. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Integration der adaptiven Funktionalitäten im Building Information Model eine gesonderte Untersuchung erfordert, die Bestandteil des Forschungsprojekts ist. Durch die Rückführung von Ausführungsanforderungen in die Anforderungsspezifikation können diese gebündelt in die Phase der Bauausführung übergeben werden. Auf diese Weise dient die Anforderungsspezifikation auch als Dokumentation für zukünftige Bauplanungen und vereinfacht dabei deren vollständige Bedarfs- bzw. Anforderungserhebung.

8 Diskussion und Ausblick

Das vorgestellte Konzept für das Requirements Engineering für adaptive Bauwerke unterstützt die frühen Phasen im Bauplanungsprozess und widmet diesen eine geforderte höhere und insbesondere für die Integration adaptiver Eigenschaften erforderliche Aufmerksamkeit. Nach der Recherche und Analyse bestehender Requirements Engineering Ansätze ist festzuhalten, dass diese für das erläuterte Planungsumfeld zu spezifizieren war. Das vorgestellte Konzept ist mit der weiteren Entwicklung des ganzheitlichen Planungsprozess mit den resultierenden Planungsphasen weiter zu vernetzen.

Da für die vollständige Evaluation des Konzepts eine Bauplanung durchzuführen ist, konnte diese bisher nicht vorgenommen werden, sodass die Ergebnisse bisher auf Basis von Literaturempfehlungen und darin beschriebenen Erfahrungen aus der Literatur basieren. Durch die Einbeziehung und Abstimmung des Konzepts mit Beteiligten des Forschungsprojekts wurde das Unterstützungspotenzial bereits bestätigt. Das Konzept wird nun bei der Planung eines mehrstöckigen Demonstratorgebäudes mit adaptiven Eigenschaften herangezogen.

Bei dieser Anwendung ist zu analysieren, inwieweit sich die Anforderungen bereits zu den gewünschten frühen Zeitpunkten erheben lassen, da das Entwerfen in der Architektur einen Prozess darstellt. Allerdings werden auch in der Produktentwicklung meistens Inhalte der ersten Anforderungsspezifikation noch weiter ergänzt und detailliert (Baumgart 2016, S. 426).

Außerdem wird bei der Anwendung des Requirements Engineering erwartet, dass eine große Anzahl zu berücksichtigender Anforderungen anfällt. Es ist dann zu untersuchen, wie sich diese

beispielsweise nach Disziplinen bzw. Stakeholdern oder Hauptmerkmalen gliedern lassen oder ob ggf. über- und untergeordnete Anforderungsspezifikationen mit Anforderungen mit geringerem und höherem Detaillierungsgrad zweckmäßig sind.

Literatur

- Baumgart 2016 Baumgart, I.: *Requirements Engineering*. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München, Carl Hanser Verlag, 2016.
- Borrmann et al. 2015 Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J.: *Einführung*. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): *Building Information Modeling*. Wiesbaden, Springer, 2015.
- DIN 18205 1996 Norm DIN 18205 April 1996. *Bedarfsplanung im Bauwesen*.
- Ebert 2012 Ebert, C.: *Systematisches Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2012.
- Ehrlenspiel und Meerkamm 2013 Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2013.
- Evbuomwan et al. 2002 Evbuomwan, N. F. O.; Kamara, J. M., Anumba, C. J.: *Capturing client requirements in construction projects*. London: Thomas Telford, 2002.
- Feldhusen et al. 2013 Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl / Beitz Konstruktionslehre*. Berlin: Springer, 2013.
- Fernie et al. 2003 Fernie, S., Green, S. D., Weller, S. J.: *Requirements Management. Dilettantes, discipline and discourse: Requirements Management for construction*. In: *Engineering, Construction and Architectural Management 10* (2003), Nr. 5, S. 354-367.
- Girmscheid 2010a Girmscheid, G.: *Anforderungs-Engineering-Prozessmodell (AEP) - Teil 1*. In: *Bauingenieur*. Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag Band 80 (2012), S. 197-203.
- Girmscheid 2010b Girmscheid, G.: *Anforderungs-Engineering-Prozessmodell (AEP) - Teil 2*. In: *Bauingenieur*. Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag Band 80 (2012), S. 204-209.
- Honold et al. 2016 Honold, C.; Binz, H.; Roth, D.: *Planning and developing Adaptive Buildings require methodical support*. In: Boks, C.; Sigurjonsson, J.; Steinert, M.; Vis, C.; Wulvik, A.: *Proceedings of Norddesign 2016*, Trondheim, Norwegen.
- Krönert 2010 Krönert, N.: *Anforderungs-Engineering im Bauwesen*. ETH Zürich, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Dissertation, 2010.
- Pohl 2008 Pohl, K.: *Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2008.
- Pohl und Rupp 2009 Pohl, K.; Rupp, C.: *Basiswissen Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2009.
- Rupp et al. 2014 Rupp, C.; die Sophisten: *Requirements Engineering und –Management*. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- Sobek 2007 Sobek, W.: *Entwerfen im Leichtbau*. In: Themenheft Forschung, Universität Stuttgart, Ausgabe 3, 2007.
- Schulze 2016 Schulze, S.-O.: *Systems Engineering*. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- VDI 2206 2004 VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, 2004.
- VDI 2221 1993 VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Verein Dt. Ing., Beuth Verlag, 1993.
- Versteegen 2004 Versteegen, G.: *Anforderungsmanagement*. Berlin: Springer-Verlag, 2004.

Das Methoden Spiel „SPALTEN Expedition“: Akzeptanzsteigerung durch Erfahrungen und Erfolgserlebnisse

Nicolas Reiß, Albert Albers, Michael Janke, Fabian Popp, Nikola Bursac

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland,
Nicolas.Reiss@kit.edu

Abstract: Es existieren eine Vielzahl von Methoden, die ein Produktentwickler während des ganzen Produktentstehungsprozesses einsetzen kann, um in seiner Arbeit unterstützt zu werden und den gesamten Prozess besser und effizienter gestalten zu können. Gründe dafür, dass die Methoden nicht häufig genug zum Einsatz kommen, sind eine zu geringe Transparenz über relevante, situations- und bedarfsgerechte Methoden, Defizite bei der nutzergerechten Aufbereitung der Methode und ein Mangel an Erfolgserlebnissen beim Einsatz und der Anwendung von Methoden im Alltag. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der Einsatzhäufigkeit und der Akzeptanz von Methoden ist es, diese spielerisch zu erlernen und durchzuführen. Dies kann Anwendungshemmnisse abbauen und den Methodeneinsatz erhöhen. Diese neuartige Herangehensweise wird in der Literatur als "Gamification" bzw. „Game Based Learning“ beschrieben. Im Rahmen der Forschung wurde untersucht wie Methoden im kontrollierten und praxisnahen Umfeld motiviert erlernt und erlebt werden können? Hierzu wurde ein Spielkonzept entwickelt, welches das Erlernen der SPALTEN Methode unterstützt. In diesem Paper wird das Methodenspiel „Die SPALTEN Expedition“ vorgestellt und diskutiert.

Keywords: Methoden, Methodenakzeptanz, Gamification, SPALTEN Methodik, Game Based Learning

1 Einführung

In der Praxis fehlt es häufig an Erfahrungen und Erfolgserlebnissen verbunden mit dem Methodeneinsatz. Ein Mehrwert wird selten wahrgenommen (GRANER, 2012) (ALBERS u. a., 2014). Die Frage ist: Wie können Methoden im kontrollierten Praxisnahen Umfeld erlernt und erfahren werden? Und wie können so schnell tatsächliche Erfolgserlebnisse erreicht werden? Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der Einsatzhäufigkeit und der Akzeptanz von Methoden ist es, diese spielerisch zu erlernen und durchzuführen. Dies kann Anwendungshemmnisse abbauen und den Methodeneinsatz erhöhen. Diese neuartige Herangehensweise wird in der Literatur als "Gamification" bezeichnet (REINERS, 2015) (DETERDING u. a., 2011b). Im Rahmen der Arbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung wurde hierzu ein Spielformat zum Erlernen und Erfahren von Methoden entwickelt. Ziel war es ein Lernspiel zu entwickeln, mit dem am Beispiel der Problemlösungsmethode "SPALTEN", Methoden gelernt und erlebt werden können.

2 Grundlagen

2.1 Gamification

Der Begriff Gamification hat seine Begriffsherkunft aus dem englischen Wort Game, das Spiel bedeutet. Gamification steht für das Aufnehmen von spieletypischen Elementen wie Punkten oder Rätseln in neue Kontexte wie z. B. das Autofahren oder das Anwenden von Entwicklungsmethoden. In der deutschen Literatur wird meist der Anglizismus Gamification verwendet und nicht übersetzt.

Die folgenden Abschnitte werden die Begriffe Game, Gamification und Game Base Learning definieren und voneinander abgrenzen, um ein einheitliches Verständnis zu den Termini und eine Grundlage für die Entwicklung des Spiels zu schaffen. Zur Steigerung des Verständnisses, was genau hinter dem

Begriff Game (Spiel) steckt, folgt in Tabelle 1 eine Auflistung von Definitionen aus unterschiedlichen Jahren.

Tabelle 1: Definition "Spiel", "Game" in Anlehnung an (JUUL, 2003)

Quelle	Definition
(DETERDING u. a., 2011b)	<i>Games are characterized by rules, and competition or strife towards specified, discrete outcomes or goals by human participants."</i>
(AVEDON & SUTTON-SMITH, 2015)	<i>"At its most elementary level then we can define game as an exercise of voluntary control systems in which there is an opposition between forces, confined by a procedure and rules in order to produce a disequibrial outcome."</i>
(CAILLOIS & BARASH, 1961)	<i>"[...] an activity which is essentially: Free (voluntary), separate [in time and space], uncertain, unproductive, governed by rules, make-believe."</i>
(HUIZINGA, 1956)	<i>"[...] a free activity standing quite consciously outside "ordinary" life as being "not serious", but at the same time absorbing the player intensely and utterly. It is an activity connected with no material interest, and no profit can be gained by it. It proceeds within its own proper boundaries of time and space according to fixed rules and in an orderly manner. It promotes the formation of social groupings which tend to surround themselves with secrecy and to stress their difference from the common world by disguise or other means."</i>
(JUUL, 2003)	<i>"A game is a rule-based formal system with a variable and quantifiable outcome, where different outcomes are assigned different values, the player exerts effort in order to influence the outcome, the player feels attached to the outcome, and the consequences of the activity are optional and negotiable."</i>
(KELLEY, 1998)	<i>"a game is a form of recreation constituted by a set of rules that specify an object to be attained and the permissible means of attaining it."</i>
(SALEN & ZIMMERMAN, 2010)	<i>"A game is a system in which players engage in an artificial conflict, defined by rules, that results in a quantifiable outcome."</i>
(SUITS, 1988)	<i>"To play a game is to engage in activity directed towards bringing about a specific state of affairs, using only means permitted by rules, where the rules prohibit more efficient in favor of less efficient means, and where such rules are accepted just because they make possible such activity."</i>

Betrachtet man diese Reihe an Definitionen unterschiedlicher Autoren und unterschiedlichen Jahren lassen sich mehr Gemeinsamkeiten als Unterschiede erkennen. Beispielsweise wird bei allen Definitionen auf die Notwendigkeit von Regeln eingegangen, jedoch nur bei wenigen wird auf das Ergebnis oder eine mögliche Interaktion hingewiesen. Unabhängig davon teilen (HUOTARI & HAMARI, 2012) Spiele in ein System auf, das aus hinreichenden und notwendigen Komponenten besteht. Hierbei werden zwischen systematischen und interaktiven Komponenten unterschieden. Die systematischen Elemente beschreiben den formalen Aufbau des Spiels. Dazu zählen unter anderem die teilnehmenden Spieler, rahmenfestlegende Regeln, Zielkonflikte und ein variabler und ungewisser Spielausgang. Die interaktiven Komponenten beschreiben die Wechselbeziehung des Spielers mit dem Spiel. Grundlegend für die Interaktion sind eine freiwillige Teilnahme und eine daraus resultierende spielerische Erfahrung. Aus dem Wort Game entstammt der neue Trend Gamification. Gamification ist eine beliebte Taktik, um bestimmte Verhaltensweisen zu fördern und die Motivation (TERRILL, 2008). und das Engagement zu erhöhen. Diese Definition wurde erstmals von (TERRILL, 2008) in seinem Blog verwendet. Er nutzte das Wort zur Beschreibung von Spielmechaniken die in Web-Anwendungen, mit dem Ziel der Engagementsteigerung, eingesetzt wurden (HUOTARI & HAMARI, 2012). In den Fokus der Forschung und daraus resultierende Anzahl an Veröffentlichungen zu diesem Thema rückte Gamification erst 2011 (DETERDING u. a., 2011a). Es bleibt festzustellen, dass es noch keine allgemein anerkannte und somit vollständige Begriffsdefinition gibt. In der folgenden Tabelle 2 werden unterschiedliche Definitionen über Gamification aufgelistet und anschließend analysiert.

Tabelle 2: Definition "Gamification"

Quelle	Definition
(BUNCHBALL, 2010)	<i>„Gamification applies the mechanics of gaming to non-game activities to change people's behavior.“</i>
(CHOU, 2013)	<i>"The craft of deriving all the fun and addicting elements found in games and applying them to real-world or productive activities."</i>
(DETERDING u. a., 2011b)	<i>"Gamification is the use of game design elements in non-game contexts."</i>
(HUOTARI & HAMARI, 2012)	<i>Gamification is "a process of enhancing a service with affordances for gameful experiences in order to support user's overall value creation."</i>
(KAPP, 2012)	<i>„Gamification is using game-based mechanics, aesthetics, and game thinking to engage people, motivate action, promote learning, and solve problems in a non-game context.“</i>
(HUANG & SOMAN, 2013)	<i>Series of design principles, processes and systems used to influence, engage and motivate individuals, groups and communities to drive behaviours and effect desired outcomes."</i>

Zieht man die Anzahl in Tabelle 2 von sehr ähnlichen Definitionen, die Reputation und die Zitationshäufigkeit in Betracht wird deutlich, dass zum heutigen Stand der Forschung die Definition von (DETERDING u. a., 2011b) die bestangesehene und meist angewandte ist. Deshalb bildet sie auch die Grundlage für diesen Beitrag und für das entwickelte Spiel über die SPALTEN-Methode. Ziel von Gamification ist es, das Engagement zu erhöhen, Verhaltensweisen ins positive zu verändern und, im Speziellen in Bezug zu den eingangs erwähnten gamifizierten Innovationsprozessen, die Innovationskraft eines Unternehmens zu fördern. Nach dieser Definition ist Gamification eine schon jetzt häufig eingesetzte Art und Weise, um spielerisch eine Bindung zum Produkt herzustellen und somit Einfluss auf Kunden und Nutzungsverhalten zu haben. Allgemein lässt sich das Ziel von Gamification als eine Motivationssteigerung zur Verhaltensveränderung zusammenfassen. HAMARI (2013) belegt in einer umfassenden Literaturrecherche über empirische Studien, dass Gamification eine positive Wirkung aufweist. In der Literaturrecherche wurden die bisherigen Bemühungen zu empirischen Untersuchungen von Gamification in Komponenten untergliedert, um die Ergebnisse und den Stand der Forschung strukturell analysieren zu können.

„Game Based Learning“ beruht auf dem Gamificationansatz, jedoch mit dem Fokus, dass das Lernen mit Hilfe von Spielen wie von selbst gelingen soll. Nach (KAPP, 2012) ist Game Based Learning, oder wie er es bezeichnet, ein *„Learning Game [...] a self-contained unit and has all the elements needed to engage and play for separate time. It has a clear beginning, middle, and end. Game Based Learning is using an actual game to teach or reinforce a skill“*. Dies zeigt jedoch, dass freies spielerisches Lernen meist nichts Abstraktes, keine Formeln, Daten oder Fakten lehrt und wie der Name schon sagt, eine sehr intuitive und freie Variante des Spielens darstellt. Somit kann ein Spiel nur einen begrenzten Raum des Möglichen abdecken, in dem agiert werden kann. Dieser Raum bedingt ein zielführendes Handeln, es sei denn der Spieler wird kreativ und erweitert das Spiel, was sich beispielsweise im Betrügen ausdrückt. Daraus lässt sich schließen, dass spielen lernfördernd sein kann, jedoch immer nur in einem Ausmaß, indem es für das jeweilige Spiel gebraucht wird.

Beim Game Based Learning ist es wichtig, „den Lerninhalt so in das Spiel zu integrieren, dass man ihn sich aneignen muss, um erfolgreicher spielen zu können“ (FUCHS, 2014). Es muss zu einer ungezwungenen Integration von Lerninhalten kommen, ansonsten besteht die Gefahr, dass die pädagogische Intention zu sehr in den Vordergrund rückt und somit die für den Spaß des Spiels essentielle Zweckfreiheit verlorengeht. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass der Lernstoff nicht „zu gut“ integriert wird. Sonst ist es möglich, dass der Spieler nicht weiß, was er lernt und deshalb gesondert wieder ins Bewusstsein gerufen werden muss. Dies kann beispielsweise durch eine nachgelagerte Diskussion geschehen und somit das Gelernte in die Wirklichkeit transferiert werden. Zusammenfassend beschreibt (FUCHS, 2014) das Design von Lernspielen als ein unauflösbares „Spannungsverhältnis zwischen der Zweckfreiheit des Spiels und der Zweckorientierung der Pädagogik“

2.2 Die SPALTEN Methodik

Die SPALTEN Problemlösungssystematik ist eine von (ALBERS u. a., 2005) entwickelte Methodik zum gezielten Problemlösen in Not und Planungssituationen. Sie wurde 2002 (ALBERS u. a., 2002) erstmalig veröffentlicht und in den vergangenen 15 Jahren stets weiterentwickelt und konsequent angewendet (ALBERS u. a., 2016). Die SPALTEN Problemlösungsmethode setzt sich hierbei aus den folgenden Elementen zusammen: Die 7 aufeinander aufbauende SPALTEN Aktivitäten geben Schritte eines immer wiederkehrenden Prozesses zur gezielten Problemlösung wieder. Außerdem spielt bei der SPALTEN Methodik die Betrachtung des Problemlösungsteams (PLT) eine entscheidende Rolle. Der Prozess sollte immer mit der Definition des PLT starten, welches kontinuierlich überprüft und adaptiert werden sollte. Während des PL-Prozesses (PLP) werden kontinuierlich im PL-Team Ideen zu Vorgehensweise und Problemlösung (Maßnahmen) generiert. Häufig kann auf die Ideen jedoch nicht direkt eingegangen werden. Diese Ideen sollten sofort fixiert und in dem Kontinuierlicher Ideenspeicher (KIS) abgelegt werden, um sie im Verlauf des PLP nutzen zu können. Der Informationscheck (IC) sieht vor, dass bevor der nächste Prozessschritt angegangen wird, sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Ist aktueller Wissens-/Informationsstand ausreichend?
- Informationsbasis ausreichend genutzt?
- Nutzen / Aufwand - Verhältnis zur Generierung neuer Informationen überprüfen
- Ist der Detaillierungsgrad des Prozessschrittes der Situation angemessen?

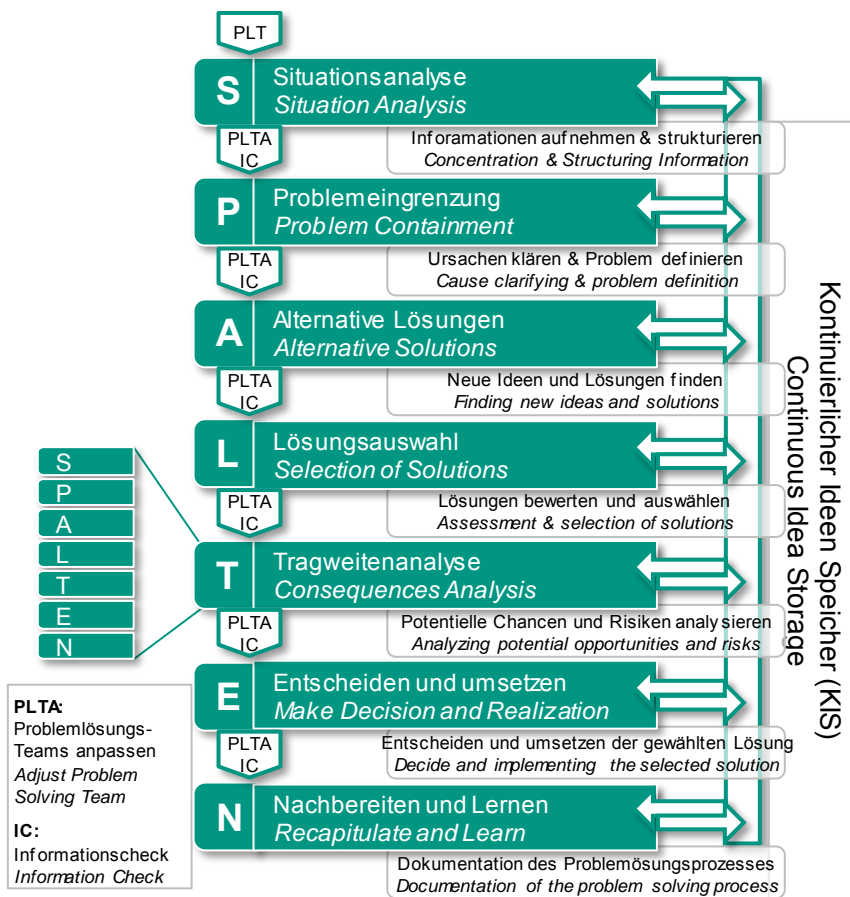


Abbildung 1: SPALTEN Problemlösungsmethodik (ALBERS u. a., 2016)

Die Schritte der SPALTEN Methodik wurden als Akronym entwickelt, welches dem Problemlöser hilft sich die Schritte und ihre logische Abfolge zu merken und somit Anwendungshürden zu minimieren. Dabei bilden die einzelnen Aktivitäten einen atmenden Prozess in dem stetig Informationen generiert und anschließend verdichtet werden.

Im Rahmen einer Empirischen Studie mit $n = 108$ Ingenieuren (ALBERS u. a., 2016) wurde die Wirksamkeit der SPALTEN-Methode an den aktuellen Herausforderungen der Produktgenerationsentwicklung nach Albers (ALBERS u. a., 2015) evaluiert. Die folgenden Aussagen fassen die Ergebnisse der Studie zusammen und bestätigen einen signifikanten Mehrwert der SPALTEN Methodik:

- SPALTEN gibt mir einen roten Faden zur Orientierung vor (80% Zustimmung)
- SPALTEN hilft mir große Probleme in Handhabbare zu zerlegen (75% Zustimmung)
- Das Akronym hilft mir mich an die Schritte zu erinnern (90% Zustimmung)
- SPALTEN hilft mir Probleme fokussierter zu lösen (75% Zustimmung)
- SPALTEN hilft mir rational und nicht zu impulsiv vorzugehen (75% Zustimmung)
- SPALTEN schränkt mich bei meinem natürlichen Problemlösungsverhalten nicht ein (70% Zustimmung)
- SPALTEN ist auch auf nicht technische Probleme transferierbar (70% Zustimmung)

3 Vorgehen zu Erstellung des Methoden Spiels

Ziel der diesem Beitrag zu Grunde liegenden Arbeiten war es ein Lernspiel zu entwickeln, mit dem die SPALTEN-Problemlösungsmethodik gelernt und erlebt werden kann. Das Lernspiel wurde über einen Zeitraum von 5 Monaten agil entwickelt. Hierbei wurde die Scrum Vorgehenssystematik zur Entwicklung des physischen Lernspiels eingesetzt. Das zu entwickelnde Methodik-Lernspiels soll neben dem Spielspaß den Spielern ermöglichen, die SPALTEN Methodik zu lernen und zu erleben. Das Entwicklungsziel bestand in der Entwicklung eines physischen Lernspiels, mit dem in Kleingruppen (3-7 Personen) die SPALTEN-Problemlösungsmethodik erlernt und erlebt werden kann. Primär soll das Spiel im Rahmen eines SPALTEN-Workshops im Industrieumfeld Einsatz finden, bei dem die Teilnehmer zuerst die Theorie lernen, welche sie dann anschließend im Spiel anwenden können. Es ist für kleine Spielgruppen mit technisch, akademischen Hintergrund konzipiert und soll vom zeitlichen Rahmen maximal einen halben Tag einnehmen.

Basierend auf den in Kapitel 2 gelisteten Definitionen muss das SPALTEN-Spiel die folgenden Kriterien erfüllen:

1. Regeln: Das Spiel muss durch Regeln eingegrenzt werden.
2. Variable und quantifizierbare Ergebnisse: Das Ergebnis des Spiels kann unterschiedlicher Natur sein und gemessen werden.
3. Ergebnis hat einen Wert: Die unterschiedlichen Ergebnisse des Spiels können unterschiedlichen Werten, sowohl positiv als auch negativ, zugewiesen werden.
4. Spieleraufwand: Der Spieler muss Anstrengungen unternehmen um das Ergebnis beeinflussen zu können.
5. Verbundenheit zum Spielergebnis: Die Spieler sind mit dem Spiel insoweit verbunden, dass der Verlierer unglücklich ist bei einem negativen Ergebnis und der Gewinner glücklich bei einem positiven Ergebnis.

Diese Kriterien gelten als allgemeine Kriterien die das Spiel erfüllen muss, damit es überhaupt als ein solches gilt. Weitere Rahmenbedingungen und somit auch spezifischere Anforderungen wurden speziell für das Spiel festgelegt. Die konkrete Ausgestaltung des Spiels wird im Folgenden konkretisiert.

4 Das Methoden Spiel „SPALTEN Expedition“

Das Gesamtspiel besteht aus einem Hauptspiel, einem Auswahltest, was die Zusammenstellung des Problemlösungsteams darstellt und wie die SPALTEN Methodik selbst aus sieben Stationen (Station, S, P, A, L, T, E, N). Das Hauptspiel der SPALTEN Expedition verleiht dem Spiel den Brettspielcharakter. Es ist der rote Faden des Spiels und verbindet so die einzelnen Stationen miteinander. Auf der „Reise“ zwischen den Stationen müssen Hinweise gesammelt werden, um am Ende des Spiels die richtige Insel ansteuern zu können. Das kooperative Spiel (Abbildung 2), welches aus

verschiedenen Stationen und einem Brettspielartigen Hauptspiel besteht, vermittelt die Anwendung unterschiedliche Entwicklungsmethoden. Jede Station repräsentiert hierbei eine Aktivität der SPALTEN-Methodik, wie zum Beispiel die Station Situationsanalyse. Die sieben Stationen haben den Fokus die SPALTEN Methodik zu erlernen, erleben und anzuwenden. Dabei wurde für jede Station ein eigenes Problem-Szenario erschaffen, was bedeutet, dass die SPALTEN Schritte nicht hintereinander an einem einzigen Problem abgearbeitet werden. Jede Station ist ein modulares Teil-Spiel und wird durch das Hauptspiel miteinander verknüpft. Der modulare Aufbau der Stationen ermöglicht eine einzelne Bewertung der Teilspele, eine gezielte Weiterentwicklung einzelner Stationen und eine Ableitung bedarfsspezifischer Schulungskonzepte.

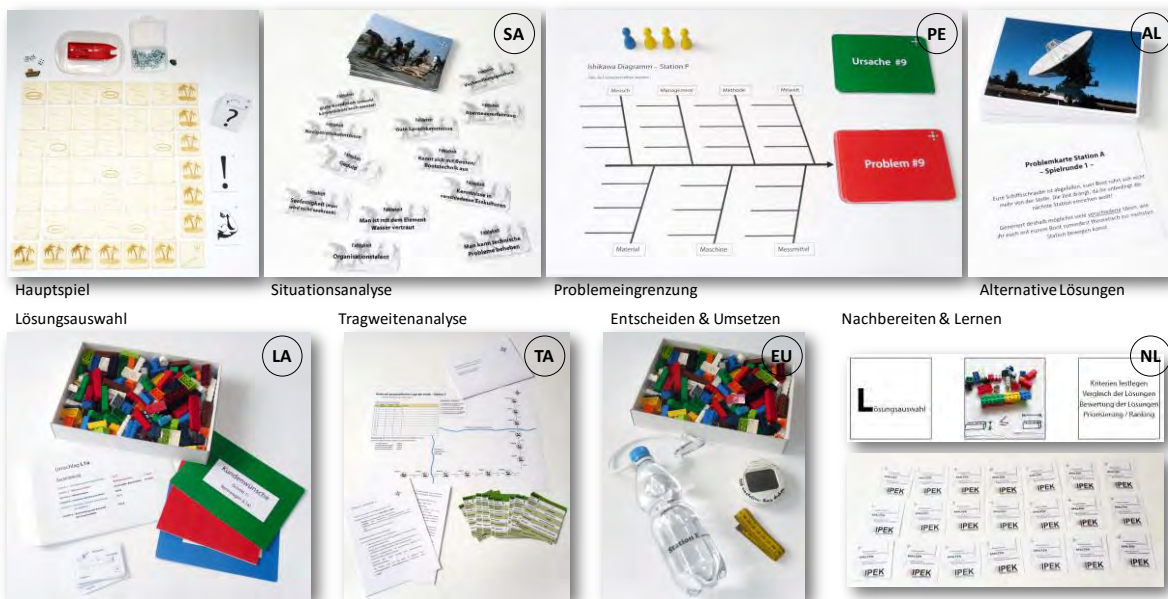


Abbildung 2: Das Methoden Spiel „SPALTEN Expedition“

Hauptspiel: Das Hauptspiel besteht aus 49 Holzkarten. Rechts der Holzkarten sind die Frage-, Aktions-, und Fähigkeitskarten dargestellt. Alle Fragekarten wurden so entwickelt und recherchiert, dass sie thematisch zu einer Schiffsexpedition passen. Um das Hauptspiel interessanter zu machen, wurde hier wurde besonders Wert daraufgelegt, dass die Fragen bzw. deren Antworten die Spieler verblüffen, was besonders durch die Erklärung der Lösung auf jeder Karte erzielt werden soll.

Spielziel ist es, die SPALTEN-Insel zu entdecken und dabei nicht unterzugehen. So lautet Spielziel: „Ihr müsst herausfinden, welche der 12 Inselkarten die SPALTEN Insel ist, um diese am Ende mit eurer Spielfigur ansteuern zu können. Bis zum Erreichen der Insel dürft ihr allerdings mit eurem Boot auch nicht untergehen, daher müsst ihr bei allen Stationen und auf den Wegen dazwischen immer euer Bestes geben.“

Folgende Spielmechanik wurde für das Hauptspiel entwickelt.

- Man muss alle Stationen in der Reihenfolge „Auswahltest – S – P – A – L – T – E“ mit der Spielfigur ansteuern. Erst danach darf einmalig eine Insel-Spielfeldkarte angesteuert werden, von der man vermutet, dass es sich hierbei um die SPALTEN-Insel handelt.
- Um von Station zu Station zu kommen, darf man maximal 5 Züge fahren (ob man auf direktem Weg oder mit einem Umweg zur nächsten Station geht, ist der Gruppe freigestellt).
- 1 Zug entspricht:
 - Bewegen der Spielfigur auf eine benachbarte Spielfeldkarte in eine beliebige Richtung (diagonal, horizontal und vertikal)
 - Spielfeldkarte, auf die man sich bewegt, sofort umdrehen und Spielfigur draufsetzen
 - Entsprechende Anzahl an Steinen in das rote Boot legen, geht das Bot unter, ist das Spiel verloren
 - Aktion, die auf der Spielfeldkarte beschrieben ist, durchführen

Station Situationsanalyse: Die erste Station der SPALTEN Aktivitäten ist gleichzeitig ein Kennenlernspiel, bei dem die Spieler sozusagen eine Situationsanalyse in Bezug auf sich selbst durchführen. Die Spieler können sich bei dieser Station Fähigkeiten erspielen, die ihnen im weiteren Hauptspiel weiterhelfen. Ziel ist es, eine Frage (z. B. Hast Du einen Sportsbootführerschein?) immer einem Mitspieler zu stellen, der diese am ehesten mit „Ja“ beantworten kann. Dadurch bekommen die Spieler ihre Fähigkeitsplättchen, die ihnen im weiteren Spiel helfen. Den Spielern wird direkt erklärt, dass die Spieler jetzt eine Situationsanalyse durchführen. Sie sammeln Informationen über ihre Fähigkeiten als Problemlösungsteam und lernen sich so besser kennen. Es wird also eine Grundlage geschaffen, um einerseits kommende Stationen besser als Team lösen zu können und andererseits helfen die erworbenen „Fähigkeiten“ im Folgenden im Hauptspiel. Die Spieler sollen hier lernen, dass eine gute Situationsanalyse sehr wichtig für den folgenden Problemlösungsprozess ist.

Station Problemeingrenzung: Bei der Station Problemeingrenzung müssen die Spieler die Ursache zu einem Problem finden. Dazu haben sie eine begrenzte Anzahl an Fragen zur Verfügung. Als Hilfsmittel wird den Spielern das Ishikawa-Diagramm an die Hand gegeben, was sie bei der Ursachenfindung unterstützen soll. Wie bei allen kommenden Stationen dürfen die Spieler als Belohnung für gute Leistungen Steine aus dem Boot nehmen. Die Spieler müssen bei der Station P die richtige Ursache zu einem gegebenen Problem herausfinden (z. B. der Propeller dreht nicht). Dies erfolgt durch möglichst geschicktes Fragestellen, denn belohnt werden die Spieler nur, wenn sie für eine Problemlösung weniger als acht Fragen benötigen. Die Spieler werden bei der Ursachensuche durch das Ishikawa-Diagramm unterstützt, welches sie selbständig möglichst vollständig vor dem eigentlichen Fragestellen ausfüllen müssen. Bei der SPALTEN-Aktivität Problemeingrenzung muss das Problem in Teilprobleme zerlegt werden, um so den Kern und die Ursache des Problems zu finden. Genau das wird bei der Station P von den Spielern auch direkt verlangt. Die Spieler dürfen die erste Ursache nur durch Fragestellen finden. Beim Herausfinden der nächsten Ursache werden die Spieler durch das Ishikawa-Diagramm unterstützt. Die Spieler lernen also nicht nur eine konkrete Methode in dem Spiel kennen, sie erleben auch einen Aha-Moment, da die Spieler mit hoher Wahrscheinlichkeit die Ursache mithilfe des Ishikawa-Diagramms schneller und einfacher herausfinden als ohne. Der Grund hierfür ist, dass Aspekte oft vergessen werden, die für das Problem ebenfalls relevant sein können. Das Ishikawa-Diagramm hilft hierbei direkt am Anfang der Ursachensuche sich einen Überblick über alle Einflüsse zu verschaffen.

Station Alternative Lösungen: Hier müssen die Spieler in begrenzter Zeit möglichst viele abstrakte Ideen generieren. Dazu verwenden die Spieler die Reizbildmethode. Bei dieser Station lernen die Spieler eine Kreativitätsmethode kennen. Die Reizbildmethode fördert das Generieren von vielen abstrakten Ideen ohne die Anwender bei ihrer Kreativität einzuschränken. Durch den Zeitdruck, der durch die Zeitbegrenzung entsteht, nennen die Spieler erfahrungsgemäß oft ähnliche Ideen zu unterschiedlichen Bildern. An dieser Stelle kann bei der Nachbereitung und auch während des Spiels durch einen Spielleiter auf die Bedeutung des Informations-Checks eingegangen werden. Es muss im Anschluss an die Kreativitätsmethode geprüft werden, ob das Ergebnis auch zu der aktuellen Situation passt, was bei der Station heißt zu überprüfen, ob die generierte Idee auch wirklich das Problem löst. Hilfreich beziehungsweise nötig ist hierfür, dass die generierten Ideen, wie in der Anleitung ebenfalls gefordert, aufgeschrieben werden. Bei der Nachbereitung kann hierzu die Analogie zum KIS (Kontinuierlicher Ideen Speicher) hergestellt werden, da es hilfreich ist jegliche Ideen zumindest kurz schriftlich festzuhalten.

Station Lösungsauswahl: Bei dieser Station lesen die Spieler zunächst Kundenwünsche und bauen anschließend aus Lego ein Modell nach, welches ein Spieler auf einer Abbildung sieht (z. B. ein Segelschiff mit zwei Masten) und seinen Mitspielern lediglich beschreiben darf. Aus den hierdurch entstehenden Lösungen wird anschließend die beste Lösung ausgewählt. Die technischen Beurteilungskriterien wurden hierzu vorher aus den Kundenwünschen abgeleitet („der vordere Mast ist größer als der hintere“). Bezüglich der SPALTEN-Methodik lernen die Spieler bei dieser Station, dass es darauf ankommt die richtigen Zielkriterien für die anschließende Bewertung und die Auswahl der Lösung festzulegen. Des Weiteren kommt es in der Realität auch immer darauf an aus den Kundenwünschen (bei unterschiedlichen Windstärken Segeln) die wichtigsten technischen Anforderungen abzuleiten. So hilft es den Spielern, wenn sie wissen wie sie Kundenwünsche auf technische Ausprägungen des Späteren Produktes übertragen können. Dies hilft zum einen dem

Beschreiber des Modells, auf welche Bereiche er sich beim Beschreiben konzentrieren muss, zum anderen wissen die übrigen Mitspieler auf was sie beim Nachbauen des Modells achten müssen.

Station Tragweitenanalyse: Die Spieler führen bei dieser Station eine Tragweitenanalyse durch, indem sie die Folgen einer Umweltkatastrophe untersuchen. Dabei ist Teamwork gefragt, da eine große Datenmenge nach relevanten Daten gefiltert werden muss. Das DIN A3 große Spielfeld ist für den Einmalgebrauch konzeptioniert, wodurch die Spieler sich darauf Notizen machen können. Die Informationen bezüglich der einzelnen Inseln sind auf den grünen, laminierten Karten abgedruckt. Innerhalb von 20 Minuten müssen die Spieler die gegebenen Informationen untersuchen und die relevanten herausfiltern. Bei der Tragweitenanalyse geht es darum durch einen Perspektivwechsel Chancen und Risiken einer Lösung abzuschätzen. In diesem Fall ist die Lösung, dass die Inselbewohner vor der Katastrophe flüchten. In der Rolle von Katastrophenhelfern müssen die Spieler diesbezüglich die Folgen untersuchen.

Ein weiterer großer Faktor, um die Station erfolgreich zu lösen, ist, dass die Gruppe gut zusammenarbeitet. Die Menge an Informationen kann nur erfolgreich verarbeitet werden, wenn die Gruppe es schafft sich gut zu organisieren, insbesondere geschickt die Aufgaben zu verteilen. Im Zuge der Nachbereitung kann hierauf eingegangen werden, wie die Aufgaben vielleicht besser verteilt werden können.

Station Entscheiden und Umsetzen: Bei der Station E müssen die Spieler als Team ein möglichst hohes Modell eines Aussichtsturms aus Lego bauen, der eine Last von 0,5 kg trägt. Limitiert sind die Spieler durch die Zeit und die Anzahl der zur Verfügung stehenden Legosteine. Bei der SPALTEN-Aktivität Entscheiden und Umsetzen muss sich für die Lösung aktiv entschieden werden um sie anschließend umzusetzen. Die Entscheidung einen Aussichtsturm zu bauen, wird in dem Spiel vorgegeben. Bei der Umsetzung geht es allerdings auch um Risikominimierung und Chancenoptimierung. Genau dies wird von den Spielern in der Planungsphase des Baus verlangt. So kann beispielsweise das Risiko des Umfallens durch eine hohe Stützpfileranzahl gesenkt werden. Bei dieser Station kann in der Nachbereitung auch auf den fraktalen Charakter der SPALTEN Methodik eingegangen werden. Obwohl sich die Spieler in der „Entscheiden und Umsetzen“ Aktivität befinden, durlaufen sie wieder einen kleinen SPALTEN Prozess, da sie erst die Situation analysieren, mögliche Lösungen generieren, die Tragweite hinsichtlich Chancen und Risiken abwägen müssen etc. Des Weiteren ist bei der Bauphase die Zeit relativ knapp bemessen. Daher kann hier bei der Nachbereitung auf die Kommunikation und Aufgabenverteilung der Gruppe eingegangen werden und mögliche Verbesserungen aufgezeigt werden.

Station Nachbereiten und Lernen: Die letzte Station, „Die Heimreise“ wird gespielt, nachdem die Spieler die richtige Insel gefunden haben, also nachdem das Hauptspiel zu Ende ist. Dabei wird das vergangene Spiel nochmal reflektiert und die einzelnen Stationen den dazugehörten Aktivitäten der SPALTEN Methodik zugewiesen. Bei dieser Station spielen die Spieler ein Memory bei dem sie Drillings finden müssen. Insgesamt gibt es 7 Drillings, da es auch 7 SPALTEN Aktivitäten gibt. Jede Aktivität ist, aufgeteilt in den Namen der Aktivität, einem Bild der entsprechenden Station sowie einer stichwortartigen Beschreibung der Aktivität. Die Spieler reflektieren hier nochmal das gesamte Spiel und leiten sich so her, welche Station welche SPALTEN Aktivität repräsentiert. Da auf einer Karte jedes Drillings die Aktivität stichwortartig zusammengefasst ist, wird den Spielern nochmal ins Gedächtnis gerufen, worauf es bei den jeweiligen Aktivitäten ankommt. Ein moderierender Spielleiter hat hier die Möglichkeit die Reflektion- und Lernphase nach Belieben auszubauen und vor allem an die jeweilige Spielergruppe anzupassen. Einerseits kann auf den psychologischen Teil wie Gruppendynamik oder Rollenaufteilung innerhalb der Gruppe eingegangen werden, andererseits kann auch auf die SPALTEN Methodik in Bezug auf die SPALTEN Expedition im Detail eingegangen werden.

5 Diskussion

Die Evaluierung erfolgt anhand von vier Stufen mit unterschiedlichen Gruppen. Zunächst wurde das Spiel innerhalb der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik am Institut für Produktentwicklung in Karlsruhe evaluiert (n=6). Sämtliche Teilnehmer hatten fundierte Kenntnisse der SPALTEN Methodik. So konnte das Spiel auf inhaltliche Konsistenz getestet werden. Die zweite Stufe bildete eine Studie mit Studierenden (n=12) der Integrierten Produktentwicklung wodurch eine Durchführbarkeit im Rahmen

des Lehrkonzeptes der Integrierten Produktentwicklung sichergestellt werden konnte. Dazu wurde die Gruppengröße variiert, um mögliche Probleme bei unterschiedlicher Spieleranzahl identifizieren zu können. Zwischen den Stationen wurde zur Evaluation um gezieltes Feedback gebeten. Um die Praxistauglichkeit bei der Anwendung zur Weiterbildung zu untersuchen wurde das Spiel im Rahmen eines Workshops mit (n=6) Vertretern aus Unternehmen mit unterschiedlichen Größen und aus unterschiedlichen Branchen eingesetzt. Aufgrund der positiven Ergebnisse wurde das Spiel in das IPEK Angebotsportfolio aufgenommen und dient als Schulungskonzept zur Steigerung der Problemlösungskompetenz. Dieses wurde im Rahmen eines Workshops bei einem großen international agierenden Automobilzulieferer mit (n=7) Experten aus der Entwicklungspraxis eingesetzt. Während allen vier Evaluationsstufen wurde das Vorgehen innerhalb der Gruppen und die Ergebnisse analysiert und dokumentiert. Zusätzlich beantworten die Testspieler zwischen jeder Station und während des Gesamtspiels Fragen auf einem standardisierten Fragebogen. Ausgewählte Ergebnisse der Studie sind Abbildung 3 zu entnehmen.

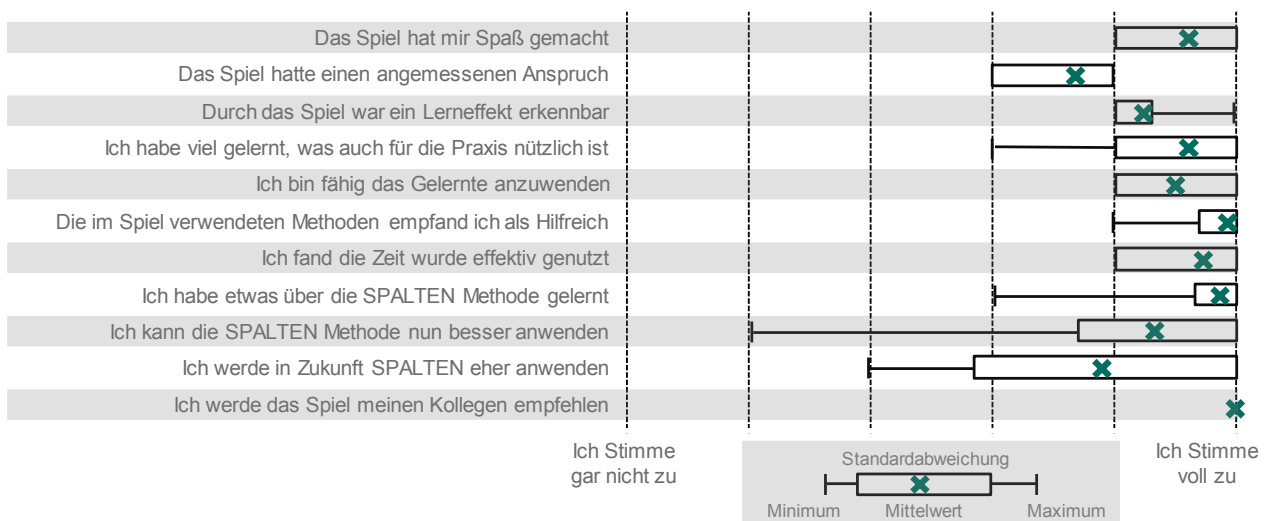


Abbildung 3: Ergebnisse der Spielevaluation (N=31)

Die Ergebnisse zeigen eine sehr positive Bewertung des Spiels. Die vereinzelt Ausreißer sind dadurch zu begründen, dass im ersten Durchgang SPALTEN-Experten teilgenommen haben, die die Methode bereits sehr gut kannten und regelmäßig anwendeten. Neben der Evaluation des Lernerfolgs, kann ein hoher Teambuilding-Charakter identifiziert werden, da die Spieler vier Stunden sehr intensiv zusammenarbeiten müssen, um zum Erfolg zu kommen. Ebenso lässt sich durch Beobachten der Spieler viel über ihre Persönlichkeit aussagen, da die Spieler tief ins Spiel eintauchen und weniger aktiv ihr Verhalten steuern.

Die Vorgehensweise zur Gamification von Methoden kann für unterschiedliche Methoden verwendet werden. So können durch den modularen Spielaufbau neben den bereits eingesetzten Methoden (wie dem Ishikawa Diagramm) weitere Methoden in das Hauptspiel integriert werden.

Literatur

- | | |
|-------------------|--|
| Albers u. a. 2002 | Albers, A.; Saak, M.; Burkardt, N.: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-methode. in: 47. internationales wissenschaftliches Kolloquium : Ilmenau, 2002 |
| Albers u. a. 2005 | Albers, A.; Burkardt, N.; Meboldt, M.; Saak, M.: SPALTEN Problem solving methodology in the product development (2005) |
| Albers u. a. 2014 | Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Urbanec, J.; Lüdcke, R.: Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application. in: proceedings of Norddesign 2014 |

- Albers u. a. 2015 Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung. Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Proceedings of the Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. SSP. Stuttgart, 2015
- Albers u. a. 2016 Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Breitschuh, J.: 15 Years of SPALTEN Problem solving methodology in product development. in: proceedings Norddesign 2016
- Avedon, Sutton-Smith 2015 Avedon, E. Sutton-Smith, B.: *The Study of Games*. New York, N.Y. u.a : Ishi Press, 2015
- Bunchball 2010 Bunchball, I.: Gamification 101: An introduction to the use of game dynamics to influence behavior. in: white paper (2010)
- Caillois, Barash 1991 Caillois, R. ; Barash, M.: man, play, and games : university of illinois press, 1961.
- Chou 2013 Chou, yu-kai: octalysis: Complete gamification framework. in: yu-kai chou & gamification (2013).
- Deterding u.a. 2011a Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L.: From game design elements to gamefulness: Defining „gamification“.in: : acm press, 2011
- Deterding u.a. 2011b Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L.: gamification: toward a definition. in: chi 2011 gamification workshop proceedings. vancouver, 2011b
- Graner 2013 Graner, M.: Der einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten: Eine empirische Untersuchung der Rahmenbedingungen und Auswirkungen. 1. auflage: 2013. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012
- Hamari 2013 Hamari, J.: Transforming homo economicus into homo ludens: A field experiment on gamification in a utilitarian peer-to-peer trading service. in: Electronic commerce research and applications bd. 12 (2013), s. 236–245
- Huang, Soman 2013 Huang, W. ; Soman, D.: gamification of education : research report series: behavioural economics in action, 2013
- Huizinga 1956 Huizinga, J.: Homo ludens: Vom Ursprung der Kultur im Spiel: Rowohlt, 1956.
- Huotari, Hamari 2012 Huotari, K.; Hamari, J.: defining gamification: a service marketing perspective. in: acm press, 2012
- Juul 2003 Juul, J.: The game, the player, the world: Looking for a heart of gameness. in: Level up: Digital games research conference, 2003
- Kapp 2012 Kapp, K.: The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education: john wiley & sons, 2012
- Kelley 1998 Kelley, D.: The art of reasoning. New York: w.w. norton, 1998
- Salen, Zimmerman 2010 Salen, K.; Zimmerman, E.: Rules of play: Game design fundamentals. Nachdr. aufl. cambridge, mass.: the MIT Press, 2010
- Suits 1988 Suits, B.: Tricky triad: Games, play, and sport. in: Journal of the philosophy of sport bd. 15, s. 1–9, 1988
- Terrill 2008 Terrill, B.: My coverage of lobby of the social gaming summit. in: Bret on social games (2008)
- Fuchs 2014 Fuchs, M.: Rethinking gamification. Lüneburg : Meson-press, 2014
- Reiners 2015 Reiners, T.: Gamification in education and business. Cham : Springer, 2015

Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses durch agile Entwicklungsmethoden

Ina Maier¹, Lisa Kurz¹, Wilhelm Bauer²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, 70569 Stuttgart, Deutschland

ina.maier@iat.uni-stuttgart.de

lisa.kurz@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, 70569 Stuttgart, Deutschland

wilhelm.bauer@iao.fraunhofer.de

Abstract: Bedingt durch zunehmende Globalisierung, steigende Vernetzung und höheren Wettbewerbsdruck haben Produkte eine stetig kürzer werdende Verweildauer am Markt. Um als Unternehmen wettbewerbsfähig zu bleiben, ist eine effektive, effiziente und strukturierte Entwicklung neuer Produkte unumgänglich. Der hier vorgestellte Entwicklungsansatz soll helfen, den Entwicklungsprozess physischer Produkte zu beschleunigen und zu verbessern. Der Ansatz basiert auf der in der Softwareentwicklung etablierten agilen Entwicklungsmethode Scrum. Deren Kernelemente sind die freie Aufgabenwahl durch die Mitarbeitenden, das „Jeder kann alles“-Prinzip sowie klare Rollen und Regeln. In diesem Paper werden die Möglichkeiten und Grenzen einer Übertragung der agilen Methode Scrum auf die physische Produktentwicklung betrachtet. Der Beitrag endet mit einer kritischen Diskussion und zeigt weiteres Forschungspotential auf.

Keywords:

Methodische Produktentwicklung, Scrum, Wissensmanagement

1 Ausgangssituation und Motivation

In diesem Kapitel wird in einem ersten Schritt die momentane Ausgangssituation am Markt betrachtet. Hierbei wird der Schwerpunkt auf die Entwicklung der letzten vier Jahrzehnte gelegt. Seit den 1980er Jahren ist ein weltweiter Trend hin zu immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen zu erkennen (Allweyer 2005; Brunn 2009; Freiling und Reckenfelderbäumer 2010; Stein 2009, vgl. Bild 1).

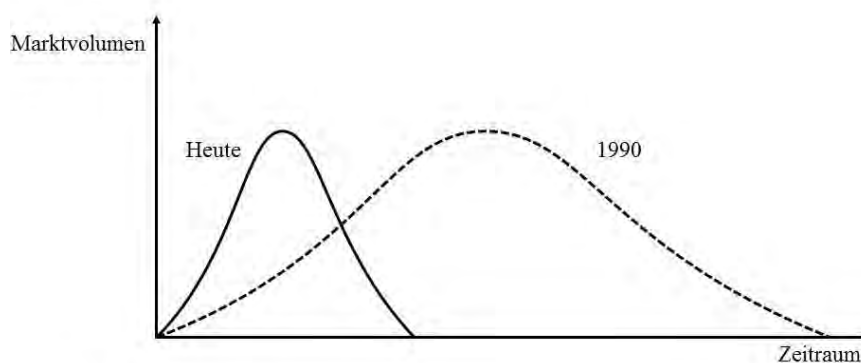


Bild 1: Entwicklungstrends bei den Produktlebenszyklen nach Stein (2009)

Unter einem Produktlebenszyklus wird nach Ellinger (1961) die Verweildauer eines Produkts am Markt verstanden. Wie auf Bild 2 dargestellt wird, durchschreitet ein Produkt während seiner Zeit am Markt die Phasen Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und Degeneration. Der Produktlebenszyklus endet, wenn das Produkt vom Markt genommen wird oder durch ein Nachfolgeprodukt ersetzt wird (Spindler 2016).

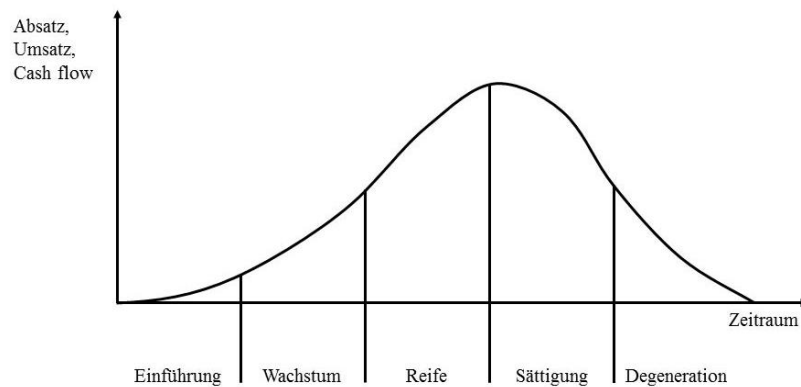


Bild 2: Produktlebenszyklus nach Heinen (1984)

Basierend auf dem eingangs erwähnten Trend hin zu stetig kürzeren Produktlebenszyklen leitet Allweyer (2005) die Forderung an Unternehmen ab, den Prozess zur Entwicklung und die Einführung neuer Produkte zu beschleunigen, um konkurrenzfähig zu bleiben. Um jedoch der Komplexität und Wissensintensität des Produktentwicklungsprozesses bei der gleichzeitigen Zielsetzung einer kürzeren Entwicklungsdauer gerecht zu werden, bedarf es im Rahmen des Wissensmanagements entsprechender Methoden (Lindemann 2016). Daraus leitet sich die Motivation zur Entwicklung einer Methode ab, die die Produktentwicklung beschleunigen kann. Ziel dieser Methode ist es, Produkte frühzeitig an den Markt zu bringen, um sich damit als Unternehmen eine gute und sichere Position am Markt zu erarbeiten und damit ein langfristiges Bestehen des Unternehmens zu sichern.

Von dieser Perspektive ausgehend leitet sich die zentrale Frage ab: Welche Methode kann den Produktentwicklungsprozess der physischen Produktentwicklung beschleunigen, ohne dabei andere Parameter, wie z. B. Qualität oder Kosten, negativ zu beeinflussen?

2 Stand der Forschung

Im Rahmen dieses Kapitels werden jeweils eine Methode aus der physischen Produktentwicklung und aus der Softwareentwicklung vorgestellt, die das Ziel verfolgen, den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen. Für die physische Produktentwicklung wurde die Methode des Simultaneous Engineering gewählt und für die Softwareentwicklung die agile Entwicklungsmethode Scrum. Eine agile Methode wurde gewählt, da diese sich besonders durch eine moderne Feedback-Kultur und direkte Kommunikation im Team auszeichnet (Trahasch und Zimmer 2016).

2.1 Simultaneous Engineering

In der physischen Produktentwicklung findet eine Methode Anwendung, die explizit darauf ausgelegt ist, den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen: Das Simultaneous Engineering (Komorek 1998). Hierbei wird der nachfolgende Entwicklungsschritt bereits vor Vollendung des vorangehenden Schritts eingeleitet und der Produktentwicklungsprozess somit beschleunigt (Bullinger 1997). Beim herkömmlichen, sequentiellen Ansatz klassischer Produktentwicklungsmethoden hingegen wird der nächste Entwicklungsschritt erst begonnen, nachdem der vorangegangene Entwicklungsschritt vollständig abgeschlossen ist (Wittel et al. 2013). Die Vorgehensweise des Simultaneous Engineering führt jedoch, wie in Bild 3 dargestellt, zu einer schnelleren Markteinführung und somit zu einem Zeitgewinn im Produktentwicklungsprozess. Allerdings wird auch deutlich, dass es durch die Parallelisierung der Arbeitsschritte zu einer Vielzahl von Iterationsschleifen kommt. Diese werden notwendig, da noch nicht immer alle relevanten Informationen zum richtigen Zeitpunkt vorliegen. Mit der Produktentwicklung wird bereits begonnen, bevor die Produktidee und die Konzeptentwicklung abgeschlossen sind. Ergeben sich in dieser ersten Phase Änderungen, muss in der Produktentwicklung auch nochmals nachgebessert werden. Diese Nachbesserung ist mit zusätzlichem Arbeitsaufwand verbunden (Naefe und Luderich 2016).

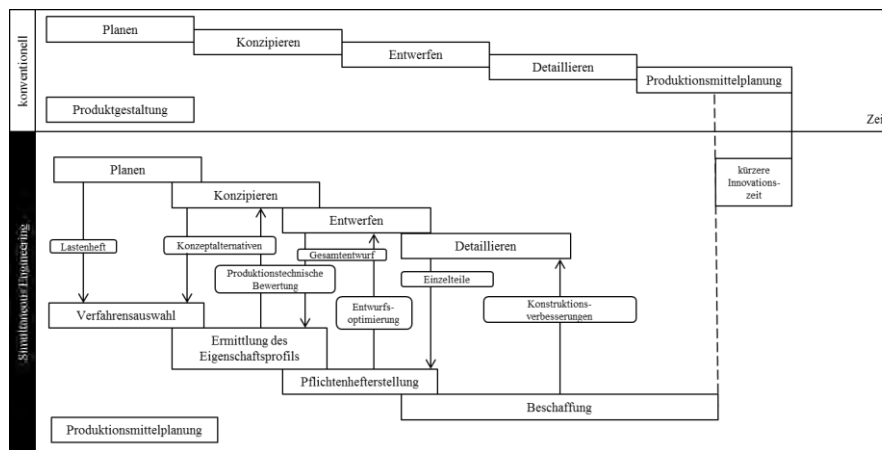


Bild 3: Simultaneous Engineering und konventionelle Produktentwicklung im Vergleich nach Weck (1990)

Die Betrachtung des Simultaneous Engineering wird an dieser Stelle vor dem Hintergrund einer Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses notwendig, da es sich im Vergleich zu den herkömmlichen im Produktentwicklungsprozess etablierten Methoden wie z.B. der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA), dem Quality Function Deployment (QFD) und der statistischen Prozesskontrolle (SPC) mit dem primären Ziel der Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses beschäftigt. Bei den anderen genannten Methoden stehen Qualitätsmanagement, Fehlervermeidung oder Prozessoptimierung im Vordergrund. Diese Methoden tragen folglich nicht primär zu einer Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses bei.

2.2 Scrum

Ein anderer möglicher Ansatz zur Beschleunigung der Produktentwicklung stammt aus der Softwareentwicklung. Dieser erreicht durch die Anwendung der agilen Entwicklungsmethode Scrum kurze Entwicklungszeiten und gleichzeitig eine hohe Kundenzufriedenheit (Albrecht 2014). Germanis und Hermann (2016) charakterisieren Scrum als empirisch, iterativ und inkrementell. Scrum beruht auf Erfahrung, arbeitet mit sich wiederholenden Zyklen, wodurch die kontinuierliche Verbesserung der Prozesse gewährleistet werden kann. Das Entwicklungsergebnis von Scrum entsteht Stück für Stück aus kleinen Zwischenergebnissen (Fuderholz 2017). Iterationsschleifen sind auch bei Scrum unumgänglich, allerdings erfolgen diese kontinuierlich und in kurzen Abständen auch in frühen Stadien der Produktentwicklung, was eine frühzeitige Fehlererkennung gewährleistet und dadurch eine Optimierung der Entwicklungsdauer ermöglicht.

2.2.1 Das Scrum Team

Ein Scrum Team besteht laut Schwaber und Sutherland (2013) aus einem Product Owner, dem Entwicklungsteam und einem Scrum Master. Charakteristisch für Scrum sind selbstorganisierte und motivierte Teams, die direkt kommunizieren und dadurch kurze Feedbackschleifen erreichen (Zink et al. 2015). Der Product Owner nimmt hierbei die Funktion eines „Produktvisionärs“ ein, der die Fähigkeit besitzt, „[...] dem Team die Produktidee so [zu] vermitteln, dass es die Teammitglieder zur Produktivität anspornt“ (Opelt et al. 2014, S. 11). Er ist für den Projekterfolg und die Erreichung der wirtschaftlichen Ziele des Projekts verantwortlich. Das Entwicklungsteam ist für die Umsetzung der Programmieraufgabe zuständig. Es besteht nach Goll und Hommel (2015) idealerweise aus drei bis sechs Teammitgliedern und zeichnet sich durch eine interdisziplinäre Zusammensetzung aus. Der Scrum Master nimmt die Funktion des Moderators ein. Er überwacht die Einhaltung der Scrum-Regeln, verteilt jedoch keine Aufgaben und ist nicht in den Produktentwicklungsprozess involviert. Seine Aufgabe liegt in der Unterstützung des Entwicklungsteams und in der Vermeidung von Hindernissen im Sinne externer Störfaktoren.

Zusätzlich zu diesen drei Rollen ist jedoch die Berücksichtigung von Stakeholderinteressen notwendig (Goll und Hommel 2015). Im Kontext von Scrum sind dies vor allem der Kunde, das Management sowie die Vorgesetzten (Rubin 2014).

2.2.2 Ablauf von Scrum

In Bild 4 wird der schematische Ablauf von Scrum dargestellt. Die einzelnen Vorgänge von Scrum und die Rollen im Team werden im Folgenden näher erläutert.

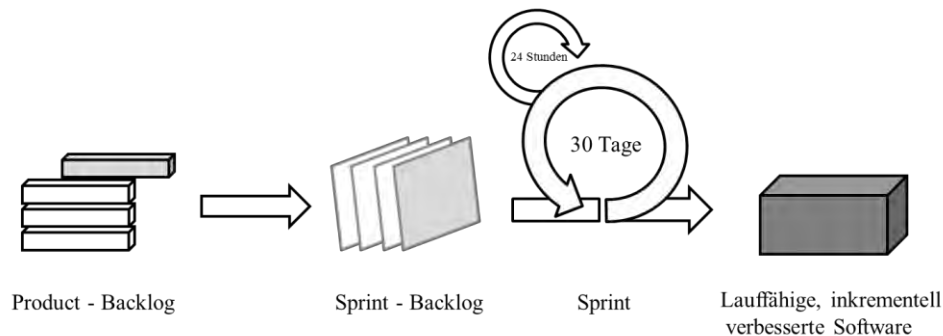


Bild 4: Scrum-Ablauf nach Brandt-Pook und Kollmeier (2015)

Vor Beginn der eigentlichen Scrum-Planung wird ein Produktkonzept erstellt, in welchem Produkteigenschaften, Funktionen und Zielgrößen definiert werden. Dieses Produktkonzept dient der Planungsgrundlage bei der Erstellung des Product Backlogs.

Im Product Backlog werden alle Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt gesammelt. Die Erstellung und Pflege des Product Backlogs sind Aufgaben des Product Owners. Er muss sicherstellen, dass das Product Backlog für alle jederzeit einsehbar und transparent ist (Goll und Hommel 2015). Es enthält zu jeder einzelnen Produkthanforderung Angaben wie Priorität der einzelnen Einträge, Risiken und Aufwandsschätzungen, wie lange die Umsetzung der einzelnen Anforderungen dauert. Das Product Backlog ist nach der geschätzten Priorität sortiert (Goll und Hommel 2015). Die Schätzungen nimmt der Product Owner zusammen mit dem Entwicklungsteam vor. Nach der Erstellung des Product Backlogs ist der Product Owner zusammen mit dem Team für die Sprint Planung zuständig. Für jeden einzelnen Sprint gibt es einen Sprint Backlog. In diesem wird genau festgelegt, was in dem jeweiligen Sprint erledigt werden soll (Brandt-Pook und Kollmeier 2015). Goll und Hommel (2015) definieren den Sprint Backlog als eine Liste der im Product Backlog definierten Aufgaben, die im aktuellen Sprint umgesetzt werden. Ein Sprint, also ein Entwicklungszyklus, dauert je nach Literaturangabe entweder zwei bis vier Wochen (Brandt-Pook und Kollmeier 2015) oder 30 Tage (Opelt et al. (2014)). Während eines Sprints findet zu Beginn jedes Tages ein kurzes Treffen statt, das nach Opelt et al. (2014) etwa 15 Minuten dauert. Dieses sogenannte Daily Scrum dient dazu, über den aktuellen Stand der Aufgaben zu berichten. Das gesamte Scrum Team ist beim Daily Scrum anwesend, der Scrum Master in der Rolle des Moderators. Im Rahmen des Daily Scrum werden auch die Aufgaben des Entwicklungsteams für den Tag aus dem Sprint Backlog gewählt. Die nicht gewählten Aufgaben verbleiben im Sprint Backlog. Dieser wird vom Product Owner aktualisiert und die verbleibenden Aufgaben für diesen Sprint werden am folgenden Tag wieder zur Auswahl bereitgestellt. Am Ende jedes Sprints steht ein Stück lauffähige Software. Im Anschluss an einen Sprint gibt es ein Sprint Review und eine Sprint Retrospektive. Im Sprint Review gibt der Product Owner einen Überblick darüber, wie der Sprint abgelaufen ist und ob die eingangs definierten Ziele erreicht worden sind. Gegebenenfalls muss das Product Backlog angepasst werden. Der Product Owner begutachtet das Ergebnis und entscheidet, ob die Software so abgenommen werden kann. Nach dem Sprint Review folgt die Sprint Retrospektive. Diese Feedback-Runde wird vom Scrum Master moderiert und dient der kontinuierlichen Verbesserung des Entwicklungsprozesses (Roock und Wolf 2016). Das Scrum Team überprüft dabei seine Arbeitsweise, um diese in Zukunft zu optimieren (Petry 2016).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass einer der größten Vorteile der Methode Scrum das „Jeder kann alles“-Prinzip ist. Des Weiteren zeichnet sich Scrum durch einen hohen Grad an Selbstbestimmtheit der Mitarbeitenden aus. Die Mitarbeitenden wählen ihre Aufgaben entsprechend ihres persönlichen Wissensstandes und ihrer individuellen Begabung aus (Opelt et al. 2014). Die Mitarbeiter arbeiten in motivierten und selbstorganisierten Teams. Dies fördert die direkte

Kommunikation mit dem Ergebnis direkter Feedbackschleifen (Zink et al. 2015). Weitere Merkmale dieses agilen Vorgehensmodells sind die Sichtbarkeit von Projektfortschritten und -hindernissen, tägliche Teamabstimmungen sowie die kontinuierliche Nachjustierung der Produkthanforderungen.

2.3 Zwischenfazit

Es gibt sowohl in der physischen Produktentwicklung als auch in der Softwareentwicklung Methoden, die dazu dienen, den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen. Für das Simultaneous Engineering aus der physischen Produktentwicklung ist die Parallelisierung der Arbeitsschritte charakteristisch. Diese Parallelisierung ist jedoch mit dem Nachteil vieler Iterationsschleifen verbunden. In der Softwareentwicklung bietet die agile Methode Scrum eine gute Möglichkeit den Produktentwicklungsprozess zu verkürzen, allerdings finden agile Methoden wie Scrum in der physischen Produktentwicklung bislang nur vereinzelt Anwendung (Korn und Berchez 2013).

Daher gilt es zu untersuchen, welche Elemente von Scrum in die physische Produktentwicklung übernommen werden können und wo die Grenzen einer Adaption liegen. Der Vergleich von physischer Produktentwicklung und Softwareentwicklung gestaltet sich auf den ersten Blick sehr schwierig, da diese beiden Produktentwicklungsbereiche ganz unterschiedliche Strukturen und Bedarfe aufweisen.

3 Übertragungsansatz

Um die Möglichkeiten eines Übertragungsansatzes zu überprüfen, ist es notwendig, die Anforderungen an eine Entwicklungsmethode im Anwendungsfall der physischen Produktentwicklung zu identifizieren.

Einzig in Bezug auf die Zusammensetzung des Scrum Teams sind nur wenige Anpassungen notwendig. Eine Anpassung ist insbesondere hinsichtlich der fachlichen Eignung des Entwicklungsteams durchzuführen. Anstelle von Softwareentwicklern rücken im Übertragungsansatz für die physische Produktentwicklung Hardwareentwickler, Mechatroniker und Berechnungsingenieure in das Entwicklungsteam.

Im Gegensatz dazu besteht vor dem Hintergrund der Produktkomplexität in der physischen Produktentwicklung hinsichtlich des Übertragungsansatzes großer Adaptionbedarf. In der physischen Produktentwicklung werden komplexe Produkte, bestehend aus vielen unterschiedlichen Baugruppen und Bauteilen entwickelt. Hierbei gilt es in einem ersten Schritt zu klären, welche Anforderungen an das Produkt gestellt werden, aus welchen unterschiedlichen Baugruppen es besteht und welche Funktionen es aufweisen soll. Üblicherweise werden hierzu während der Planungsphase in der physischen Produktentwicklung eine Anforderungsliste mit Forderungen und Wünschen an das Produkt sowie ein Lastenheft erstellt (Feldhusen und Grote 2013). Hierbei handelt es sich um einen zentralen Schritt in der physischen Produktentwicklung, da auf Basis dieser definierten Anforderungen die Entwicklung durchlaufen und stetig überprüft wird. Das heißt im Umkehrschluss, dass Funktionen oder Anforderungen, die vorab nicht definiert worden sind, am Entwicklungsende auch nicht im Produkt Umsetzung finden.

Dieser erste Schritt, in dem die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt festgelegt werden, muss auch bei der Verwendung einer agilen Methode in der physischen Produktentwicklung eine zentrale Stellung einnehmen. Zu untersuchen gilt, in welchem Format die Definition der Produkthanforderungen an das jeweilige zu entwickelnde Produkt im Rahmen einer agilen Methode für die physische Produktentwicklung erfolgen kann. Dies könnte beispielsweise mittels eines „Kick-Off-Workshops“ geschehen, der vom Scrum Master moderiert wird und in dem der Product Owner und das Entwicklungsteam alle relevanten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt festlegen. Analog zur bereits in der Softwareentwicklung etablierten Vorgehensweise kann der Product Owner nach der Anforderungsdefinition das Product Backlog füllen und priorisieren.

Im Anschluss daran wird vom Product Owner definiert, wie viele Aufgaben aus dem Product Backlog in den Sprint Backlog übertragen werden. Die Anzahl bzw. der Umfang an Aufgaben, die während eines Sprints bearbeitet werden sollen, hängt stark von der Dauer eines Sprints ab. Im Anwendungsfall von Scrum in der Softwareentwicklung ist ein Sprint nach Brandt-Pook und Kollmeier (2015) von zwei- bis vierwöchiger Dauer. Zu klären gilt, welche Sprintdauer für den Anwendungsfall der physischen Produktentwicklung geeignet ist. Die in der Softwareentwicklung praktizierte Sprintdauer ist für die Entwicklung physischer Produkte möglicherweise zu kurz. Eine Adaption der Sprintdauer für die physische Produktentwicklung ist notwendig und sollte in einem Übertragungsansatz Berücksichtigung finden. Eine einheitliche Definition einer durchschnittlichen Dauer für die Entwicklung physischer Produkte ist derzeit nahezu unmöglich, da die Anforderungen und Aufgaben an die einzelnen Produkte stark variieren. Hierzu müssen erst Erfahrungswerte gesammelt werden, um geeignete Sprintdauern für die physische Produktentwicklung zu definieren.

Weiterer Adoptionsbedarf besteht im Hinblick auf die Kommunikation im Scrum Team. Bewährt haben sich in der physischen Produktentwicklung ein regelmäßiger Austausch sowie vermehrte Rücksprachen zwischen den Beteiligten (Crostack et al. 2015). Im Gegensatz hierzu sieht Scrum keine inhaltlichen Rücksprachen während eines Sprints vor. Während der Sprints wird lediglich dokumentiert, wie viele Aufgaben aus dem Sprint Backlog bereits bearbeitet wurden. Dies ist für einen reibungslosen Entwicklungsprozess physischer Produkte nicht zu realisieren, da Unklarheiten oder Abstimmungsprobleme zeitnah geklärt werden sollen, um ein Stocken der Entwicklung über die Sprintdauer zu vermeiden. Dieser Aspekt macht deutlich, dass ein neuer methodischer Ansatz die Kommunikationsstrukturen und -bedürfnisse in der physischen Produktentwicklung als elementaren Bestandteil adressieren muss.

Eine weitere Herausforderung im Hinblick auf die Möglichkeiten und Grenzen einer agilen Entwicklungsmethode stellen die Schnittstellen in der physischen Produktentwicklung dar. Charakteristisch für Scrum ist die kleinteilige Entwicklung von Softwarefragmenten, die sich später problemlos in die bestehende Softwarestruktur implementieren lassen. Bei der physischen Produktentwicklung jedoch muss direkt geklärt werden, in welche einzelnen Baugruppen sich das Gesamtprodukt aufteilen lässt, um diese am Ende wieder sinnvoll zusammensetzen zu können. Ein möglicher Übertragungsansatz muss dieser Grundforderung gerecht werden und eine stetige Überprüfung und nachträgliche Anpassung der Schnittstellen vorsehen. Ist dies nicht gewährleistet, könnten zusätzliche Schnittstellen übersehen werden, was folglich zu einer Nicht-Anpassung führen würde. Dies würde bedeuten, dass Bauteile und Baugruppen entwickelt würden, deren Zusammenbau als Endprodukt nicht möglich ist.

Soll der Übertragungsansatz auch im Anwendungsfall der Entwicklung hochkomplexer Produkte einsetzbar sein, müssen organisatorische und strukturelle Bedarfe identifiziert werden. Bei einer hohen Komplexität des Produkts kann davon ausgegangen werden, dass die Bewältigung der Entwicklungsaufgabe nicht von nur einem einzigen Scrum Team erfolgen kann. Ausgehend von dieser Hypothese muss überprüft werden, inwiefern die Zerlegung des Produkts in einzelne Baugruppen (Bild 5) ein möglicher Lösungsansatz sein kann.

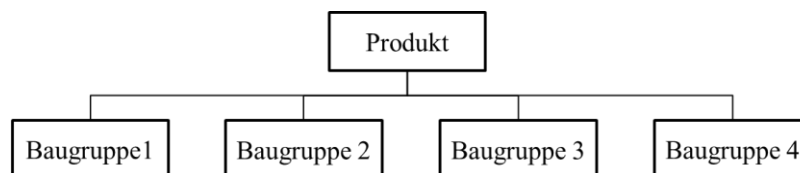


Bild 5: Produktaufteilung

Die Zerlegung in einzelne Baugruppen hätte organisatorisch die Folge, dass mehrere Scrum Teams an der Entwicklung unterschiedlicher Baugruppen arbeiten, was die Relevanz der Definition der Schnittstellen nochmals verdeutlicht. In diesem Zusammenhang gewinnt auch die strukturelle Gestaltung des Entwicklungsteams an Bedeutung. Zu untersuchen gilt, ob die Einführung einer weiteren Hierarchieebene in Form eines übergeordneten Scrum Teams der organisatorischen

Anforderung nach einer Zerlegung in einzelne Baugruppen gerecht werden würde, bei gleichzeitig hoher Komplexität des Produkts, die ganz eigene Anforderungen an die Beteiligten stellt. Die Verantwortung für das Gesamtprodukt läge im übergeordneten Scrum Team, während untergeordnete Teams für die Entwicklung der einzelnen Baugruppen verantwortlich sind.

4 Conclusio und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Übertragung der agilen Methode Scrum auf die physische Produktentwicklung durchaus Potentiale aufweist. Die Übertragung ist prinzipiell möglich, unterliegt allerdings einigen Einschränkungen. Hierzu zählen unter anderem die vorher definierten Schnittstellen, was die Anwendbarkeit bei Neuentwicklungen, bei denen die Schnittstellen noch nicht definiert werden können, da die einzelnen Baugruppen und Bauteile noch unbekannt sind, schwieriger macht. Diese Problematik verringert sich bei Anpassungs- und Variantenkonstruktionen, da in diesen Fällen die Schnittstellen weitestgehend definierbar sind. Ein weiterer Aspekt sind die notwendigen strukturellen Veränderungen innerhalb einer Abteilung oder eines Unternehmens. Die Implementierung einer neuen Methode setzt ein bestimmtes Maß an Veränderungsbereitschaft seitens der Mitarbeitenden und der Geschäftsführung voraus. Auch im Hinblick auf die Entwicklung hochgradig komplexer Produkte bietet die Übertragung der Methode Scrum auf die physische Produktentwicklung Chancen, sofern eine strukturelle und organisatorische Adaption vorgenommen wird.

Offen bleibt, inwiefern eine agile Produktentwicklungsmethode im praktischen Anwendungsfall der physischen Produktentwicklung etabliert werden kann. Zukünftig wäre ein weiterer möglicher Einsatz des Übertragungsansatzes zur Lösung von Hindernissen, die während einer klassischen sequentiellen Produktentwicklung auftreten und den Projektfortschritt gefährden, denkbar. Hier könnte ein auf die physische Produktentwicklung angepasster Ansatz von Scrum verwendet werden, um das Problem im Projekt zu lösen und danach die klassische sequentielle Produktentwicklung fortzuführen. Diese Anwendung erfolgt mit dem Ziel der Beschleunigung des sequentiellen Produktentwicklungsprozesses durch die gezielte Beseitigung von Hindernissen im Projekt mittels agiler Methoden. Vor diesem Hintergrund scheint eine Untersuchung im Hinblick auf die praktischen Einsatzmöglichkeiten des Übertragungsansatzes lohnenswert.

5 Literatur

- Albrecht 2014 ALBRECHT, Stefanie: *Virtueller Projektraum*. In: Wissens Management das Magazin für Führungskräfte (2014), Ausgabe 8.
- Allweyer 2005 ALLWEYER, Thomas: *Geschäftsprozessmanagement*. 1. Aufl. Bochum: w3L GmbH, 2005.
- Brandt-Pook und Kollmeier 2015 BRANDT-POOK, Hans; KOLLMEIER, Rainer: *Softwareentwicklung kompakt und verständlich*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2015.
- Brunn 2009 BRUNN, Hans Georg: *Globalisierung und Produktlebenszyklen im Automobilsektor*. Hamburg: Verlag Dr. Kovac, 2009.
- Bullinger 1997 BULLINGER, Hans-Jörg: *Forschungs- und Entwicklungsmanagement*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1997.
- Crostack et al. 2015 CROSTACK, Alexander; BINZ, Hansgeorg; ROTH, Daniel: *Entwicklung einer eigenschaftsbasierten Informationsbasis am Beispiel der Entwicklung von und mit Hybriden Intelligenten Konstruktionselementen*. In BINZ et al.: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*, 19.06.2015, S. 32.
- Ellinger 1961 ELLINGER, Theodor: *Die Marktperiode in ihre Bedeutung für die Produktions- und Absatzplanung der Unternehmung*. In ZfhF (1961), 13. Jg. S.582.

- Feldhusen und Grote 2013 FELDHUSEN, Jörg; GROTHE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 8. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- Freiling und Reckenfelderbäumer 2010 FREILING, Jörg; RECKENFELDERBÄUMER, Martin: *Markt und Unternehmung*. 3. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2010.
- Fuderholz 2017 FUDERHOLZ, Jens: *Professionelles Lead Management*. Wiesbaden: Springer, 2017.
- Geramanis und Hermann 2016 GERAMANIS, Olaf; HERMANN, Kristiana: *Führen in ungewissen Zeiten*. Wiesbaden: Spinger, 2016.
- Goll und Hommel 2015 GOLL, Joachim; HOMMEL, Daniel: *Mit Scrum zum gewünschten System*. Wiesbaden: Spinger, 2015.
- Heinen 1984 HEINEN, Edmund: *Betriebswirtschaftliche Führungslehre*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 1984.
- Komorek 1998 KOMOREK, Christian: *Integrierte Produktentwicklung*. Duisburger Betriebswirtschaftliche Schriften. S+W Steuer- und Wirtschaftsverlag GmbH, Dissertation, 1998.
- Korn und Berchez 2013 KORN, Hans-Peter; BERCHEZ, Jean Pierre: *Agiles IT-Management in großen Unternehmen*. Düsseldorf: Symposion Publishing, 2013.
- Lindemann 2016 LINDEMANN, Udo: *Handbuch Produktentwicklung*. 1. Aufl. München: Hanser Verlag, 2016.
- Naefe und Luderich 2016 NAEFE, Paul; LUDERICH, Jörg: *Konstruktionsmethodik für die Praxis*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Verlag, 2016.
- Opelt et al. 2014 OPELT, Andreas; GLOGER, Boris; PFARL, Wolfgang; MITTERMAYER, Ralf: *Der agile Festpreis*. 2. Aufl. München: Hanser Verlag, 2014.
- Petry 2016 PETRY, Thorsten: *Digital Leadership*. 1. Aufl. Freiburg: Haufe Verlag, 2016.
- Roock und Wolf 2016 ROOCK, Stefan; WOLF, Hennig: *Scrum verstehen und erfolgreich einsetzen*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt Verlag, 2016.
- Rubin 2014 RUBIN, Kenneth S.: *Essential Scrum*. 1. Aufl. Heidelberg: mitp Verlag, 2014.
- Schwaber und Sutherland 2013 SCHWABER, Ken; SUTHERLAND, Jeff: *The Scrum Guide*, 2013.
- Spindler 2016 SPINDLER, Gerd-Inno: *Basiswissen Marketing*. Wiesbaden: Springer Verlag, 2016.
- Stein 2009 STEIN, Friedrich: *Projektmanagement für die Produktentwicklung*. 3. Aufl., Renningen: Expert Verlag, 2009.
- Trahasch und Zimmer 2016 TRAHASCH, Stephan; ZIMMER, Michael: *Agile Business Intelligence*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt Verlag, 2016.
- Weck 1990 WECK, Manfred: *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik (Aachner Werkzeugmaschinen-Kolloquium)*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1990.
- Wittel et al. 2013 WITTEL, Herbert; MUHS, Dieter; JANNASCH, Dieter; VOSSIEK, Joachim: *Roloff/Matek Maschinenelemente*. 21. Aufl. Wiesbaden: Springer Verlag, 2013.
- Zink et al. 2015 ZINK, Klaus J.; KÖTTER, Wolfgang; LONGMUSS, Jörg; THUL, Martin J.: *Veränderungsprozesse erfolgreich gestalten*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2015.

Forschungsbedarf und erste Lösungsansätze im Umgang mit radikalen Innovationen im Kontext heutiger Produktentwicklungsprozesse

Thorsten Herrmann¹, Hansgeorg Binz², Daniel Roth³

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland
thorsten.herrmann@iktd.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland
hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de

³Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart, Deutschland
daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Von Unternehmensseite häufen sich Forderungen nach einem methodischen Vorgehensrahmen zur Ermittlung von radikalen Produktideen und zu deren Umsetzung in radikale Innovationen. Die Wichtigkeit von radikalen Innovationen und der Wunsch, diese vermehrt zu entwickeln, werden seit längerem betont. Allerdings treten bei der Fragestellung, wie radikale Innovationen umgesetzt werden können, in der Praxis gehäuft Probleme auf. Diese während der Produktentwicklung von radikalen Produktideen auftretenden Probleme werden in diesem Beitrag ausgehend von einer Literaturanalyse untersucht. Zudem gehen Experteneinschätzungen aus der industriellen Praxis in die Analyse mit ein. Auf dieser systematischen Problemanalyse basierend werden erste Lösungsansätze zum verbesserten Umgang mit radikalen Produktideen während der Produktentwicklung präsentiert, um diese Ideen erfolgreich in radikale Innovationen umsetzen zu können. Das Ziel dieses Beitrags ist es, Forschungsbedarf bezüglich der Thematik eindeutig zu beschreiben, um künftig begründete Forschungsarbeit zu betreiben, die in einer ganzheitlichen Unterstützung für die Produktentwicklung radikaler Innovationen resultiert.

Keywords:

Radikale Innovationen, Ideenmanagement, Produktentwicklungsprozess, Radikale Produktideen, Ideenprozess

1 Einleitung

Innovationen bieten im Zeitalter gesättigter Märkte für Unternehmen mit dem ständigen Ziel der Gewinnoptimierung eine der wenigen Chancen auf langfristiges Wachstum (Frishammar et al. 2016; O'Connor und Rice 2013; Meyer 2012; Billing 2003). In den letzten Jahrzehnten lag der Innovationschwerpunkt auf der Erarbeitung inkrementeller Innovationen bzw. Weiterentwicklungslösungen (O'Connor und Rice 2013; Pahl et al. 2007; Leifer et al. 2001; McDermott 1999). Diese umfassen unter anderem eine Erweiterung des bestehenden Produkts um neue Funktionen, eine neue Modellserie mit optimiertem Design, einen verbesserten Wirkungsgrad oder eine preiswertere Variante des Vorgängerprodukts (Meyer 2011). Tatsächlich erfolgt häufig nur eine Reaktion auf vom Markt vorgegebene Wünsche, wodurch wirklich neue Innovationen kaum vorangetrieben werden (Meyer 2011). Inkrementelle Innovationen stellen vor allem erfahrene und am Markt etablierte Unternehmen nicht vor bedeutende Herausforderungen (Lefenda und Pöckhacker-Tröscher 2014; O'Connor und Rice 2013). Um letztendlich langfristig wettbewerbsbezogene Vorteile zu erreichen, wird in der Literatur und auch von unternehmerischer Seite zunehmend betont, neben den Kernprodukten und deren Verbesserung auch radikale Innovationen vorantreiben zu müssen (Herrmann et al. 2016; O'Connor und Rice 2013; Leifer et al. 2000). Inhaltlich umfasst diese Forderung radikale Innovationen mit dem Ergebnis neuer Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen, die laut Leifer et al. (2001) entweder beispiellose Eigenschaften oder bekannte Eigenschaften mit einer signifikanten Verbesserung der Leistung oder Kosten repräsentieren, sodass existierende Märkte verändert oder neue Märkte geschaffen werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Viele Unternehmen scheitern an der Entwicklung radikaler Innovationen (Garcia und Calantone 2002). Von Unternehmensseite häufen sich Forderungen nach einem methodischen Vorgehensrahmen zum Umgang mit radikalen Produktideen und nach Unterstützung während deren Entwicklung in Produktentwicklungsprozessen (Herrmann et al. 2016), womöglich auch weil die Unternehmen sich an klassischen Ansätzen zur Umsetzung von Innovationen orientieren (Meyer 2012; Garcia und Calantone 2002). Bisher wurde diesen Forderungen kein Vorschlag der Literatur vollständig gerecht. Bei der Analyse von Publikationen, die eine ganzheitliche methodische Unterstützung oder einen angepassten Produktentwicklungsprozess für radikale Innovationen präsentieren, sind diese entweder kaum evaluiert oder die Anwendung ist mit speziellen Einschränkungen verbunden. Die Entwicklung radikaler Innovationen birgt aufgrund deren besonderen Eigenheiten (z. B. zeit- und kostenintensiv, unsicher, risikoreich (Meyer 2012; Leifer et al. 2000)) zahlreiche Probleme (Meyer 2012). Ausgehend von der Motivation, die Entwicklung von radikalen Innovationen erfolgreicher, schneller, kostengünstiger und zielgerichteter zu gestalten, sollten Probleme identifiziert und analysiert werden. Als initiale Forschungsarbeit der Autoren zu dieser Thematik werden in diesem Beitrag sämtliche aus der Literatur und der industriellen Praxis recherchierten Probleme systematisch dargestellt. Fokussiert werden dabei Probleme, die die Produktentwicklung direkt bzw. indirekt betreffen. Darauf aufbauend werden erste Lösungsansätze erfasst und problembezogen festgehalten. Hauptziel dieses Beitrags ist es, auf Grundlage einer strukturierten Problemschilderung, Forschungsbedarf für einen methodischen und damit systematischen Umgang mit radikalen Innovationen im Kontext der Produktentwicklung aufzuzeigen. Der Beitrag dient demnach auch als Forschungspositionierung der Autoren.

3 Vorgehensweise und Aufbau

In diesem Beitrag werden Bedarfe nach zukünftiger Forschung bezüglich des Umgangs mit radikalen Innovationen in der Produktentwicklung abgeleitet. Als Grundlage werden dazu Literaturbeiträge diskutiert. Darüber hinaus wird eine Analyse des Verständnisses sowie des Umgangs mit radikalen Innovationen in der industriellen Praxis aus erhobenen Expertenmeinungen vorgestellt und daraus ein detaillierter Unterstützungsbedarf im Umgang mit radikalen Innovationen analysiert.

Um die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse zu erarbeiten, wurden in einem ersten Schritt allgemeine Definitionen, Eigenschaften und prozessbedingte Eigenheiten von radikalen Innovationsprojekten recherchiert. Die wichtigsten Erkenntnisse werden in Kapitel 4 vorgestellt, um ausgehend von dem damit entwickelten Verständnis für die Thematik auf die Probleme überzuleiten, die in Kapitel 5 systematisch aufgeführt werden. Zum einen werden in Kapitel 5 die wichtigsten Ergebnisse einer ausführlichen Recherche der deutsch- und englischsprachigen Literatur zusammengefasst, welche Probleme im Umgang mit radikalen Innovationen während der Produktentwicklung adressieren. Zum anderen werden diese mit Meinungen von Experten aus der industriellen Praxis ergänzt. Dabei wurden 20 Experten des Top- bzw. mittleren Managements aus 20 verschiedenen Unternehmen, hauptsächlich des verarbeitenden Gewerbes, befragt. Die Experten sind neben vereinzelt kleinen und mittelständischen Unternehmen vermehrt in Großunternehmen tätig. Alle Experten sind im Bereich der Produktentwicklung beschäftigt. Im Kern wurden die Experten nach Problemen während der Entwicklung einer radikalen Innovation befragt bzw. wie sich der Produktentwicklungsprozess bei radikalen Innovationsprojekten im Gegensatz zu anderen Projekten (inkrementelle Innovationsvorhaben) unterscheidet. Auf eine detaillierte Darstellung der Erhebung wird im Rahmen des Beitrags verzichtet. Dennoch dienen die aufgeführten Expertenmeinungen der industriellen Praxis als Indikator für Forschungsbedarf im Umgang mit radikalen Innovationen im Kontext heutiger Produktentwicklungsprozesse.

In Kapitel 6 erfolgt bezüglich der in Kapitel 5 erwähnten Probleme eine Analyse von möglichen Lösungsansätzen, die zum einen direkt der Literatur entnommen, zum anderen in Ansätzen von den Experten selbst vorgeschlagen wurden. Ebenso werden Ableitungen der Autoren dieses Beitrags bzgl. möglicher Lösungsansätze der genannten Probleme ergänzt. Der weitere Forschungsbedarf im Umgang mit radikalen Innovationsvorhaben wird in Kapitel 7 thematisiert und diskutiert. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf das weitere Vorgehen im Forschungsvorhaben basierend auf den vorgestellten Bedarfen.

4 Allgemeine Begriffsdefinition und Eigenschaften radikaler Innovationen

Eine radikale Innovation soll in diesem Beitrag eine erfolgreiche Realisierung einer radikalen Produktidee darstellen. Die radikale Produktidee beschreibt demnach eine Idee bzw. einen Einfall für ein Produkt mit Potenzial für eine radikale Innovation.

Bezüglich einer radikalen Innovation hebt Stilianidis (2015) den Unterschied der Innovationen zum Bestehenden hervor. Oftmals verkörpern radikale Innovationen durch den Einsatz neuer Technologien oder Verfahren einen grundlegenden Wandel der derzeitigen Praxis (DIN CEN/TS 16555 Teil 1 2013). Nach Herstatt (2007) sind radikale Innovationen „sowohl markt- als auch technologie-seitig mit einem hohen Grad an Neuheit verbunden“. Eisert (2006) betont, dass bei einer radikalen Innovation aus Sicht der Unternehmen, der entsprechenden Branche, aus Sicht der Kunden bzw. des gesamten Markts ein Durchbruch erkennbar ist. Die radikale Innovation führt zumeist auf einer veränderten technologischen Basis zu einem neuen oder deutlich gesteigerten Kundennutzen (Eisert 2006). Auch nach Leifer et al. (2000) werden mit radikalen Produkt-, Prozess- und Dienstleistungsinnovationen erhebliche Veränderungen der existierenden Märkte und Industrien erzielt, die durch unvorhersehbare bzw. nicht vertraute Leistungseigenschaften hervorgerufen werden und eine signifikante Verbesserung vor allem in Performance und Kostenaufwand bedeuten (Leifer et al. 2000). Oftmals stellen radikale Innovationen einen Paradigmenwechsel für den Kunden, eine lang anhaltende Differenzierung gegenüber der Konkurrenz, ein attraktives Potenzial zur Realisierung neuer Produkte oder Prozesse dar und dienen wiederum als Quelle für eine Vielzahl weiterer Innovationen (Hartschen et al. 2009). Aus unternehmerischer Sicht gehen radikale Innovationen mit großen Veränderungen der organisatorischen und strategischen Unternehmensstruktur einher, die bei einer erfolgreichen Entwicklung und Marktplatzierung in hohen Kapitalgewinnen resultieren (Motte et al. 2011). Beispiele für radikale Innovationen sind der Personal Computer (PC), Solar-Panels oder auch das autonom fahrende Fahrzeug.

Aus der Vielzahl der Definitionen lässt sich zusammenfassen, dass der Begriff der radikalen Innovation aus mehreren Dimensionen betrachtet werden muss. Radikale Innovationen können aus Unternehmenssicht eine vollständig neue Innovation oder eine angepasste bestehende Innovation darstellen, die z. B. eine neue Technologie beinhaltet. Diese kann den Markt verändern, indem Wettbewerber überlagert und bestehende Produkte obsolet gemacht werden. Aus Kundensicht stellt eine radikale Innovation ein so nicht bekanntes Produkt dar, das bekannte Gebrauchsmuster ändert.

Im Gegensatz zu radikalen Innovationen nutzen inkrementelle Innovationen existierende Technologien und stellen nahezu den gleichen Nutzen, wie bereits vorhandene Produkte dar. Häufig werden diese auch als Anpassungs- oder Verbesserungsinnovation bezeichnet (Hartschen et al. 2009). Es handelt sich häufig um nur leicht veränderte Produkte bzw. Technologien, mit denen ein Unternehmen auf einem bekannten oder ähnlichen Markt auftritt (Gerybadze 2004). Lefenda und Pöckhacker-Tröscher (2014) analysieren das Auftreten der beiden Innovationsarten quantitativ und behaupten, dass rund 95 bis 99 Prozent aller Innovationen inkrementeller und der Rest radikaler Natur sind.

5 Probleme bei der Umsetzung radikaler Innovation

Bereits die zum Teil unterschiedlichen Begriffsdefinitionen und Eigenschaften aus Kapitel 4 lassen auf Probleme während der Produktentwicklung radikaler Innovationen schließen. Zur systematischen Erfassungen von Problemen wurde die einschlägige Literatur nach konkreten Nennungen analysiert. Nach der Recherche wurden diese in zehn Problemfelder rund um die Produktentwicklung kategorisiert. Diese sind in Tabelle 1 ohne Priorisierung angeführt.

Tabelle 1: Charakteristische Problemfelder der ermittelten Probleme

Problemfelder	
I. Wissensbedarf, Unsicherheit und Risiko	VI. Frühe Phase des Innovationsprozesses (Front End)
II. Innovationskultur	VII. Markt / Marktforschung
III. Steuerung des Innovationsprozesses	VIII. Ideengenerierung radikaler Produktideen
IV. Ablauf des Innovations- / Entwicklungsprozesses	IX. Identifizierung radikaler Produktideen
V. Methoden im Innovationsprozess	X. Ideenmanagement (Bewertung / -selektion) radikaler Produktideen

Die einzelnen Teilprobleme, die im Kern in der Literatur oder von den befragten Experten grundsätzlich gleich beschrieben wurden, wurden zusammengefasst und in Tabelle 2 den besagten Problemfeldern systematisch zugeordnet. Die jeweilige Quelle wurde in der letzten Spalte referenziert.

Tabelle 2: Probleme beim Umgang mit radikalen Innovationen

Problemfeld	Problem Nr.	Probleme beim Umgang mit radikalen Innovationen	Quelle
PF I Wissensbedarf, Unsicherheit und Risiko	P-I.1	Fähigkeit, neues (Fach-)Wissen zu erwerben und aufzubauen; „Pionierarbeit“ notwendig	(Forés und Camisón 2016; Knack 2006; Billing 2003; Scigliano 2003) + Experte
	P-I.2	hohe Unsicherheiten; viele unbekannte Variablen; im Detail: <ul style="list-style-type: none"> hohe technologische und marktbezogene Unsicherheiten, Unsicherheiten hinsichtlich der Organisation, Ressourcenunsicherheit (Bedarf) 	(Schreiner 2006; Billing 2003; Scigliano 2003; Brennecke et al. 2001; Lynn et al. 1996) (Verworn und Herstatt 2007; Knack 2006; Leifer et al. 2001; Rice et al. 2001; Veryzer 1998) + Experten
	P-I.3	gesteigertes Risiko bei radikalen Innovationsprojekten; hohes Scheiternspotenzial	(Meyer 2012) + Experten
PF II Innovations- kultur	P-II.1	fehlende Unterstützung des Top-Management	(Meyer 2012; Savioz et al. 2002) + Experte
	P-II.2	interne und externe Widerstände (Akzeptanz der Produktidee); Skepsis wächst bei langer Entwicklungszeit	(Scigliano 2003) + Experten
	P-II.3	zahlreiche Innovationshemmer im Unternehmen vorhanden	(Herrmann et al. 2007)
	P-II.4	viele Freiheiten für Projektteam notwendig	Experte
PF III Steuerung des Innovations- prozesses	P-III.1	Fehlen von Orientierungsgrößen / Handlungsempfehlungen zur Planung, Steuerung, Durchführung des Innovationsprozesses	(Schreiner 2006; Scigliano 2003) + Experte
	P-III.2	Abschätzung von zeit-, kosten- und qualitätsbezogenen Zielen für das Innovationsprojekt und des Projektergebnisses schwierig	(Scigliano 2003) + Experte
PF IV Ablauf des Innovations- / Entwicklungs- prozesses	P-IV.1	keine Vergleichbarkeit von radikalen Innovationsprozessen mit Entwicklungsprozessen mit linearem Aktivitätenablauf; wesentliche Unterscheidung des Managements verglichen mit inkrementellen Innovationsvorhaben (radikale Innovationen entstehen losgelöst vom Tagesgeschäft)	(Zimmer et al. 2012; Gemünden und Kock 2008; Schmidthals 2007; Schreiner 2006; Billing 2003; Scigliano 2003; Savioz et al. 2002; Lynn et al. 1996) + Experten
	P-IV.2	es fehlen verallgemeinerbare Prozesse und Routinen für das Management radikaler Innovationen	(Knack 2006)
	P-IV.3	viele Iterationsschleifen; Entwicklungsprozess entspricht einem Prozess des „Probierens und Lernens“ / „Grundsteinle- gung“ / „Grundsatzuntersuchungen“	(Krieger 2005; Scigliano 2003; Lynn et al. 1996) + Experten
	P-IV.4	Kostendruck verbietet Trial and Error Prozess	(Eisert 2006)
	P-IV.5	Prozesse haben kaum „Verwandtschaft“ zu bestehendem Wis- sen; Strukturiertheit gering, Steigerung der Komplexität, der Variabilität und des Neuheitsgrads der Aufgabe	(Schmidthals 2007; Schreiner 2006; Salomo 2003; Scigliano 2003)
	P-IV.6	Organisation und Struktur von radikalen Innovationen (Innova- tionsprojekten) ist „eigenartig“	(Motte et al. 2011)
	P-IV.7	Entwicklungsprozess ist in jedem Unternehmen verschieden und für jedes Projekt im Detail unterschiedlich	(Frishammar et al. 2016)
	P-IV.8	Entwicklungsprozess und Strategieformulierung gehen „Hand in Hand“; keine Trennung empfohlen	(Motte et al. 2011)
	P-IV.9	Entwicklung unterliegt stärkerer Geheimhaltung	Experte
	P-IV.10	intensivere Testphase notwendig	Experte
	P-IV.11	eigenes Projektteam (evtl. internes Start-up, Ausgründung) notwendig → ausschließlich Beschäftigung mit radikale Idee	(Meyer 2012; Brennecke et al. 2001) + Experten
	P-IV.12	in Unternehmen oftmals keine Unterscheidung zwischen ink- rementellen & radikalen Innovationsprojekten / Produktideen / Innovationen oder gemäß einer ähnlichen Systematik	Experten
PF V Methoden im Innovations- prozess		geplantes Ziel ist oftmals radikale Innovation → durch Einsatz von Methoden ausgelegt für inkrementelle Innovationen resul- tiert auch oft nur inkrementelle Innovation; Fehlen von Metho- den zur speziellen methodischen Unterstützung von radikalen Innovationsprojekten	(Garcia und Calantone 2002) + Experten

Problemfeld	Problem Nr.	Probleme beim Umgang mit radikalen Innovationen	Quelle
PF VI Frühe Phase des Innovations- prozesses (Front End)	P-VI.1	Beginn des Innovations- / Entwicklungsprozess ist bei radikalen Innovationen besonders wichtig → Diese Wichtigkeit wird in der Praxis nicht gesehen; Fehlen von Methoden	(Frishammar et al. 2016; Scigliano 2003)
	P-VI.2	Defizit aus praktischer & theoretischer Sicht in der Organisation der frühen Phase	(Savioz et al. 2002)
	P-VI.3	Notwendigkeit der unterschiedlichen Gestaltung v. a. der frühen Phase von radikalen und inkrementellen Innovationsvorhaben	(Herstatt 2007; Gerybadze 2004; Savioz et al. 2002; Herstatt 1999)
PF VII Markt / Markt- forschung	P-VII.1	lange Marktvorbereitung / lange Vorlaufzeit, da z. T. neue Märkte geschaffen bzw. bestehende verändert werden und z. T. die Innovation ein Lernen des Kunden bedingt	(Pleschak und Sabisch 1996) + Experte
	P-VII.2	klassische Marktforschung ist bei radikalen Innovationen ungeeignet; Marktpotenzial- und Attraktivitätsabschätzung sehr schwierig	(Meyer 2012; Eisert 2006; Schreiner 2006; Krieger 2005; Savioz et al. 2002; Lynn et al. 1996)
	P-VII.3	Fehlen von Methoden, um neue Märkte zu entwickeln	(Eisert 2006)
PF VIII Ideen- generierung radikaler Produktideen	P-VIII.1	Ideengenerierung für radikale Innovationen unterscheidet sich zu Prozess für inkrementelle Innovationen	(Knack 2006)
	P-VIII.2	Ideengenerierung ist meist nicht das Problem; Chancenidentifikation und die Realisierung der Idee in einem Konzept bildet Herausforderung	(Schreiner 2006) + Experte
	P-VIII.3	Ideengenerierung von radikalen Produktideen sollte vom Top-Management unterstützt werden; Mitarbeiter müssen „sich trauen, kreativ und besonders innovativ zu sein; die Idee muss dabei aber vernünftig sein“	Experte
	P-VIII.4	keine Orientierung an Kundenanforderungen bzw. -bedürfnissen → diese existieren (noch) nicht	(Eisert 2006; Savioz et al. 2002; Leifer et al. 2001)
	P-VIII.5	flexibler gestalteter Ansatz des „Kreativen Prozesses“ / Ideenprozesses ist notwendig	(Lin und Chen 2016)
	P-VIII.6	Bedarf in Theorie und Praxis nach Möglichkeiten der Generierung von radikalen Innovationen bzw. deren Ideen	(Frishammar et al. 2016)
PF IX Identifizieren von radikalen Produktideen	P-IX.1	initiales Erkennen von radikalen Produktideen; oftmals frühes Verwerfen der Idee; Radikalität wird übersehen / unterschätzt	(Meyer 2012; Knack 2006; Savioz et al. 2002; Lynn et al. 1996) + Experten
	P-IX.2	Fehlen von Methoden zur Abschätzung der Radikalität in Literatur & Praxis; Kriterien-Set hierzu fehlt; Kriterienbezug oftmals auf abgeschlossene Projekte, nicht auf initiale Ideen	(Green et al. 1995) + eigene Feststellung + Experten
	P-IX.3	oftmals keine Unterscheidung zwischen radikal / inkrementell in der Praxis	(Eisert 2006) + Experte
	P-IX.4	Ideenidentifizierung und auch -bewertung oftmals mit nicht greifbaren Kriterien (häufig „Bauchgefühlentscheidung“)	Experten
PF X Ideenmanage- ment (Bewertung / -selektion) radikaler Pro- duktideen	P-X.1	Notwendigkeit von unterschiedlichen Bewertungskriterien für radikale und inkrementelle Produktideen; Einbezug der Markt- und Technologiesicht in der frühen Phase	(Messerle 2016) + Experten
	P-X.2	existierende Tools zur Messung des Potenzials für den Innovationserfolg nicht geeignet für radikale Innovationsprojekte	(Zimmer et al. 2012)
	P-X.3	Ideenmanagement von radikalen Produktideen in Unternehmen unzureichend (Abschätzung / Bewertung von radikalen Ideen, Ablage, Ablehnungsgründe)	(Eisert 2006; Savioz et al. 2002)

6 Lösungsansätze zur Überwindung von Problemen bei der Umsetzung radikaler Innovationen

In diesem Abschnitt werden zweckmäßige Lösungsansätze beschrieben, die die in Kapitel 5 angeführten Probleme adressieren. Einige Ansätze werden in der Literatur immer wieder zur Verbesserung der Entwicklung von radikalen Innovationen diskutiert. Um die beschriebenen Lösungsansätzen den Problemen bzw. Problemfeldern (PF) aus Tabelle 2 zuzuweisen, erfolgt in Tabelle 3, in der alle Ansätze stichpunktartig beschrieben sind, eine Zuordnung zu den in Tabelle 2 nummerierten Problemfeldern (PF) bzw. spezifischen Problemen (P). Ebenso ist die jeweilige Quelle des Lösungsansatzes angegeben.

Tabelle 2: Lösungsansätze beim Umgang mit radikalen Innovationen

Bezug	Lösungsansatz	Quelle
P-I.1	- Kombination von internem und externem Wissen - Betreiben von Open Innovation - Steigerung von Kooperationen / Aufbau eines Innovationsnetzwerkes (z. B. Forschungs-, Entwicklungs- und Marketingnetzwerke) - „Absorptive Capability“ von Wissen steigern	(Forés und Camisón 2016; Motte et al. 2011; Knack 2006; Krieger 2005; Scigliano 2003; Leifer et al. 2000)
P-I.2, P-I.3	Kooperationen zur Risiko- und Unsicherheitsverteilung (Beispiel Joint-Venture)	eigene Ableitung aus Problemfeld PF I
P-I.2	Strategie für die Ressourcenakquisition	(Krieger 2005)
P-I.3	methodische Unterstützung zur gezielten Risikoidentifizierung, -abschätzung und -überwachung	eigene Ableitung aus Problemfeld P I
P-I.1; P-I.2; P-I.3	in Großunternehmen: häufig Auslagerung auf flexiblere Start-ups	(Meyer 2012) + Experte
PF II; PF VIII; P-VIII.3	- Freiräume schaffen; - Mitarbeiter für Risikoprojekte ermutigen; - Kreativität bewusst schulen und fördern; Mut schaffen	(Meyer 2012; Schreiner 2006; Billing 2003; Bharadwaj und Menon 2000) + Experten
PF II	- Innovationskultur für radikale Innovationen schaffen: - Sensibilisierung / Umdenken des Top-Managements, - „Rückendeckung“ der Mitarbeiter gewährleisten, - Bewusstsein schaffen, dass radikale Innovationen „anders“ sind	(Koen et al. 2001) + Experten (Eisert 2006)
P-III.1; P-III.2; P-IV.1	Notwendigkeit von eigenen Strukturen zur Steuerung und Koordination der vielfältigen Teilaktivitäten von radikalen Innovationen	eigene Ableitung aus Problemfeld P III. und P IV.
P-IV.1; P-IV.4	- Sukzessive Konkretisierung von Zielen mit zunehmenden Projektfortschritt anstatt einer zu engen Zielfixierung beim Projektstart → Definition eines konkreten Vorgehens hierzu; - Innovationsprozess entspricht Annäherungsprozess an das technologisch und ökologisch Machbare	(Scigliano 2003)
PF IV; PF V; PF VI	- Definition eines anpassbaren Vorgehens (Prozess) zur Entwicklung radikaler Innovationen (spezifische Unterscheidung zu inkrementellen Innovationen) bzw. Entwicklung einer ganzheitlichen Unterstützung und einzelner Unterstützungsmethoden; - methodische Unterstützung fokussiert auf frühe Phase; - flexibler Projektplan; „Lernplan“; flexibler und zeitgleich fokussierter Entwicklungsplan, weniger Formalismus; - aktives Schnittstellenmanagement	(Lynn et al. 1996) + eigene Einschätzung (Zimmer et al. 2012; Motte et al. 2011; Krieger 2005; Billing 2003; Scigliano 2003)
P-IV.2; P-IV.3; P-VI.1	- Ausbau eines organisatorisch verankerten Projektmanagements mit nötigen Freiräumen zur Komplexitätsminimierung	(Schuh 2011) (Scigliano 2003)
PF IV; PF VI	Entwicklung von Einzelmethoden zur Unterstützung des Innovationsprozesses (inkl. der frühen Phase) von radikalen Innovationen	eigene Ableitung aus Problemfeldern PF IV; PF V; PF VI
P-VIII.4; P-IV.3	ständiger Einbezug von Lead-Customers zur Innovationseinschätzung	(Herstatt 2007)
PF X	ständige Bewertung der Invention während des Entwicklungsprozesses	(Motte et al. 2011)
P-VIII.1; P-VIII.5	Initiierung von Strukturen und Routinen zur Sicherstellung eines regelmäßigen Flusses an radikalen Innovationsideen durch Top-Management	(Savioz et al. 2002)
P-VIII.5; P-VIII.6; P-III.7	Methoden zum Generieren radikaler Produktideen	eigene Ableitung aus Problemfeld PF III
PF X	notwendiger Einbezug des Top-Managements zur Bewertung radikaler Produktideen wegen Einflusspotenzial auf Unternehmensstrategie	(Savioz et al. 2002)
PF X	schnelle und transparente Ideenbewertung wesentlich für die Aufrechterhaltung der Motivation des Ideeneinreichers → Ableitung von Methoden und Prozessen für die Ideenbewertung radikaler Produktideen	(Savioz et al. 2002)
PF X	- Notwendigkeit einer Trennung zwischen Ideen- und Projektbewertung - getrennte Bewertungsmethoden von Ideen und Projekten in Form separater Portfolios und durch ein entsprechendes Roadmapping	(Savioz et al. 2002)
PF V; PF VII; PF X	- Unterstützung der Marktforschung durch zweckmäßige Einzelmethoden, durch Prozesse und durch eine Methodik; - Unterstützung, um neue Märkte zu erschließen; - Unterstützung bei der Marktpotenzial- und Attraktivitätsabschätzung	Ableitung aus angegebenen Problemfeldern
PF IV	- strategisches Nebeneinander zwischen radikalen und inkrementellen Innovationsprojekten; - Unterscheidung zwischen Innovationstypen mittels sinnvoller Kriterien und Schwellenwerte → frühzeitiges Erkennen u. Unterscheiden von radikalen Produktideen	(Scigliano 2003)
PF IX; PF X;	- Aufbau eines transparent gestalteten Ideenmanagements zum Umgang mit radikalen und inkrementellen Produktideen; - Identifizierung radikaler Produktideen mittels sinnvoller Kriterien; - Bewertungsmethoden mit auf radikale Innovationen angepassten Kriterien; - Methode zur Speicherung von abgelehnten radikalen Produktideen	eigene Ableitung aus Problemfeld PF IX; PF X und Experteneinschätzung

7 Diskussion und Ableitung zukünftigen Forschungsbedarfs

In der Literatur wurden radikale Innovationen bislang hauptsächlich aus betriebswirtschaftlicher Sichtweise bzw. aus klassischer Managementperspektive betrachtet und weniger von einem ingenieurwissenschaftlichen Standpunkt analysiert. Die im Zusammenhang mit diesem Beitrag erhobenen Meinungen von Produktentwicklungsexperten lassen den Rückschluss zu, dass für die Probleme bei der Umsetzung einer radikalen Innovation auch eine methodische Unterstützung aus dem Kompetenzfeld der Produktentwicklung angeboten werden sollte. Neben den reinen Managementaktivitäten sollte auch eine Unterstützung von konstruktiven und konzeptuellen Schritten angeboten und somit auch grundlegende Konzepte des Systems Engineering sowie klassische Methoden der Produktentwicklung aller beteiligten Fachdisziplinen unterstützt werden. Folgender Forschungsbedarf lässt sich aus den Ergebnissen dieses Beitrags ableiten:

Zunächst wurde im **Problemfeld I (PF I)** der zusätzliche Bedarf von neuem bzw. zusätzlichem Wissen bei der Entwicklung radikaler Innovationen abgeleitet. Außerdem muss der Einfluss von neuem Wissen auf Unsicherheit und das Risiko bei der Produktentwicklung radikaler Innovationen analysiert werden. Dazu wurde u. a. die Steigerung von Open-Innovation Aktivitäten und die Beschaffung und Nutzung von externem Wissen als wichtig angesehen. Als Forschungsbedarf wird hier zunehmende Methodenunterstützung beim Management von Wissen im Kontext radikaler Innovationen, das Aufzeigen von Vorteilen bzgl. Kooperationen mit externen „Wissensquellen“, eine Herangehensweise zur Vernetzung innerhalb radikaler Innovationsvorhaben und die sinnvolle Erweiterung von Closed-Innovation Prozessen über die Unternehmensgrenzen hinaus, analysiert. Weiterhin bleiben Folgen von Kooperationen als Einfluss auf den Innovationserfolg radikaler Produktideen zu prüfen (unter anderem mit agileren Unternehmenstypen, z. B. Start-Up Unternehmen).

Ein häufig angeführtes Problem beim Umgang mit radikalen Innovationen ist die Notwendigkeit einer angepassten Unternehmenskultur (**PF II**), die sich weg von hierarchischen und bürokratischen Denkweisen und somit „Innovationshemmern“, hin zu mehr Handlungsfreiheit und Kreativität wandeln sollte. Dabei müssen Führungskräfte und Mitarbeiter für die Thematik radikaler Innovationen sensibilisiert werden. Gleichzeitig sollte die Notwendigkeit, radikale Innovationen voranzutreiben erkannt und vermittelt werden (**PF II**).

Im Zusammenhang mit der Innovationskultur lässt sich auch in Bezug auf die Ideengenerierung (**PF VIII**) und damit auch auf die kreative Findungsphase von radikalen Produktideen, Forschungsbedarf feststellen. Hier wurden Unterschiede bei der Ideenfindung im Vergleich zu inkrementellen Innovationen ausgemacht, wonach Methoden und Rahmenbedingungen zur Generierung radikaler Produktideen zukünftig identifiziert, weiter- bzw. neu entwickelt werden müssen.

Forschungsbedarf besteht ebenfalls hinsichtlich der Projektteamzusammensetzung, der Budget- und Freiraumplanung und der Schärfe der Zieldefinition. Einer der Experten berichtete beispielsweise bei radikalen Innovationsprojekten nur vom Einsatz eines Basislastenhefts als erste Zielorientierung ohne zu enge Anforderungsdefinitionen, um das eigentliche Innovationsziel nicht einzuschränken. Dadurch würde eine zu starke Formalisierung des Innovationsprozesses vermieden und die Eigendynamik des Projekts ausgenutzt. Eine genaue Definition der Zielparameter (Anforderungen) sollte erst mit zunehmendem Projektfortschritt und damit einhergehender gesteigerter Informationsverfügbarkeit erfolgen (vgl. A10; **PF IV**).

Daran anknüpfend müssen Methoden, Handlungsempfehlungen und Instrumente für die Überwachung und Steuerung radikaler Innovationen gefunden werden, um den Entwicklungsprozess transparent, kontrollierbar, aber weiterhin kreativ und agil zu gestalten (**PF III / PF IV**).

Bezüglich der Gestaltung des Produktentwicklungsprozesses muss geprüft werden, inwieweit völlig neue Problemstellungen und stark veränderte Rahmenbedingungen mit den konventionellen Empfehlungen erfolgreich bearbeitet werden können. Generische Prozessabläufe für radikale Projekte sind nur bedingt geeignet (vgl. Kap. 5). Ein für radikale Innovationen angepasster oder durch eine gezielte Unterstützung erweiterter Produktentwicklungsprozess bietet einen Lösungsansatz (**PF IV**).

Gerade Handlungsempfehlungen für den Umgang während der frühen Phasen der Produktentwicklung, insbesondere im Ideenmanagement, fehlen in der Literatur bisher, sind allerdings, wie zuvor beschrieben, in der unternehmerischen Praxis nachgefragt (**PF VI / PF VIII**). Oftmals scheitern Projekte mit dem Ziel der Entwicklung einer radikalen Innovation bereits an der reinen Identifikation bzw. Kenntnis, dass eine radikale Produktidee als solche behandelt werden muss und es somit ange-

passter Prozesse bzw. Methoden für das Entwicklungsprojekt bedarf (**PF VIII**). Demzufolge besteht eine wichtige Aufgabe darin, den Innovationsgehalt einer Produktidee zunächst angemessen einzuschätzen, um dann problemspezifische Managementansätze anwenden zu können (Gemünden und Kock 2008). Die Klassifizierung von radikalen Innovationen anhand eines fest definierten Kriterienkatalogs in der frühen Phase muss angestrebt werden (**PF IX / (PF VIII)**). Eine Untersuchung, die Kernkriterien bzw. Schwellenwerte zur Einordnung radikaler Produktideen bzw. Unterscheidung von inkrementellen Produktideen analysiert und als zweckmäßiges Instrument zur Einordnung von Innovationen in der Praxis dienen kann, wird in der einschlägigeren Literatur ebenfalls nicht aufgeführt und führt damit zu weiterem Forschungsbedarf.

Seitens des Ideenmanagements (**PF X**) und damit der frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (**PF VI**) kritisiert Messerle (2016) vor allem die Bewertung von radikalen Innovationen, welche in etablierten Unternehmen im Tagesgeschäft häufig zurückgewiesen werden, da sie als zu ressourcen- und zeitintensiv sowie aufgrund des Neuheitsgrads als wenig beherrschbar gelten. Dadurch wächst das Bedürfnis nach einem methodischen Umgang hinsichtlich der Bewertung möglicher radikaler Produktideen. Dieser Wunsch nach gezielten, auf radikale Produktideen angepassten Methoden im Ideenmanagement (z. B. eine auf eine radikale Idee abgestimmte Bewertungsmethodik mit angepassten Kriterien bei der Ideenbewertung) wurde auch von Expertenseite deutlich. Inwieweit die Identifikation radikaler Produktideen als separater Prozessschritt im Ideenprozess oder auch innerhalb eines ersten Ideenbewertungsschritts durch eine bestimmte Wahl von Bewertungskriterien erfolgen kann, muss ebenfalls ermittelt werden. Insbesondere die methodische Unterstützung der Ideenbewertung radikaler Produktideen sollte somit ein zukünftiges Forschungsziel darstellen, auch um die Ideenbewertung transparent und nachvollziehbar zu gestalten (**PF X**).

Die Ideenbewertung geht einher mit der Abschätzung bzw. Entwicklung möglicher Märkte für das geplante radikale Produkt. Dementsprechend müssen auch Marktforschungsmethoden und -instrumente auf Anwendbarkeit bzw. nötige Anpassbarkeit überprüft werden (**PF VII**).

Zu ergänzen bleibt die an den jeweiligen Problemfeldern bereits erwähnte Unterstützung des gesamten Innovationsprozesses durch auf radikale Problemstellungen angepasste Methoden (**PF V**).

Die zuvor aufgeführten Ableitungen bieten zusammen mit den angeführten Problemen und Lösungsansätzen wichtige Anforderungen an Methoden, Prozessmodelle und Steuerungsgrößen, die in zukünftiger Forschung hinsichtlich radikaler Innovationen im Kompetenzfeld der methodischen Produktentwicklung beachtet werden müssen. Dabei ist es auch von erhöhter Wichtigkeit, die im Rahmen dieses Beitrags dargestellten Ansätze weiter auszuarbeiten und in verschiedenen Unternehmen zu erproben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden aufbauend auf einer Literaturrecherche und einer Erhebung von Expertenmeinungen aus der Unternehmenspraxis Probleme im Umgang mit radikalen Innovationen im Kontext heutiger Produktentwicklungsprozesse ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass teilweise große Problemfelder existieren, die forschungsseitig noch nicht ausreichend erforscht sind und eine methodische Unterstützung der industriellen Praxis nicht ausreichend gegeben ist. Im Rahmen des Beitrags wurden für alle identifizierten Problemfelder Ansätze abgeleitet, sodass es zukünftig möglich ist, die im Rahmen des Beitrags identifizierten Problemfelder und Einzelprobleme bei der Entwicklung einer radikalen Innovation zu beachten. Durch weitere Forschungsarbeit in diesem Bereich (vgl. Kapitel 7) soll der Umgang mit radikalen Innovationen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses effektiver und effizienter gestaltet werden, um zukünftig vermehrt radikale Innovationen hervorzubringen.

Literatur

- | | |
|--------------------------|--|
| Bharadwaj und Menon 2000 | BHARADWAJ, S.; MENON, A.: <i>Making Innovation Happen in Organizations</i> . In: <i>Journal of Product Innovation Management</i> 17 (2000), Nr. 6, S. 424–434. |
| Billing 2003 | BILLING, F.: <i>Koordination in radikalen Innovationsvorhaben</i> . 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2003. |
| Brennecke et al. 2001 | BRENNECKE, V. M.; DRÜNER, M.; GEMÜNDEN, H. G.; KASSNER, S.; LANGEN, R.; RICHTER, K.; SALOMO, S.; SCHWARZ, P.; TROMMSDORFF, V.: <i>Innovations-Kompass 2001</i> . Düsseldorf: D+L Printpartner, 2001. |

- DIN CEN/TS 16555 Teil 1 2013 DIN CEN/TS 16555 Teil 1. September 2013. *Innovationsmanagement-systeme*. Berlin: Beuth, 2013.
- Eisert 2006 EISERT, U.: *Radikale Produktinnovationen und die Fähigkeit zur Transformation*. St. Gallen, Hochschule für Wirtschaft-, Rechts- und Sozialwissenschaften. Dissertation, 2006.
- Forés und Camisón 2016 FORÉS, B.; CAMISÓN, C.: *Does incremental and radical innovation performance depend on different types of knowledge accumulation capabilities and organizational size?*. In: *Journal of Business Research* 69 (2016), Nr. 2, S. 831–848.
- Frishammar et al. 2016 FRISHAMMAR, J.; DAHLKOG, E.; KRUMLINDE, C.; YAZGAN, K.: *The Front End of Radical Innovation*. In: *Creativity and Innovation Management* 25 (2016), Nr. 2, S. 179–198.
- Garcia und Calantone 2002 GARCIA, R.; CALANTONE, R.: *A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology*. In: *Journal of Product Innovation Management* 19 (2002), Nr. 2, S. 110–132.
- Gemünden und Kock 2008 GEMÜNDEN, H. G.; KOCK, A.: *Erfolg substanzieller Innovationen*. In: FISCH, R.; MÜLLER, A.; BECK, D. (Hrsg.): *Veränderungen in Organisationen: Eine interdisziplinäre Herausforderung*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, S. 201–226.
- Gerybadze 2004 GERYBADZE, A.: *Technologie- und Innovationsmanagement*. München: Vahlen, 2004.
- Green et al. 1995 GREEN, S. G.; GAVIN, M. B.; AIMAN-SMITH, L.: *Assessing a multidimensional measure of radical technological innovation*. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 42 (1995), Nr. 3, S. 203–214.
- Hartschen et al. 2009 HARTSCHEN, M.; SCHERER, J.; BRÜGGER, C.: *Innovationsmanagement*. 1. Aufl. Offenbach: GABAL, 2009.
- Herrmann et al. 2007 HERRMANN, A.; HUBER, F.; T., T.: *Determinanten radikaler Produktinnovationen*. In: BELZ, C.; SCHÖGEL, M.; TOMCZAK, T. (Hrsg.): *Innovation Driven Marketing*. Wiesbaden: Gabler, 2007, S. 159–193.
- Herrmann et al. 2016 HERRMANN, T.; BINZ, H.; ROTH, D.: *Methodeneinsatz im Innovationsprozess*. In: *Ideen- und Innovationsmanagement* 42 (2016), Nr. 4, S. 133–140.
- Herstatt 2007 HERSTATT, C.; LÜTHJE, C.; LETTL, C.: *Fortschrittliche Kunden zu Breakthrough-Innovationen stimulieren*. In: HERSTATT, C. (Hrsg.): *Management der frühen Innovationsphasen*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2007, S. 61–76.
- Knack 2006 KNACK, R.: *Wettbewerb und Kooperation*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2006.
- Koen et al. 2001 KOEN, P.; AJAMIAN, G.; BURKART, R.; CLAMEN, A.; DAVIDSON, J.; D'AMORE, R.; ELKINS, C.; HERALD, K.; INCORVIA, M.; JOHNSON, A.; KAROL, R.; SEIBERT, R.; SLAVEJKOV, A.; WAGNER, K.: *Providing clarity and a common language to the 'Fuzzy Front End'*. In: *Research Technology Management* 44 (2001), Nr. 2, S. 46–55.
- Krieger 2005 KRIEGER, A.: *Erfolgreiches Management radikaler Innovationen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2005.
- Lefenda und Pöckhacker-Tröscher 2014 LEFENDA, J.; PÖCKHACKER-TRÖSCHER, G.: *Radikale Innovationen und disruptive Technologien*. Linz: Pöckhacker Innovation Consulting GmbH, Academica Superior – Gesellschaft für Zukunftsforschung, 2014.
- Leifer et al. 2000 LEIFER, R.; MCDERMOTT, C. M.; PETERS, L. S.; RICE, M. P.; VERYZER, R. W.: *Radical innovation*. Boston: Harvard Business School Press, 2000.
- Leifer et al. 2001 LEIFER, R.; O'CONNOR, G. C.; RICE, M.: *Implementing radical innovation in mature firms*. In: *The Academy of Management Executive* 15 (2001), Nr. 3, S. 102–113.
- Lin und Chen 2016 LIN, C.; CHEN, C.: *Applying TRIZ to develop radical innovations for knife sheaths*. In: *2016 International Conference on Applied System Innovation*. Taiwan: Taiwanese Institute of Knowledge Innovation (TIKI), 2016, S. 1–4.
- Lynn et al. 1996 LYNN, G.; MORONE, J. G.; PAULSON, A. S.: *Marketing and Discontinuous*

- McDermott 1999
 McDERMOTT, C.: Discontinuous Innovation. In: DORF, R. C. (Hrsg.): *The technology management handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999, S. 3.17-3.20.
- Messerle 2016
 MESSERLE, M.: *Methodik zur Identifizierung der erfolgversprechendsten Produktideen in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses*. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2016.
- Meyer 2011
 MEYER, J.: *Erfolgsfaktor Innovationskultur*. 1. Aufl. Göttingen: BusinessVillage, 2011.
- Meyer 2012
 MEYER, J.: *Radikale Innovation*. 1. Aufl. Göttingen: BusinessVillage, 2012.
- Motte et al. 2011
 MOTTE, D.; YANNOU, B.; BJÄRNEMO, R.: *The specificities of radical innovation*. In: CHAKRABARTI, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Research into Design Engineering, Bangalore, India, 10. - 12.01.2011*: Research Publishing Service, 2011, S. 79–86.
- O'Connor und Rice 2013
 O'CONNOR, G. C.; RICE, M. P.: *A Comprehensive Model of Uncertainty Associated with Radical Innovation*. In: *Journal of Product Innovation Management* 30 (2013), S. 2–18.
- Pahl et al. 2007
 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.: *Konstruktionslehre*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- Pleschak und Sabisch 1996
 PLESCHAK, F.; SABISCH, H.: *Innovationsmanagement*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.
- Rice et al. 2001
 RICE, M.; KELLEY, D.; PETERS, L.; O'CONNOR, G. C.: *Radical innovation*. In: *R&D Management* 31 (2001), Nr. 4, S. 409–420.
- Salomo 2003
 SALOMO, S.: *Konzept und Messung des Innovationsgrades - Ergebnisse einer empirischen Studie zu innovativen Entwicklungsvorhaben*. In: SCHWAIGER, M.; HARHOFF, D. (Hrsg.): *Empirie und Betriebswirtschaft*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2003, S. 399–427.
- Savioz et al. 2002
 SAVIOZ, P.; BIRKENMEIER, B.; BRODBECK, H.; LICHTENTHALER, E.: *Organisation der frühen Phasen des radikalen Innovationsprozesses*. In: *Die Unternehmung* 56 (2002), Nr. 6, S. 393–408.
- Schmidthals 2007
 SCHMIDTHALS, J.: *Technologiekooperationen in radikalen Innovationsvorhaben*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag / GWV Fachverlage, 2007.
- Schreiner 2006
 SCHREINER, O. M. E.: *Aufbau und Management von Innovationskompetenz bei radikalen Innovationsprojekten*. Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2006.
- Schuh 2011
 SCHUH, G.: *Handbuch Produktion und Management 3. Innovationsmanagement*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2011.
- Scigliano 2003
 SCIGLIANO, D.: *Das Management radikaler Innovationen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2003.
- Stilianidis 2015
 STILIANIDIS, A.: *Strategisches Management radikaler Innovationen*. 1. Aufl. Berlin: epubli, 2015.
- Verworn und Herstatt 2007
 VERWORN, B.; HERSTATT, C.: *Strukturierung und Gestaltung der frühen Phasen des Innovationsprozesses*. In: HERSTATT, C. (Hrsg.): *Management der frühen Innovationsphasen*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2007, S. 111–134.
- Veryzer 1998
 VERYZER, R. W.: *Discontinuous Innovation and the New Product Development Process*. In: *Journal of Product Innovation Management* 15 (1998), Nr. 4, S. 304–321.
- Zimmer et al. 2012
 ZIMMER, B.; YANNOU, B.; STAL, J.: *Proposal of radical innovation project selection model based on proofs of value, innovation and concept*. In: MARJANOVIĆ, D.; ŠTORGA, M.; PAVKOVIC, N.; BOJCETIC, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Design Conference*. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2012, S. 141–150.

Hürden und Strategien für die Realisierung radikaler Innovationen durch FuE-orientierte Organisationen

Florian Schütz

Fraunhofer IAO, Center for Responsible Research and Innovation, Berlin, Deutschland,
florian.schuetz@iao.fraunhofer.de

Abstract: Radikale Innovationen werden heute nicht nur von Seiten des Top-Managements internationaler Unternehmen gefordert, sie sind gleichermaßen das Ziel innovationspolitischer Agenden. Gänzlich neue Ansätze für Themen wie Mobilität oder Energie zu verfolgen und diese erfolgreich im Gefüge von Gesellschaft, Gesetzgeber und bestehenden Marktstrukturen umzusetzen, stellt für die Akteure des Innovationssystems jedoch keine triviale Aufgabe dar. Anhand einer empirischen Experten-Befragung in Großunternehmen, KMU, Start-ups und Forschungsorganisationen identifiziert der vorliegende Beitrag Hürden für radikale Innovationen aus der Perspektive der Innovationspraxis sowie gegenwärtige Strategien, um diese zu überwinden. Dabei weist die Untersuchung auf die hohe Bedeutung neuartiger Akteurskonstellationen im Innovationsprozess hin, um im Zusammenspiel der Organisationen und durch den Einbezug relevanter Wissensbestände die zuvor beschriebenen Hemmnisse für Radikalität zu minimieren.

Keywords: Radikale Innovation, neue Akteurskonstellationen in FuE, Geschäftsmodell FuE

1 Pfadändernde Lösungen für die Zukunftsfähigkeit von Wirtschaft und Gesellschaft

Innovationen sind der Schlüssel für wirtschaftliches Wachstum und Wohlstand, sie tragen dazu bei, zukünftig allen Menschen eine hohe Lebensqualität zu ermöglichen (BMBF 2014; Box 2009; Fliaster 2007). Globale Entwicklungen, wie die Flüchtlingskrise, die Erderwärmung, der demografische Wandel aber auch die Möglichkeiten der Digitalisierung resultieren heute in der Forderung nach tiefgreifenden oder "pfadändernden" Neuerungen – nach Innovationen, die die bisherige Richtung technologischer, wirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Entwicklung verändern oder sogar verlassen helfen (Owen et al. 2013; Steward 2008, 2012).

In diesem Sinne zielt die neue Hightech-Strategie der Bundesregierung auf tiefgreifenden Wandel ab, der über "die bloße Umsetzung technologischer Neuerungen in Produktionsprozessen" (BMBF 2014, S. 14) hinausgeht und gesellschaftliche Veränderungsprozesse anstößt. Die neuen Ansätze sollen – so der politische Appell – mit hoher Innovationsdynamik in Innovationen mit klar erkennbarem Nutzen und breiter Akzeptanz in der Gesellschaft umgesetzt werden. Auf diesem Weg könne die Position Deutschlands als führende Wirtschafts- und Exportnation langfristig gestärkt werden (BMBF 2014). Trotz des dabei mehrfach herausgestellten gesamtgesellschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzens, handelt es sich um keine triviale Forderung, oder gar um eine Beschreibung alltäglicher Innovationsroutine, geht es doch gerade um diejenigen Felder, in denen es schwierig und kurzfristig unrentabel scheint, gänzlich neue Ansätze zu verfolgen und umsetzen zu wollen. So müssen Organisationen mit hohen Unsicherheiten umgehen (Jöstingmeier und John 2017, Freeman und Soete 2012; Methé et al. 1997, Zenger und Lazzarini 2004; Foster 1986), wenn sie anstreben, mit langfristigen Investitionen in Forschung und Entwicklung die Herausforderungen des Energiesektors zu lösen oder versuchen, gänzlich neue Konzepte für Mobilität, Arbeit oder Gesundheit sowohl bei Anwenderinnen und Anwendern, als auch im Gesamtzusammenhang des Innovationssystems durchzusetzen. Nichtsdestotrotz wird der Anspruch, radikale Pfadänderungen zu wagen und zu ermöglichen heute auch aufseiten der Wirtschaft formuliert. Vor allem das Top-Management großer internationaler Unternehmen, wie beispielsweise der Vorstandsvorsitzende der Daimler AG, Dieter Zetsche, schwören ihre Unternehmen darauf ein,

Konzepte wie Mobilität zukünftig in gänzlich neuen Geschäftsmodellen zu denken und dabei die vollständige Transformation der eigenen Organisation zu wagen (Fasse und Schnell 2016).

Der vorliegende Beitrag untersucht im deutschen Innovationssystem, welche Rolle Organisationen mit einem primären Fokus auf Forschung und Entwicklung (FuE) bei der Generierung dieser geforderten pfadändernden Neuerungen einnehmen können. Auf Basis einer qualitativen empirischen Expertenbefragung werden dazu die Hürden für "radikale Innovationen" aus der Perspektive der Innovationspraxis rekonstruiert. Vor diesem Hintergrund werden abschließend aktuelle Strategien der Organisationen diskutiert, die identifizierten Hemmnisse positiv zu wenden.

2 Das Konzept "radikale Innovation"

Ein Verständnis von Innovationen, die gänzlich neue Lösungsansätze für gesellschaftsrelevante Problemstellungen liefern, dabei gleichzeitig die gängigen und bereits vorgezeichneten Pfade verlassen und dennoch auf hohe Akzeptanz in ihrer Realisierung stoßen, wird hier im Begriff der radikalen Innovation zusammengefasst. Im Unterschied zu disruptiven Innovationen (Overdorf und Christensen 2000; Dowling und Hüsig 2004) zeichnen sie sich nicht in erster Linie durch die stark an der wirtschaftswissenschaftlichen Denkweise ausgerichteten Kriterien der technologischen Neuheit und ökonomischen Auswirkung (ebd.) aus. In Anlehnung an Dolata (2009, 2011) wird der radikale Gehalt einer Innovation über ihre Eingriffstiefe bestimmt – über ihre Auswirkung auf Bereiche der Gesellschaft, des Marktes, der Wissenschaft oder der Politik (externe Radikalität) (ebd.). Damit ist das Ausmaß der durch die Invention eingeschlagenen Pfadänderung genauso wichtig zur Bestimmung des radikalen Gehalts, wie auch deren Anschlussfähigkeit – beispielsweise an gesellschaftliche Bedarfe und Werte, den Stand technologischer Entwicklung, Marktstrukturen oder rechtliche Rahmenbedingungen – da diese Anschlussfähigkeit letztlich darüber entscheidet, ob eine Idee als Innovation realisiert werden kann und inwieweit sie gängige Strukturen, Denk- und Handlungsweisen in ihrer Umwelt nachhaltig verändert. Radikale Innovationen beruhen demnach nicht notwendigerweise auf disruptiven technologischen Neuerungen, sondern können gleichermaßen aus kontinuierlichen inkrementellen Veränderungen (Kasmire et al. 2012; Reichert 1994), neuen Geschäftsmodellen oder aus sozialen Innovationen resultieren. Die Entscheidung, gezielt auf derartige Innovationen hinzuwirken, bedeutet für Organisationen meist, kontrainduktive Entscheidungen (Luhmann 2011) treffen und mit hohen Unsicherheiten umgehen zu müssen (Jöstingmeier und John 2017) sowie bestehende Prozesse, Strukturen und Geschäftsmodelle anzupassen (interne Radikalität) (Dolata 2009; Leifer et al. 2000).

3 Das innovative Potenzial unterschiedlicher FuE-Organisationen im deutschen Innovationssystem

Zahlreiche Studien untersuchen die Innovationsfähigkeit sowie deren Bedingtheit in Großunternehmen und KMU¹, Start-ups² und der anwendungsorientierten Forschung. Ihre Innovationskraft schöpfen große Unternehmen aus ihrem Ressourcenreichtum. Ihnen stehen neben ihrem Organisationswissen auch die nötigen finanziellen, technologischen und personellen Ressourcen für intensive FuE-Aktivitäten zur Verfügung (Zimmermann 2012; Dodgson und Rothwell 1995) sowie etablierte Zugänge zu Kunden, Zulieferern und anderen Stakeholdern (Maaß und Führmann 2012; Methé et al. 1997). Innovationsaktivitäten sind in großen Unternehmen in erster Linie auf die Steigerung von Profitabilität und die Maximierung des Shareholder Values ausgerichtet. Daraus leiten sich jedoch Erfolgsindikatoren ab, die langfristig angelegten Innovationsinvestitionen entgegenstehen (Blank 2016). Darüber hinaus stellt die Abhängigkeit der Innovationskraft einer Organisation von ihrer Fähigkeit zur Transformation (Schumpeter 1950) die größte Herausforderung für etablierte Großunternehmen dar: Beharrungsstrukturen prägen neben der Ebene der Mitarbeitenden (Freeman und Engel 2007) häufig auch das Top-

¹ Differenzierung ab 500 Mitarbeitenden, nach BMBF (2016)

² Definition: jünger als 10 Jahre, hoch innovative Technologien und/oder Geschäftsmodelle, streben nach signifikantem Wachstum, nach Kollmann et al. (2016)

Management der Unternehmen (Blank 2016). Ursächlich dafür ist in beiden Gruppen der starke persönliche Bezug zu gewohnten Technologien und Geschäftsmodellen (ebd.) gekoppelt mit dem Fehlen von Anreizen für Agilität oder das Streben nach Innovationen jenseits vorgezeichneter Pfade (Méthé 1997; Arrow 1962; Reinganum 1985). Denn für diese, im englischen Sprachraum als "major innovation" bezeichneten Neuerungen, lassen sich Gewinnerwartungen deutlich schwerer prognostizieren (Freeman und Engel 2007) während das Risiko von Umsatzeinbußen steigt (Méthé et al. 1997, Zenger und Lazzarini 2004; Foster 1986) und sich Strukturen wie auch Machtverhältnisse im Unternehmen auf unvorhersehbare Weise verschieben (Freeman und Engel 2007; Burgelman 2005; Mezas und Glynn 1993; Henderson und Clark 2008; Tushman und Anderson 2009). Die aus der Größe der Organisation resultierenden langen und vielstufigen Entscheidungsprozesse über die richtige Allokation von Ressourcen wirken demotivierend auf Innovatoren und verhindern die Umsetzung risikoreicher Projekte im Unternehmen (Freeman und Engel 2007; Zimmermann 2012; Acs und Audretsch 1992).

Als Steuerungsmechanismus für die Innovativität in großen Unternehmen wird in erster Linie ein Wandel der Innovationskultur diskutiert, mit dem Ziel, die Ambidextrie von Exploitation (Ausnutzung von Bestehendem) und Exploration (Erkundung von Neuem) zu ermöglichen. Dazu sollen beispielsweise Aspekte einer Start-up Kultur übertragen werden, um Intrapreneurship zu fördern sowie neue Prozesse, Anreize und Ressourcen für Kreativität bereitgestellt werden (O'Reilly und Tushman 2004; Hood und Birkinshaw 2001). Darüber hinaus entscheidet die Fähigkeit, in Innovationsnetzwerken zu partizipieren wesentlich über die Innovationsfähigkeit von Unternehmen (Konsti-Laakso et al. 2012; Jørgensen und Ulhøi 2010, Chesbrough 2003; Snow et al. 2011; Prahalad und Ramaswamy 2004).

Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) spielen im Vergleich zu Großunternehmen eine deutlich untergeordnete Rolle im Bereich (technologischer) FuE (Maaß und Führmann 2012; Kirner et al. 2006 Rammer 2006). Dies ist vor allem auf ihre eingeschränkten finanziellen und personellen Ressourcen sowie auf fehlendes methodisches Innovations-Know-how zurückzuführen (Welsch et al. 2013; Zimmermann 2014; Pfäfflin 2008). Riskante Entscheidungen bedrohen stets das gesamte Unternehmen und werden deshalb weitestgehend vermieden (Harrison und March 1984). Innovationsaktivitäten in KMU sind dementsprechend nur selten auf die Generierung von "major innovations" ausgerichtet, sondern vielmehr auf die Verbesserung und Weiterentwicklung ihrer Produkte und Dienstleistungen. Die Impulse hierfür entstehen im Zusammenspiel der Mitarbeitenden (meist Ingenieure) und den Geschäftskunden (Zimmermann 2012; Rüggeberg und Burmeister 2008; Kirner et al. 2006; Abel et al. 2006; Hirsch-Kreinsen 2005). Ziel der meisten KMU ist es, Vorreiter in ihrer jeweils eigenen Marktnische zu sein (Zimmermann 2012). Durch ihr marktnahes Wissen (Penzkofer 2005) und ihre größenbedingt höhere Agilität (Kirner et al. 2006; Domsch et al. 1995; Rammer 2006) können sie optimal auf die Bedürfnisse ihrer Kunden eingehen. Die Literatur benennt, neben der stärkeren Implementierung von Innovationsstrategien und -routinen, Kooperationsprojekte mit FuE-starken Akteuren aus Forschung und Wirtschaft als den zentralen Hebel, um die Innovationskraft der KMU zu stärken (Konsti-Laakso 2012; Bougrain und Haudeville 2002; Asheim und Isaksen 2002; Rüggeberg et al. 2008; Fischl 2008; van de Vrande et al. 2009; Maaß und Führmann 2012; Kirner et al. 2006).

Start-ups gelten als diejenige Unternehmensform, die am ehesten darauf ausgerichtet ist, bestehende Innovationspfade zu verlassen (Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) 2016; Méthé et al. 1997). Im Gegensatz zu KMU ist ihre FuE-Orientierung deutlich höher (Abel-Koch et al. 2015; Zimmermann 2014). Im Vergleich zu Großunternehmen sind die Anreize für Innovativität für Entrepreneure, ihre Mitarbeitenden und Investoren gleichermaßen hoch (Freeman und Engel 2007). Dies macht sie zusammen mit der spezifischen Start-up-Kultur zu einem attraktiven Arbeitgeber, der mit den globalen Unternehmen um High-Potentials konkurriert (Zenger und Lazzarini 2004; Laugemann et al. 2015; Tumasjan et al. 2011). Die meist jungen Teams greifen neue Technologien häufig vor den etablierten Unternehmen auf und verwerten diese in Produkten und Dienstleistungen (Zimmermann 2012; Kirner et al. 2006). Dabei sind sie deutlich risikoaffiner als große Unternehmen (Zenger und Lazzarini 2004; Méthé et al. 1996). Die Innovationskraft der Start-ups wird jedoch deutlich eingeschränkt – einerseits durch die allgegenwärtige Knappheit an Ressourcen (Kapital, Personal, Marktmacht, Netzwerke) andererseits durch das Fehlen von Strukturen und Prozessen (Freeman und Engel 2007), deren Etablierung während des avisierten schnellen Wachstums wiederum zum Verlust ihrer vormaligen Innovationsressource Agilität führt (ebd.).

Die Kernaufgabe FuE-orientierter beziehungsweise anwendungsorientierter Forschungsorganisationen besteht – nach dem deutschen Modell – im Wissens- und Technologietransfer (WTT) (Wissenschafts-

rat (WR) 2016; Gemeinsame Wissenschaftskonferenz (GWK) 2016). Ein Schwerpunkt wird dabei meist auf die Kommerzialisierung von Forschung und die Zusammenarbeit mit der Wirtschaft gelegt. Der Auftrag anwendungsorientierter Forschungseinrichtungen ist durch die Vergabe staatlicher Fördermittel im Gegensatz zur Wirtschaft nicht auf Profit, sondern das Gemeinwohl ausgerichtet, Forschungsschwerpunkte adressieren auch langfristige Fragestellungen mit unklaren Erfolgsaussichten (ebd.; EFI 2016; Polt et al. 2009). Hürden für die Innovationskraft werden weniger in den Spezifika der anwendungsorientierten Forschungseinrichtungen selbst verortet, sondern übergreifend im Wissenschaftssystem an sich. Vor allem die dort relevanten Indikatoren – Publikationen, Drittmittel, Patente und das Fehlen von Messkriterien für einen weitreichenderen Impact der Forschung – werden als Herausforderungen für Innovativität und eine an gesellschaftlichen Herausforderungen und langfristigen Zielen orientierte Forschung diskutiert (WR 2016; Allmendinger und Gamisch 2011). Gerade im deutschen Wissenschaftssystem werden darüber hinaus die Rahmenbedingungen des Arbeitens in der Wissenschaft problematisiert, die es unter anderem erschweren, die innovativsten Köpfe im System zu halten (Schütz et al. 2016; Kahlert 2012; Funken et al. 2015; Briedis et al. 2013). Um das innovative Potenzial der anwendungsorientierten Forschung zu steigern, fordern Experten der Wissenschaftsforschung verbesserte Arbeitsbedingungen für Forschende, Indikatoren und Anreize für eine Stärkung von WTT-Aktivitäten, erhöhte Ressourcen für freie Forschung, die Verfolgung internationaler Strategien und transdisziplinärer Ansätze, sowie eine Stärkung der Kompetenzen in den Bereichen Management, Führung und Transfer unter den Mitarbeitenden (Polt et al. 2009; GWK 2016; WR 2016; Allmendinger und Gamisch 2011; Berson und Linton 2005, Arveson 2012).

Ein Großteil der hinzugezogenen Studien fokussiert auf einzelne, organisationsspezifische Kultur- und Managementaspekte, sowie deren Einfluss auf Kreativität und Innovationsfähigkeit in bestimmten Organisationsformen. Die Frage, welchen Beitrag die Akteure im deutschen FuE-System vor diesem Hintergrund leisten können, um die geforderten Innovationen mit hoher Radikalität hervorzubringen, wird im vorliegenden Beitrag untersucht. Dazu wird die Perspektive der Akteure selbst rekonstruiert.

4 Methodisches Vorgehen bei der Analyse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind Teil des BMBF-geförderten Forschungsprojekts "Radikale Innovationen". Im Mittelpunkt der empirischen Befragung stand die Frage, wie sich vier unterschiedliche Typen von FuE-orientierten Organisationen gegenüber dem Ziel, Innovationen mit hoher Radikalität hervorzubringen, positionieren. An der Studie beteiligten sich fünf große internationale Unternehmen beziehungsweise deren unternehmenseigene Labs (GU), sechs kleine und mittlere Unternehmen (KMU), vier Start-ups (SU) und fünf anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen (AF). Diese wurden anhand theoretischer Gesichtspunkte nach einem qualitativen Stichprobenplan (Merkens 2010) über zwei Kriterien ausgewählt: erstens, ein besonders hoher Grad an Innovativität. Dieser wurde anhand von FuE-Investitionen oder Innovationspreisen bestimmt. Zweitens fokussierte die Untersuchung auf Organisationen, deren FuE-Aktivitäten den als prioritär geltenden Zukunftsfeldern wie Mobilität, Digitalisierung oder Gesundheit (BMBF 2014) zugeordnet werden können.

In den beteiligten Organisationen wurden insgesamt 25 leitfadengestützte, qualitative Experteninterviews durchgeführt. Bei den befragten Expertinnen und Experten handelte es sich um von den Organisationen anhand der Fragestellung benannte Personen. In den untersuchten großen Unternehmen waren diese in der Regel im Bereich Innovationsmanagement angesiedelt; in KMU, Start-ups und Forschungsorganisationen wurde jeweils die oberste Führungsebene befragt. Zusätzlich wurden im Projekt fünf Expertinnen bzw. Experten befragt, die als Mittler eine beratende Funktion für die zuvor benannten Organisationen einnehmen. Ein sozialwissenschaftliches, qualitatives Vorgehen ermöglicht es, die Perspektive der befragten Akteure zu rekonstruieren, um die untersuchten Sachverhalte zu verstehen und einer Erklärung zugänglich zu machen (Gläser und Laudel 2009). Experteninterviews (ebd.) verstehen dabei die Rolle der Interviewten als Quelle von Spezialwissen über die zu erforschenden Sachverhalte. Alle Interviews wurden aufgezeichnet und anschließend transkribiert, um sie einer sozialwissenschaftlichen Auswertung zugänglich zu machen. Diese erfolgte in Form einer qualitativen Inhaltsanalyse, in deren Verlauf die von Mayring (2010) vorgeschlagene Technik der Systematisierung und Strukturierung um eine regelgeleitete Interpretation des extrahierten Materials ergänzt wurde, angelehnt an das Verfahren nach Gläser und Laudel (2009).

5 Hemmnisse für Radikalität aus Sicht der Innovationspraxis

5.1 Ideen mit radikalem Potenzial als Voraussetzung radikaler Innovationen

Die Frage, ob es neuer Methoden und Prozesse bedürfe, um Ideen mit dem geforderten radikalen Potenzial hervorzubringen, wurde von den Befragten in allen vier Organisationstypen verneint. Sie vertrauen darauf, mit ihren Ideationsprozessen – so unterschiedlich diese auch sind – bereits jetzt Innovationen mit einem hohen Grad an Radikalität erzielen zu können. Der Gedanke, bestehende Ideengenerierungsprozesse zu verändern, spielt demnach in der Innovationspraxis keine Rolle. Das Problem wird stattdessen in den Realisierungsbedingungen gesehen – in den Möglichkeiten der Organisationen, ihre Ideen mit radikalem Potenzial in radikale Innovationen umzusetzen. Den Befragten zufolge scheitert die Realisierung radikaler Ideen einerseits an den Innovationszielen, -modellen und -kulturen der unterschiedlichen Organisationen, die aufgrund ihrer engen Verknüpfung mit den Ressourcen und der grundlegenden Funktionsweise jedes Organisationstyps jedoch als nur schwer veränderlich gelten (interne Anschlussfähigkeit) – andererseits an der Anschlussfähigkeit der Inventionen mit hohem radikalem Gehalt außerhalb der eigenen Organisation, weshalb sich diese nicht als Innovationen durchsetzen können (externe Anschlussfähigkeit).

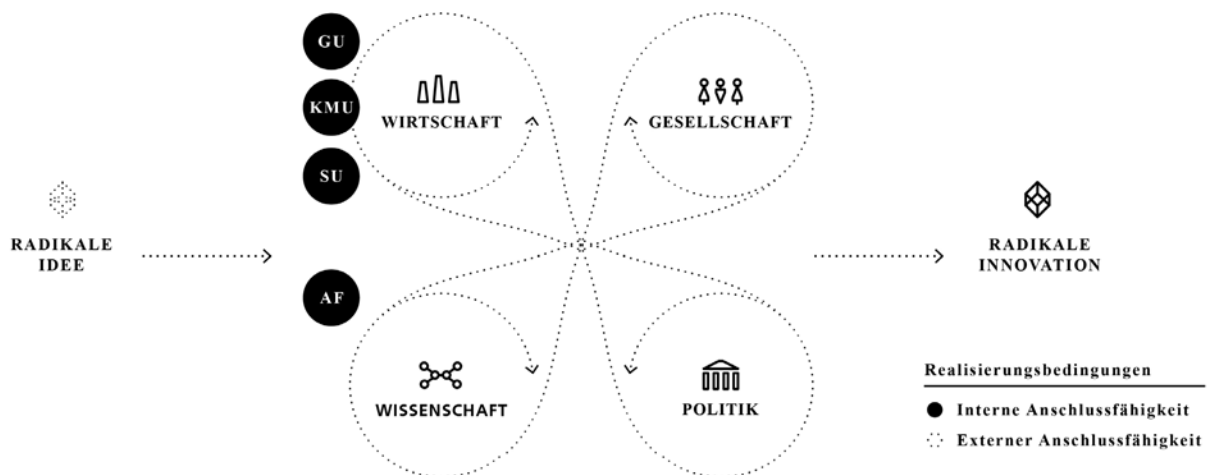


Bild 1: Hürden für radikale Ideen aus Praxisperspektive. Eigene Darstellung © Fraunhofer 2017

5.2 Die Möglichkeit, radikale Inventionen innerhalb von Organisationen umzusetzen

Die Fähigkeit einer Organisation, Ideen mit radikalem Potenzial aufzugreifen und diese in Innovationen umzusetzen, hängt nach Ansicht der Befragten von ihren jeweiligen Innovationszielen, -modellen und -kulturen ab. Für die Umsetzung radikaler Ideen in Organisationen bedürfe es zunächst eines Leitbildes, das den Fortschritt für die Menschheit zum prioritären Ziel erhebt und von einer visionären Führung in der Organisation umgesetzt wird. Darüber hinaus bedürfe es der notwendigen Ressourcen, um risikoreiche Entscheidungen treffen und auch langfristige Innovationsinvestitionen tätigen zu können. Schließlich entscheide die Agilität der Organisation (von Strategien, Strukturen, Prozessen, Wissensbeständen, Technologien, Geschäftsmodellen und Marktbeziehungen) und ihrer Mitarbeitenden, in welchem Ausmaß bestehende und vorgezeichnete Pfade verlassen und gezielt neue Ansätze verfolgt werden könnten. Die Frage, welchen Beitrag die Akteure im deutschen FuE-System vor diesem Hintergrund leisten können, um die geforderten Innovationen mit hoher Radikalität hervorzubringen, wurde mit allen Organisationsvertreterinnen und -vertretern diskutiert.

Die Befragten in internationalen Großunternehmen und KMU beschreiben die grundlegende Ausrichtung ihrer Innovationsaktivitäten als unvereinbar mit dem Ziel der radikalen Innovation. Ziel sei stets der auch kurzfristige wirtschaftliche Erfolg. Die Produktoptimierung im Core-Business verhindere es, "auch mal zur Seite zu schauen". Erst in der Krise würde man sich gänzlich neuen Ansätzen öffnen, hätte dann aber nicht mehr die nötige Kraft für radikale Innovationen. Die Bereitstellung von Ressour-

cen für Ideen folge einem strukturierten Prozess, in dessen Verlauf unterschiedliche unternehmensinterne Stakeholder den wahrscheinlichen Markterfolg gegen Kosten und Risiken der Invention abwägen. Indikatoren wie "Nachhaltigkeit" und "langfristige Erfolgsaussichten" gelten hingegen als nicht quantifizierbar und würden deshalb kaum in die Entscheidungen einbezogen. Zwar könnten diejenigen Unternehmen mit eigenen Corporate-Foresight Prozessen auch begrenzte Mittel in Themen investieren, die erst in ein bis zwei Jahrzehnten Erfolg versprechen, doch müssten sie dabei das Risiko in der Regel alleine tragen. Deshalb sei auch die Reversibilität der Effekte riskanter Entscheidungen ein wichtiger Faktor: Pfadänderungen, die eine Rückkehr zur vorherigen Stabilisation ausschließen, würden wenn möglich vermieden. Insbesondere wegen der bereits in Kapitel 3 beschriebenen fehlenden Agilität gilt die Innovationskultur von Großunternehmen als unvereinbar mit den Ansprüchen der radikalen Innovation. Sogar in den konzerneigenen Labs gebe es nur einen geringfügig erhöhten Spielraum, um Ideen mit unsicheren Profitaussichten zu verfolgen. Insgesamt kommen die befragten Vertreterinnen und Vertreter der Großunternehmen zu dem Schluss, dass bisher ein Geschäftsmodell für unternehmerische Innovationsaktivitäten fehle, das den Anspruch einer Umsetzung radikaler Innovationen mit den Interessen und der Innovationskultur der Unternehmen vereinbar mache.

Ebenso wenig sehen sich die untersuchten KMU in der Position des Akteurs, der zukünftig die geforderten Innovationen mit hoher Radikalität umsetzt. Innovationsaufträge von Firmenkunden seien immer an der Optimierung des Status quo orientiert, Pfadabweichungen seien weder gefragt, noch passfähig zu den bestehenden Systemen der Kunden. Die Entscheidung über Themen und Ideen, die zukünftig verfolgt werden sollen, würden auch dort, wo formalisierte Entscheidungsprozesse vorhanden sind, im Wesentlichen als Bauchentscheidungen des Managements getroffen. In der Risikoabwägung spielt der Gedanke, durch riskante Entscheidungen die Belegschaft des eigenen Unternehmens zu gefährden, eine zentrale Rolle. Dementsprechend könnten in KMU weder die nötigen personellen noch finanziellen Ressourcen aufgewendet werden, um Innovationen mit unsicheren oder nur langfristigen Erfolgsaussichten umzusetzen. Auch der Anspruch der Agilität stelle ein bedeutendes Hindernis für Radikalität in KMU dar, die zwar im Gegensatz zu großen Unternehmen über agilere Entscheidungsprozesse verfügen, jedoch vor größeren Herausforderungen stehen, wenn mit den vorhandenen Personalressourcen neue Wissensquellen und Fach-Themen erschlossen werden sollen.

Das radikale Potenzial der Ideen, auf die sich Start-ups begründen, gilt bei allen Befragten als außerordentlich hoch, denn das Geschäftsmodell von Start-ups müsse auf einer Idee mit hohem radikalem Potenzial beruhen, um sich gegen große Player am Markt zu behaupten oder um später von Großunternehmen übernommen zu werden. Da es für die jungen Unternehmen dabei viel zu gewinnen, jedoch nur wenig zu verlieren gibt, ist die Risikoakzeptanz der befragten Gründerinnen und Gründer überdurchschnittlich hoch. Die meist jungen Entrepreneure verfolgen mit hoher intrinsischer Motivation die Realisierung einer Idee, durch die ein bestimmtes, persönliches oder von ihnen identifiziertes Problem gelöst werden soll. Dabei beschreiben sie agile Strukturen und Prozesse als ein Kernmerkmal ihrer Kultur. Lediglich die Knappheit an Ressourcen – der Mangel an Risikokapital sowie an personellen und zeitlichen Ressourcen – schränke das radikale Potenzial von Start-ups erheblich ein. So sei es kaum möglich, die zentrale Invention, auf die sich das Start-up begründet, zur Marktreife voranzutreiben, darüber hinaus gehende neue Ideen mit hohem radikalem Potenzial seien den Gründern zufolge zwar vorhanden, würden aber aufgrund der Ressourcenknappheit nicht angegangen.

Anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen beschreiben im Bereich der Auftragsforschung die gleichen Herausforderungen, wie die untersuchten KMU: Als Forschungsdienstleister könne man keine radikalen Ideen anbieten, solange die Industrie nicht radikal arbeite, sonst verliere man Kunden. Darüber hinaus sehen die Forschungsorganisationen ihren Auftrag darin, Trend-Entwicklungen für Unternehmen vorzubereiten. Zum Bedauern der befragten Institutsleitungen könnten jedoch auch die dabei bearbeiteten wissenschaftlichen Themen viel zu selten bestehende und vorgezeichnete Pfade verlassen. Als ursächlich dafür und gleichzeitig als unveränderlich werden die Kriterien zur Auswahl von Themen und Ideen im wissenschaftlichen Umfeld genannt: Nicht nur in der Auftragsforschung, sondern auch in der staatlich geförderten Vorlauf-Forschung würden Risiken zugunsten sicherer Erfolgs- beziehungsweise Verkaufswahrscheinlichkeiten der späteren Innovation vermieden. Sogar die Forschung in öffentlich geförderten Projekten und im Rahmen von Qualifikationsarbeiten orientiere sich stets zu sehr am Diskurs des Fachbereichs, um von Fördermittel-Gebern bewilligt oder im Peer-Review veröffentlicht zu werden. Es fehle an Anreizen für die Forschenden, Pfade zu verlassen und riskante Ideen umzusetzen. Befragte Unternehmensvertreterinnen und -vertreter attestierten der an-

wendungsorientierten Forschung darüber hinaus eine zu geringe Agilität, um bestehende Bedarfe und spezifische Problemstellungen passgenau zu adressieren. Dies führen sie einerseits ebenfalls auf die (Anreiz-)Mechanismen des deutschen Wissenschaftssystems zurück – andererseits auf eine "typisch deutsche, ingenieursgetriebene" Arbeitsweise, die relevante andere Perspektiven systematisch vernachlässige.

Übergreifend lässt sich damit festhalten, dass keiner der Befragten in der jeweils eigenen Organisation gegenwärtig gute Chancen sieht, Ideen mit hohem radikalem Potenzial in Innovationen umzusetzen. Des Weiteren wird es von der Innovationspraxis als kaum möglich angesehen, die notwendigen Weichen in der Organisation zu stellen, um zukünftig gezielt radikale Innovationen zu verfolgen.

5.3 Die Möglichkeit, radikale Innovationen entgegen externer Widerstände zu realisieren

Eine Einschätzung, die ebenfalls über die Grenzen der vier Organisationstypen hinweg von den meisten Befragten vertreten wird, ist die Annahme, dass radikale Ideen selbst dann nicht in erfolgreiche radikale Innovationen umgesetzt werden könnten, wenn sie durch Organisationen aufgegriffen und umgesetzt würden. Sie würden an unterschiedlichen organisationsexternen Anschlussproblematiken im Innovationssystem scheitern: Als größte Herausforderung werden Akzeptanzschwellen von Nutzerinnen und Nutzern benannt, die Schwierigkeit, Kundinnen und Kunden an neue Produkte und Dienstleistungen "heranzuführen" – egal ob im B2C- oder B2B-Geschäft. Es gelte, erstens Ablehnung gegen radikal neue Ansätze zu überwinden und Akzeptanz zu schaffen, zweitens Gewohnheiten abzulegen und durch neue Bedarfe zu ersetzen und dabei drittens die Werthaltungen der Menschen passgenau zu adressieren.

Die zweite Anschlussproblematik radikaler Innovationen bestehe in rechtlichen Fragestellungen beziehungsweise in der fehlenden Agilität der Gesetzgeber, auf radikale Innovationen zu reagieren. Besonders in den Bereichen Gesundheit, Finanzen und Mobilität sowie bei sozialen Innovationen, die beispielsweise die Rechte von Arbeitnehmerinnen und -nehmern berühren, sei die Politik aus Sicht der Befragten nur unzureichend in der Lage, ein Gleichgewicht herzustellen, indem staatliche Regulierungsaufträge gewährt, gleichzeitig radikale Innovationen aber nicht verhindert würden. Die Verbote von Uber und Airbnb dienen in vielen der Interviews als aktuelles Beispiel für dieses Versäumnis.

Die beiden ersten Anschlussproblematiken – Akzeptanz und rechtliche Regelungen – spiegeln sich erneut in der Herausforderung, die Interessen der für die Umsetzung von Innovationen relevanten Stakeholder des Innovationssystems zu adressieren: Gewerkschaften, Kostenträger, Vertriebspartner und viele weitere Interessenvertretungen hätten mehr Interesse daran, etablierte Zustände zu stabilisieren als radikale Veränderungen mitzutragen. Institutionen würden dabei noch größere Beharrungsstrukturen aufweisen, als Organisationen oder einzelne Personen. Bestimmte Märkte (vor allem Gesundheit, Mobilität und Energie) werden zudem als besonders konservativ eingestuft. Normen und (technologische) Standards werden als Voraussetzung jeder erfolgreichen Innovation mit hoher Eingriffstiefe gesehen, da sie beispielsweise die Passfähigkeit der Schnittstellen unterschiedlicher Systeme regeln. Gleichzeitig werden sie als vierte Anschlussproblematik benannt, da sie gänzlich neue Ansätze erschweren würden.

Beachtenswert ist die Relevanz, die unterschiedlichen externen Innovationsressourcen vonseiten der Befragten zugeschrieben wird. Als potenzielle Anschlussproblematik werden das Fehlen relevanter Infrastrukturen (bspw. Breitband-Internet in ländlichen Regionen) und finanzieller Ressourcen (bspw. Risikokapitalgeber) beschrieben. Als Hemmnis für radikale Innovationen werden hingegen weder das Fehlen qualifizierter Köpfe in der Forschung, noch der gegenwärtige Stand von Forschung und technologischer Entwicklung benannt. Erneut weist dies darauf hin, dass die Befragten in den vier untersuchten Organisationsformen die Hürde für Innovationen mit hoher Radikalität nicht bei den Prozessen der Invention oder den Ideen selbst verorten, sondern in den Möglichkeiten, radikale Ideen innerhalb von Organisationen sowie im Zusammenhang des Innovationssystems in radikale Innovationen umzusetzen. In den meisten untersuchten Organisationen fließen die erwartbaren Anschlussproblematiken als ein bedeutender Faktor in die Bewertung von Ideen mit ein. Werden Widerstände gegen zu radikale Pfadabweichungen befürchtet, werden Ideen in der Regel zurückgestellt.

6 Gegenwärtige Treiber und Strategien für radikale Innovationen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurde, gelten radikale Innovationen weder als passfähig zu den Innovationszielen, -modellen und -kulturen der untersuchten FuE-Organisationen, noch als umsetzbar im Gesamtzusammenhang des Innovationssystems. Dennoch lassen sich anhand der Interviews im Wirtschaftssektor drei Mechanismen als Treiber für das Streben von Unternehmen nach radikalen Innovationen identifizieren. Auch hier geht es darum, das Risiko für die eigene Organisation zu minimieren, verbunden mit der Angst, die bestehende Marktposition zu verlieren. Erstens antizipieren die Befragten einen Wandel im Nachfrageverhalten der Gesellschaft. Diesen Wandel führen sie auf einen Wertewandel verbunden mit der Verfügbarkeit und der Verteilung von Ressourcen zurück. So könne man heute bereits in den Branchen Mobilität und Energie absehen, dass bestehende Geschäftsmodelle nicht zukunftsfähig seien. Zweitens würden neue Technologien – insbesondere im Bereich der Digitalisierung – Druck auf das eigene Unternehmen ausüben, auch größere Pfadabweichungen zu riskieren. Die Digitalisierung erschaffe völlig neue Möglichkeiten und Märkte, in denen junge, internetaffine und internationale Zielgruppen veränderte Anforderungen an Produkte und Dienstleistungen stellten. Hier sehen die Unternehmen eine erhebliche Gefahr, von anderen Akteuren – vor allem von Start-ups – im eigenen Core-Business überholt oder gar abgelöst zu werden. Drittens gebe es immer wieder neue politische Strategien und rechtliche Vorgaben (wie beispielsweise die Energiewende), die Unternehmen auch dann zwingen, sich radikal neuen Ideen zuzuwenden, wenn damit in erster Linie keine Gewinnmaximierung verbunden ist.

Vor diesem Hintergrund haben insbesondere große Unternehmen inzwischen Strategien entwickelt, um ihre Innovationskraft durch den Einbezug neuer Wissensquellen zu erhöhen: Die primäre Innovationstrategie von Großunternehmen besteht heute in der Akquisition externer Ideen und Technologien von anderen meist kleineren Akteuren des Wirtschafts-Sektors durch Fusion oder Lizenzierung (Freeman und Engel 2007; Welsch et al. 2013; Zenger und Lazzarini 2004) oder mittels Open-Innovation- bzw. Cocreation-Ansätzen (Alam 2002; Magnusson 2003; von Hippel 2005; Prahalad und Ramaswamy 2004; Grabher et al. 2008) vonseiten der Gesellschaft. Schon seit mehreren Jahrzehnten versuchen große Unternehmen zudem, Ambidextrie zu erzielen und innovationsbezogene strukturelle Vorteile kleinerer Einheiten für sich nutzbar zu machen, indem Bereiche aus dem Unternehmen ausgelagert oder kleinere cross-funktionale Einheiten (bspw. unternehmenseigene Labs) geschaffen werden (Zenger und Lazzarini 2004; O'Reilly und Tushman 2004; Burgelman 1983; Clark und Wheelwright 1992). Die Interviewten aller untersuchten Großunternehmen beschrieben eben diese Ansätze als wichtiges Element ihrer gegenwärtigen Innovationsstrategie, um die Zukunftsfähigkeit des eigenen Unternehmens zu sichern und die Chance auf Innovationen mit hoher Radikalität zu steigern. Methodisch gilt die Verzahnung dieser Ansätze zu übergreifenden Innovationsprozessen sowie der Einbezug der Gesellschaft jedoch als schwierig. Motivation, Geheimhaltung, Zeitdruck, Zielerreichung sowie die "Übersetzung" von Ergebnissen einzelner Innovationsschritte zwischen unterschiedlichen Akteuren werden von den Befragten als weitestgehend ungelöste Probleme benannt.

Um eigene Risiken zu minimieren und fehlende Ressourcen für FuE auszugleichen, engagieren sich die untersuchten KMU häufig in Kooperationsprojekten mit Universitäten, Forschungsorganisationen und in Verbundprojekten mehrerer Unternehmen – beispielsweise mit ihren Zulieferern. Doch geben die befragten Vertreterinnen und Vertreter der KMU an, dass in öffentlich geförderten Kooperationsprojekten meist nur die eigenen Produkte weiterentwickelt würden. Radikale Inventionen würden nicht gezielt verfolgt.

Die Befragten der anwendungsorientierten Forschungseinrichtungen beobachten die Entwicklungen im wirtschaftlichen Sektor mit hohem Interesse. Sie nehmen wahr, dass heute für Unternehmen die Kooperation mit Universitäten und Forschungsorganisationen nur noch eine von zahlreichen Wissensquellen darstellt, während Open Innovation und Partneringansätze (insbesondere das "Corporate Startup Engagement") an Bedeutung gewinnen. Tatsächlich belegen die Indikatoren, dass trotz kontinuierlich steigender Ausgaben der unternehmerischen FuE in Deutschland, Auftragsforschung sowie klassische Kooperationen zwischen Unternehmen und akademischen Einrichtungen heute zunehmend an Gewicht verlieren (Schasse et al. 2014; Stifterverband 2014). Ein Zusammenhang zum nur geringen radikalen Potenzial der eigenen Forschung wird jedoch von den interviewten Institutsleiterinnen und -leitern nicht hergestellt. Während der Auf- und Ausbau von Netzwerken (bspw. Verbände, Cluster, etc.) einen wichtigen Bestandteil strategischer Überlegungen einnimmt, wird das traditionelle Rollen-

verständnis bzw. Geschäftsmodell der Forschungsorganisationen in diesen Kooperationen von den Organisationsvertreterinnen und -vertretern deutlich weniger kritisch hinterfragt als vonseiten der Befragten in den Unternehmen.

7 Fazit: Radikalität verlangt neue Geschäftsmodelle für FuE

Obwohl Ideen mit hohem radikalem Potenzial nach Aussage der Interviewten "zu Hauf in den Köpfen, Kellern und Panzerschränken" der untersuchten Organisationen lägen, werden diese Optionen systematisch ausgeschlossen. Als Ursache dafür werden Hemmnisse für Radikalität benannt, die einerseits in den grundlegenden Funktionsweisen und Zielen der einzelnen Organisationen liegen, andererseits in Anschlussproblematiken radikaler Inventionen im Innovationssystem. Die Sorge, von anderen Akteuren des Innovationssystems im dynamischen Wettbewerb mit immer schnelleren Innovationszyklen verdrängt zu werden sowie der wahrgenommene Wandel in der Funktionsweise heutiger Wissensproduktion führen jedoch auch dazu, dass neue Ansätze, die radikalere Innovationen versprechen, von allen Akteuren mit höchster Aufmerksamkeit verfolgt werden. In diesem Zusammenhang gelten jene Konzepte als vielversprechend, in denen neuartige Kollaborationen zwischen unterschiedlichen Akteuren des Innovationssystems eingegangen werden (vgl. Kapitel 6).

In der Tat erscheinen neuartige Innovationskollaborationen zwischen unterschiedlichen Akteuren des Innovationssystems als zielführender Ansatz, um zukünftig radikalere Innovationen hervorbringen zu können. Erstens können die neuen Konzepte der Wissensgenerierung im Bereich Open Innovation, User Centered Design oder unternehmensinterne Ideenwettbewerbe als Ansatz begriffen werden, neue Wissensquellen – insbesondere die Perspektive der Gesellschaft – als Innovationsressource bereits in den Prozess der Invention einzubeziehen. Dadurch können zweitens die in Kapitel 5.3 benannten Anschlussproblematiken frühzeitig mitgedacht sowie Innovationswiderstände rechtzeitig erkannt und umgangen werden. Drittens werden in Kooperationsformaten, wie Public-private-Partnerships oder Corporate Startup Engagements, die in Kapitel 5.2 beschriebenen organisationspezifischen Restriktionen für Radikalität zwischen den beiden Organisationsformen ausgeglichen: Das Start-up profitiert von den Ressourcen (finanziell, Marktzugang, internes Know-how) der großen Unternehmen, wohingegen diese Risiken unternehmensextern auslagern und von der Agilität und Innovativität der jungen Unternehmen profitieren können. Somit wird Ambidextrie nicht innerhalb von Organisationen, sondern im Zusammenwirken der Akteure des Innovationssystems erfolgreich umgesetzt.

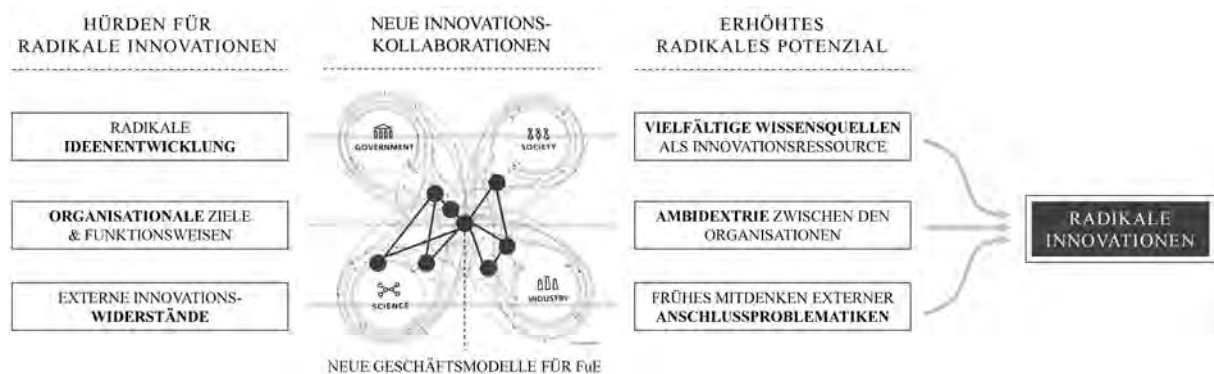


Bild 2: Die Realisierung radikaler Innovationen. Eigene Darstellung © Fraunhofer 2017

Radikale Innovationen in kollaborativen Prozessen zwischen unterschiedlichen Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik hervorzubringen, bedeutet für die beteiligten Organisationen eine Neuausrichtung der etablierten Geschäftsmodelle hinter ihren jeweiligen FuE-Aktivitäten: Das Beispiel der Corporate Startup Engagements zeigt, wie durch neue Rollen der beteiligten FuE-Organisationen ("Architektur der Wertschöpfung") und darauf abgestimmte neue Konzepte der Wertschöpfung durch FuE-Aktivitäten ("Ertragsmodell") einzelne der zuvor beschriebenen Hemmnisse für Radikalität minimiert werden können ("Nutzenversprechen").

Die empirische Befragung zeigt jedoch, dass es vielen der untersuchten Organisationen bisher schwer fällt, ihre Innovationsaktivitäten auf neue Akteurskonstellationen mit hohem radikalem Potenzial aus-

zurichten und damit eine Abkehr von den etablierten Geschäftsmodellen ihrer Forschungs- und Innovationsaktivitäten zu wagen: Vor allem die untersuchten Forschungseinrichtungen und KMU befinden sich in einer Phase des Abwartens. Zudem fällt es bisher schwer, Modelle für den Einbezug von gesellschaftlichen Stakeholdern (bspw. Patientenvereinigungen) und Akteuren aus dem Bereich Politik in FuE zu entwickeln, die erfolgreich und für alle Beteiligten gewinnbringend sind (vgl. Kapitel 6).

Dies ist einerseits zu problematisieren, da mit dem außen vor bleiben der Forschungsorganisationen ein großer Teil des finanziellen und personellen Innovationspotenzials Deutschlands keinen Eingang in Innovationsnetzwerke findet, in denen radikale Innovationen entstehen können. Zum anderen werden noch nicht alle relevanten Wissensquellen nutzbar gemacht, um frühzeitig möglichst viele gesellschaftliche, rechtliche und technologische Anschlussbedingungen mitzudenken und somit die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, radikale Ideen in radikale Innovationen transferieren zu können.

Um zukünftig die geforderten radikalen Innovationen hervorzubringen, muss deshalb ein neues organisationsübergreifendes "Geschäftsmodell für radikale FuE" – für die Zusammenarbeit aller (!) relevanten Akteure des Innovationssystems in kollaborativen Forschungs- und Innovationsaktivitäten definiert werden. Dabei muss zum einen die Frage geklärt werden, nach welchem Rollenverständnis die akademische und anwendungsorientierte Forschung, Stakeholder aus Politik und Gesellschaft sowie wirtschaftliche Akteure ihre jeweilige Innovationskraft in Netzwerke einbringen können. Zum anderen muss damit ein Ertragsmodell einhergehen, nach dem Risiken und Gewinne der Innovationsaktivitäten zwischen allen beteiligten Akteuren verteilt werden. Auf Basis dieses Geschäftsmodells für radikale FuE in neuen Akteurskonstellationen können dann die Wissensbestände aller relevanten Akteure frühzeitig einbezogen werden, um potenziellen Anschlussproblematiken bereits ab dem Ideationsprozess zu begegnen. Möglichst komplementäre Stärken der unterschiedlichen Akteure können zu Synergien gebündelt werden, um im Zusammenspiel der Organisationen auch solche Ideen mit hohem radikalem Potenzial umsetzen zu können.

Literatur (ausgewählt)

- | | |
|---------------------------|---|
| BMBF 2014 | BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF): Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland. Berlin, 2014 |
| Dolata 2009 | DOLATA, Ulrich: Technological Innovations and Sectoral Change. Transformative Capacity, Adaptability, Patterns of Change: An Analytical Framework. In: Research Policy (2009), 38 (6), S. 1066–1076 |
| Freeman und Engel 2007 | FREEMAN, John ; ENGEL, Jerome S.: Models of innovation : Startups and mature corporations. In: California management review : CMR 50 (2007), Nr. 1, S. 94–119 |
| Gläser und Laudel 2009 | GLÄSER, Jochen ; LAUDEL, Grit: Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse : Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. 3. Aufl. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009 |
| Maaß und Führmann 2012 | MAAß, Frank ; FÜHRMANN, Bettina: Innovationstätigkeit im Mittelstand : Messung und Bewertung. Bonn : Inst. für Mittelstandsforschung, 2012 |
| Méthé et al. 1997 | METHÉ, David ; SWAMINATHAN, Anand ; MITCHELL, Will ; TOYAMA, Ryoko: The underemphasized role of diversifying entrants and industry incumbents as the sources of major innovations. In: THOMAS, Howard; O'NEAL, Don; SIBAJA, Raul Alvarado (Hrsg.): Strategic discovery : Competing in new arenas. Chichester : Wiley, 1997 (Strategic management series), S. 99–116 |
| Zenger und Lazzarini 2004 | ZENGER, Todd R. ; LAZZARINI, Sergio G.: Compensating for innovation : Do small firms offer high-powered incentives that lure talent and motivate effort? In: Managerial and Decision Economics 25 (2004), Nr. 67, S. 329–345 |

Erfolgsfaktoren beim Innovieren – Fallstudien basierter adaptiver Leitfaden für die Textilindustrie

Heiko Matheis¹, Thomas Fischer¹, Meike Tilebein^{1,2},

¹DITF, Management Research, Denkendorf, Deutschland

²Institut für Diversity Studies in den Ingenieurwissenschaften (IDS), Uni Stuttgart, Deutschland

Heiko.matheis@ditf.de

Abstract: In diesem Beitrag wird ein interaktiver Leitfaden vorgestellt, der die Unternehmen der Heimtextil-Branche bei der Beschreibung, Bewertung und Bearbeitung von Entwicklungsvorhaben unterstützt und begleitet. Die Übertragbarkeit auf weitere Branchen wird durch das fallstudienbasierte Konzept sichergestellt. Ziel des Leitfadens ist es, den Entwicklungsprozess in Abhängigkeit der besonderen technischen und organisatorischen Herausforderungen der Entwicklungsvorhaben zu gestalten, um auch bei komplexen Anforderungen die Innovationsqualität zu sichern. Dabei spielt der Wissenstransfer von vergangenen erfolgreichen, aber auch erfolglosen Innovationsprojekten eine entscheidende Rolle für den Erfolg zukünftiger Innovationsvorhaben. Die ebenfalls vorgestellte Methode zur Implementierung des Leitfadens zeigt auch wie die gewonnenen Erkenntnisse und das in den jeweiligen Unternehmen entwickelte spezifische Wissen im Sinne des Wissenstransfers operativ und projektspezifisch einsetzbar gemacht werden kann.

Keywords:

Innovationsprozess, Erfolgsfaktoren, Leitfaden, Fallstudien, Story-Telling

1 Einführung

In der Innenausstattung von Wohn- und Arbeitsräumen kommt Textilien aller Art eine große Bedeutung zu. Durch Funktionalität und Design tragen sie signifikant zum Wohlbefinden und zur psychosozialen Gesundheit zuhause und am Arbeitsplatz bei. Neue Funktionen wie beispielsweise integrierte Sensorik eröffnen dabei neue Anwendungs- und Geschäftsfelder. Zu Themen wie etwa Ambient Assisted Living – der Assistenz im Bereich Wohnen speziell für ältere Menschen –, neue Gestaltungsmöglichkeiten in der (Innen-)Architektur, Förderung der Gesundheit, aber auch zu Fragestellungen der Nachhaltigkeit werden in naher Zukunft verstärkt Lösungen aus der Textilindustrie erwartet (FKT 2013). Beispielhaft sei hier die Kombination von klassischen textilen Werkstoffen mit leitfähigen Materialien zur Realisierung von Flächensensoren oder biegeschlaffen Screens genannt.

Der Innovationsbedarf in der Branche ist den agierenden Unternehmen bewusst, und häufig wird zu Beginn eines Innovationsprozesses eine Menge vielversprechender Ideen generiert. Die nachfolgende Auswahl der erfolgversprechenden Ideen und Konzepte basiert aber häufig mehr auf ad-hoc Entscheidungen als auf einer frühzeitigen, systematischen Analyse der ökonomischen, ökologischen und sozialen Faktoren und deren Übertragung auf die operative Arbeit (vgl. Stern und Jaberg 2010, S. 204). Dies gefährdet den Innovationserfolg. Ein Grund hierfür könnte die mangelnde Erfahrung bei der Kooperation mit Partnern aus anderen Branchen sein, die oft notwendig sind bei der Entwicklung neuartiger Produkte, aber jedes misslungene Innovationsvorhaben hat seine eigenen Gründe des Scheiterns. Die Konsequenz ist, dass viele Produktentwicklungen fehlschlagen, meist nachdem bereits viel Geld investiert worden ist (F&E-Aufwendungen der Wirtschaft in Deutschland 2014: ca. 57 Mrd. €; www.stifterverband.org/forschung-und-entwicklung/).

Der hier vorgestellte fallstudienbasierte Leitfaden und die entwickelte Methode zur Einführung bietet Unternehmen daher die Möglichkeit der projektspezifischen Gestaltung von Innovationsprozessen und unterstützt darüber hinaus das operative Management eines Entwicklungsprojekts entlang des

Prozesses. Zur Verdeutlichung dieser Thematik gliedert sich der vorliegende Beitrag wie folgt. In Kapitel 2 wird auf die Problemstellung im Allgemeinen und ihre Branchenausprägung im Speziellen eingegangen. Der entwickelte interaktive Leitfaden wird anschließend in Kapitel 3 von der Konzeption über die branchenspezifische Umsetzung vorgestellt und anhand von Fallbeispielen erläutert. In Kapitel 4 wird die Methode zur Einführung des Leitfadens und zur Übertragung auf weitere Branchen kurz vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung.

2 Problemstellung

Die Wissenschaft beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit der Erschließung des Forschungsfelds Innovationsmanagement unter Betrachtung der verschiedensten Aspekte wie beispielsweise die Gestaltung von Innovationsprozessen (Hauschildt und Salomo 2011; Vahs und Burmester 2005; Verworn und Herstatt 2007, Lindemann 2007), die Bewertung von Ideen (Granig 2007; Cooper et al. 2001; Vahs und Brem 2013) oder auch die Identifikation von Erfolgsfaktoren (Stern und Jaberg 2010; Ernst 2002; Wohlfeil und Terzidis 2014). Trotz umfassender Erkenntnisse sind viele der entwickelten Lösungen vornehmlich für größere Unternehmen umsetzbar. Insbesondere für die hier betrachteten kleinen und mittleren Unternehmen der Textil-Branche sind diese Ansätze nur bedingt relevant.

Auch der Wandel von designgetriebenen hin zu vermehrt funktionsgetriebenen Entwicklungen mit Partnern aus anderen Branchen stellt die Unternehmen vor neue Herausforderungen bei der Gestaltung ihrer Innovationsprozesse und der anschließenden operativen Bearbeitung der jeweiligen Entwicklungsprojekte. Die für die Prozess- und Projektgestaltung wichtige Kategorisierung der angestrebten Innovation ist zwar in der Literatur weit verbreitet, die häufig jedoch zu allgemeinen Kategorien decken den Bedarf der Unternehmen nur unzureichend ab (Zaltman et al. 1973; Andreasen et al. 1987; Haller 1996, Burgelman et al. 1996; Afuah 1998; Boutellier et al. 1999; Fischer 2007).

Speziell die Entwicklung neuer Funktionen und Strukturen stellt neue Anforderungen an den Innovationsprozess. Lag der Prozessschwerpunkt bei designgetriebenen Innovationen noch auf der Entwicklung der textilen Konstruktion (Bindung) und der damit verbundenen Optimierung der Produktionsparameter, erfordern funktionsgetriebene Innovationen auch die Verwendung neuer Materialien und neuer Technologien. Vor diesem Hintergrund spielen die Dokumentation und die Berücksichtigung von Erfahrungswissen aus der Projekthistorie wichtige Rollen, um die Erfolgsaussichten für diese Innovationen zu erhöhen (Amtoft 1994; Anbari et al. 2008). Auch die Erfolgsaussichten in Abhängigkeit der Kategorisierung der Projekte werden höchstens allgemein betrachtet. Branchenspezifische Studien zur Analyse von Erfolgsfaktoren fehlen im betrachteten Sektor.

Des Weiteren unterstützt aktuell verfügbare Software zwar die Innovationsprozesse von der Ideenfindung bis zum Entwicklungsprojekt, geht dabei aber nicht auf die Besonderheiten der Branche ein und ist nicht in der Lage, Erfahrungswissen aus der Branche oder gar aus dem Unternehmen zur Entscheidungsunterstützung einzubinden. Diese Art der Unterstützung fehlt vielen Unternehmen nicht nur in der Initialphase von Innovationsprojekten, sondern entlang des gesamten Entwicklungsprozesses.

Zur Lösung der zuvor beschriebenen Situation in vielen Unternehmen werden also Werkzeuge und Methoden benötigt, die den Unternehmen situations- und projektspezifische Entscheidungshilfen bieten, um die Auswahlentscheidung für die jeweiligen Innovationsprojekte anhand ihrer Erfolgsaussichten systematisch zu unterstützen und die Bearbeitung durch die Gestaltung individueller Innovationsprozesse unter Berücksichtigung früherer Erfahrungen effektiver und effizienter zu gestalten.

3 Interaktiver Leitfaden

Das folgende Kapitel beschreibt die Konzeption des interaktiven Leitfadens auf Basis des zuvor identifizierten Lösungsansatzes und die exemplarische Umsetzung des Konzepts für die Heimtextil-Branche. Mit zwei Fallstudien, welche die Empfehlungen des interaktiven Leitfadens auf Basis der jeweiligen Projektsituation demonstrieren, schließt das Kapitel ab.

3.1 Konzeption des Leitfadens

Die Kernforderung für den interaktiven Leitfaden liegt gemäß der zuvor dargelegten Problemstellung bei der Unterstützung der operativen Umsetzung von Entwicklungsprojekten von einer Idee bis hin zur Innovation, er soll dabei Entscheidungshilfe in Form von Hinweisen und methodischer Hilfe bieten. Dabei setzt das Konzept auf den Einsatz eines semantischen Modells zur Beschreibung und Kategorisierung von Entwicklungsprojekten. Der so aufgespannte Innovationsraum stellt das Grundgerüst für die Empfehlungen des Leitfadens dar und kombiniert allgemeine Beschreibungselemente von Innovationen wie bei Fischer (2006, S 23-31) und Hauschildt und Salomo (2011, S. 5) beschrieben mit branchenspezifischen Erweiterungen.

Die branchenspezifischen Erweiterungen basieren auf der Analyse mehrerer Fallstudien aus der jeweiligen Branche, um das generalisierbare Wissen der Branche zu identifizieren. Darüber hinaus bilden die betrachteten Fallstudien die Grundlage zur Entwicklung der Empfehlungen des Leitfadens. Die durchgeführte Fallstudienanalyse zeigt typische Entwicklungsprozesse und Prozessschritte der Branche sowie unterschiedliche Ansätze zur Organisation von Entwicklungsprojekten. Die Kombination des Wissens aus den Fallstudien mit bekannten Ansätzen aus der Literatur (Hauschildt und Salomo 2011; Vahs und Burmester 2005; Verworn und Herstatt 2007) ermöglicht die Beschreibung branchenspezifischer Prozessschritte. Die Basis für die Bewertung dieser Prozessschritte bildet die Identifikation der Erfolgs- bzw. Misserfolgskriterien der jeweiligen Fallstudien wie bei Lehmann (2015) ausgeführt. Dabei stehen vor allem die Fragen im Vordergrund, „Welche Prozessschritte hätten Misserfolg verhindern können?“ bzw. „Welche Prozessschritte haben signifikant zum Erfolg beigetragen?“

Das Konzept des Leitfadens sieht weiterhin vor, die Datenbasis für die Entscheidungsunterstützung durch die Analyse und Bewertung zukünftiger Projekte kontinuierlich zu erweitern. Somit unterstützen abgeschlossene Projekte und ihre Bewertung zukünftig die Auswahl der Prozessschritte und der Projekte selbst. Hierbei steht nicht alleine die Idee im Mittelpunkt, sondern auch die Erwartung den Innovationserfolg durch die effektive und effiziente Bearbeitung des Projekts zu erreichen. Zur Bewertung einer Idee als solche können dabei Methoden, wie von Messerle (2016) beschrieben, eingesetzt werden. Bei der hier entwickelten Methode zur Projektauswahl spielen die Erfolgsfaktoren eine Rolle, die vom Unternehmen bzw. Konsortium in der Vergangenheit durch die geeignete Gestaltung des Prozesses erfolgreich adressiert wurden.

Neben der Berücksichtigung der Fallstudien in der Wissensbasis zur Entscheidungsunterstützung, dienen im Leitfaden exemplarische gesondert aufbereitete Entwicklungsprojekte als Blaupause für Best- bzw. Worst-Practice Berichte. Diese dienen im Sinne des Story-Tellings der Intensivierung der Wissensvermittlung. Das entwickelte Konzept setzt bei der Entscheidungsunterstützung auf eine Kombination aus fallbasiertem Schließen (Suche nach ähnlichen Situationen) und Story-Telling, um Empfehlungen zu bestimmen und zu begründen. Somit tragen der konsequente Einsatz des interaktiven Leitfadens sowie die abschließende Bewertung der Projekte auch zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Empfehlungen bei, da diese auch auf den erfolgreichen Entscheidungen der Vergangenheit beruhen. Dadurch steht den Unternehmen mit der Zeit ein individueller Leitfaden zur Verfügung, welcher Wissen im eigenen Unternehmen erfasst, bewahrt und nutzt und die Erfolgchancen von Innovationsprojekten signifikant verbessern kann.

3.2 Umsetzung für Branche Heimtextil

Die Umsetzung des oben beschriebenen Konzepts beruht auf der Analyse von 30 Fallstudien der Zielbranche. Die hierzu benötigten Informationen zu abgeschlossenen Innovationsprojekten wurden durch leitfadengestützte Interviews zusammengetragen. Der eingesetzte Leitfaden besteht aus W-Fragen mit offenen Antworten und deckt sowohl die Bereiche der Entscheidungsfindung vor dem Projekt und des Projektverlaufs als auch eine Bewertung der Projektergebnisse ab (siehe Kapitel 4). Dabei wurden stets mehrere am Projekt beteiligte Personen unabhängig voneinander befragt. In Anlehnung an gängige Methoden aus der Voice of Customer-Forschung wurde das Detailverständnis zu den Projekten durch gezielte Nachfragen vertieft (Griffin und Hauser 1993). Die untersuchten Fallstudien umfassen erfolgreiche sowie nicht erfolgreiche Projekte der letzten Jahre.

Die weitere Analyse der Fallstudien erfolgte durch die Transkription der Interviewergebnisse, die ausschnittsweise in Bild 1 dargestellt ist. Die aufbereiteten Ergebnisse fassen die Aussagen der befragten Personen thematisch zusammen und werden durch Kommentare erfahrener Innovationsmanager hinsichtlich der relevanten Erfolgsfaktoren ergänzt.

<p>Kommentar: Zeitnahe Umsetzung aufgrund von ausreichenden Ressourcen als Erfolgsfaktor</p>	<p>Nach dem Projekt – Allgemeine Auswertung</p> <p>„Das Projekt war erfolgreich, weil es im Markt gut aufgenommen worden ist und letztendlich den Designaward gewonnen hat. Die zeitnahe Umsetzung war ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Wenn ein Trend auf dem Markt ist, muss man sein Produkt noch zur richtigen Zeit in den Markt einführen können. Des Weiteren war für dieses Produkt ein unvergleichbares Design ausschlaggebend, welches in diesem Maß noch nicht auf dem Markt vorhanden war.“</p> <p>Der Projektleiter sagt: „Das Projekt war mit einem ausreichenden Kapital und einer ausreichenden Dringlichkeit ausgestattet.“</p> <p>Der Atelierleiter sagt: „Das größte Hindernis im Verlauf des Projektes waren die Ausrüstungsversuche. Diese waren notwendig um die Gewebeoptik einwandfrei hinzubekommen. Problematisch war hierbei die Übertragung der formgebenden Ausrüstung vom Labormaßstab in die Produktionsbreite.“</p>
<p>Kommentar: Alleinstellungsmerkmal brachte eine relative Vorteilhaftigkeit als weiteren Erfolgsfaktor hervor</p>	<p>Nach dem Projekt – Marktreaktion</p> <p>Der Atelierleiter sagt: „Die Marktreaktion war sehr positiv. Das Produkt war sehr zeitgemäß und dadurch leicht verständlich. Es ist durchaus ein Produkt das als schön anerkannt wird. Dadurch, dass es so noch nicht auf dem Markt vorhanden war, kennzeichnet unser Produkt ein Alleinstellungsmerkmal. Jedoch ist es durchaus kein Massenprodukt.“</p> <p>Der Projektleiter sagt: „Die Reaktion der Mitarbeiter im Unternehmen spiegelte sich auch im Verhalten der Kunden im Markt. Entsprechend war das Motto: „Es passt nicht zu meinem Sortiment, aber es ist toll.““</p>

Bild 1: Aufbereitung der Interviews mit Experten-Kommentaren.

Die von den Experten herangezogenen Erfolgsfaktoren werden in der Literatur vier verschiedenen Gruppen zugeteilt, welche das Unternehmen oder deren Umfeld charakterisieren (Vahs und Brem 2013; Wohlfeil und Terzidis 2014). So lassen sich laut Wohlfeil und Terzidis (2014, S. 3) die Einflussgrößen des Entwicklungsprozesses auf unternehmensexterne (Umfeld), unternehmensinterne (Unternehmen) und innovationsspezifische (Technologie) Elemente wie in Bild 2 dargestellt aufteilen. In der Literatur werden in verschiedenen empirischen Untersuchungen allgemeine Faktoren identifiziert, die zum Erfolg von Innovationsprojekten beitragen können bzw. deren Nichtbeachtung als Ursache für Misserfolg identifiziert wurde. So werden dort die Fähigkeit zur Kooperation sowie die Kenntnis des Marktes und der Wettbewerber als externe Einflussfaktoren auf den Innovationserfolg identifiziert (Vahs und Burmester 2005; Vahs und Brem 2013; Kleinschmidt et al. 1996).

Zu den in der Literatur identifizierten internen Einflussfaktoren zählen die Existenz und die Kommunikation einer Unternehmens- bzw. Innovationsstrategie ebenso wie die Fähigkeit der Unternehmen, sich flexibel und schnell auf sich verändernde Rahmenbedingungen einstellen zu können. Ebenso kann sich auch eine motivierende und fördernde Unternehmenskultur positiv auf den Erfolg auswirken, da sie zum einen dazu beiträgt die Kommunikation innerhalb und zwischen den Projekten zu verbessern und zum anderen sicherstellt, dass das Management die Projekte mit entsprechenden Ressourcen ausstattet (Stern und Jaberg 2010; Ernst 2002; Bürgin 2007; Vahs und Brem 2013). Das Schutzpotential, die relative Vorteilhaftigkeit und der technologische Reifegrad der Innovation werden in der Literatur als innovationsspezifische Einflussfaktoren geführt (Wohlfeil und Terzidis 2014; Cooper 2010; Vahs und Brem 2013). Als entscheidende Einflussfaktoren mit einem direkten Prozessbezug werden die Projekt- und Produktdefinition zu Beginn des Projekts, die daran anschließende Projektauswahl, die Gestaltung eines effektiven und effizienten Innovationsprozesses und ein systematisches Projektmanagement genannt. Neben der Entwicklung als solche tragen auch das Marketing und das Timing der Markteinführung signifikant zum Erfolg einer Innovation bei (Stern und Jaberg 2010; Kleinschmidt et al. 1996; Cooper 2010; Goffin et al. 2012).

Die Analyse der 30 untersuchten Fallstudien hinsichtlich der dort maßgeblichen Erfolgsfaktoren führt, wie in Lehmann (2015) beschrieben, zu einer für die Zielbranche reduzierten Anzahl an Erfolgsfaktoren (vgl. Bild 2).

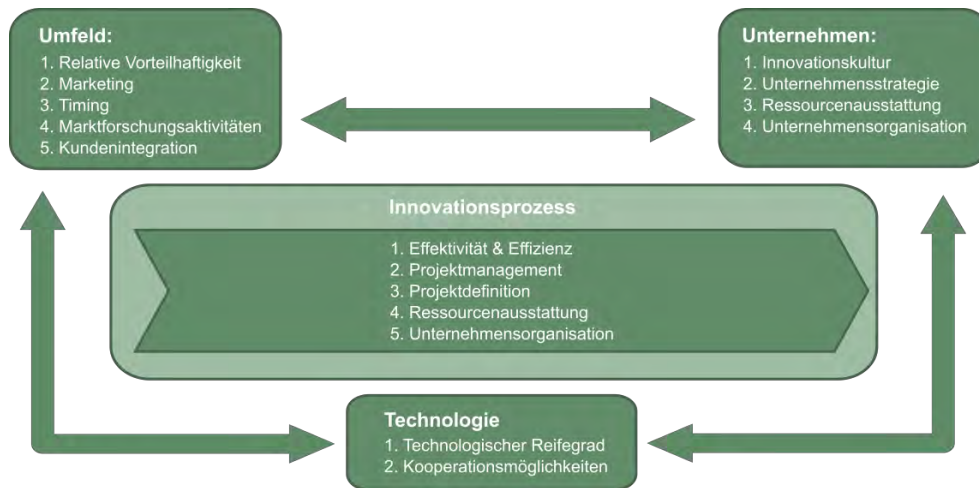


Bild 2: Erfolgsfaktoren für die Branche Heimtextil (in Anlehnung an Wohlfeil und Terzidis 2014, S.3)

Durch die weiterführende empirische Analyse der untersuchten Fallstudien hinsichtlich der charakteristischen Merkmale der jeweiligen Projekte lassen sich zusätzlich zu den von Fischer (2006) erarbeiteten, allgemeinen Dimensionen zur Beschreibung der Projekte noch zusätzliche branchenspezifische Dimensionen und Ausprägungen des Innovationsraums identifizieren. Daraus ergibt sich die folgende Struktur des branchenspezifischen Innovationsraums zur Beschreibung der Projekte:

- Innovator (*KMU, Großunternehmen, Forschungseinrichtung/ Universität*)
- Innovationsgegenstand (*Produkt; Organisation; Prozess; Service*)
- Innovationsnutzen (*Verbesserte Funktionalität; neue Funktionalität; Kosteneinsparung; Image; Verwendbarkeit; neuer Zielmarkt; Verbesserungen für die Umwelt; Einhaltung von Normen / Gesetzgebung*)
- Neuigkeit der Innovation (*weltweit neu; neu in Sektor; neu in Marktnische; neu im Unternehmen*)
- Innovationsauslöser (*Technologie-Push; Markt-Pull; unabhängig*)
- Innovationsintensität (*inkrementell; signifikant; radikal*)
- Innovationsauswirkung (*autonom; systemisch / Partner der Wertschöpfungsketten*)
- Innovationsfrequenz (*kontinuierlich; periodisch; singulär*)
- Intensität erforderlicher Ressourcen (*leicht zu implementieren; kleinere Investitionen; große Investitionen*)
- Kundentyp (*DIY-Kunde, Großhandel, Handwerk, Business (B2B)*)
- Einbeziehung von Partnern (*interne Entwicklung, externe Idee, externe Konzeptentwicklung, externe Prototypenentwicklung, externe Tests, externe Anbieter von Technologien*)
- Schutzpotenzial (*gering, mittel, hoch*)

Der branchenspezifische Innovationsraum für Innovationsprojekte der textilen Innenraumgestaltung unterstützt die Nutzer des interaktiven Leitfadens bei einer objektiven Beschreibung neuer Innovationsvorhaben. Zusätzlich trägt diese Beschreibung dazu bei, einen spezifischen Innovationsprozess für das jeweilige Vorhaben zu gestalten und die relevanten Erfolgsfaktoren zu adressieren. Die Empfehlungen hinsichtlich der Prozessgestaltung erhalten durch repräsentative Stories einen Bezug zur Praxis (vgl. Bild 3). Darüber hinaus unterstützen die Stories auch den Wissenstransfer und den Erfahrungsaustausch von vergangenen zu zukünftigen Projekten.


3.3 Fallbeispiele

Dieser Abschnitt beschreibt ein Fallbeispiel, das zeigt, wie die gesammelten Erfahrungen in einem Projekt für den Einsatz im interaktiven Leitfaden aufbereitet wurden und somit zukünftige Entscheidungen unterstützen können. Er zeigt auch, wie der entwickelte interaktive Leitfaden diese Informationen zur Unterstützung des operativen Projektmanagements einsetzt.

Das hier vorgestellte Fallbeispiel beschreibt die Entwicklung eines neuen Designs für Dekorationsstoffe. Hierbei galt die Zielsetzung, nicht neue Muster und Farben der Saison umzusetzen, sondern eine Konstruktion und ein Design zu entwickeln, um dreidimensionale Strukturen zu gestalten und gleichzeitig die bekannte traditionelle zweidimensionale Webtechnologie einzusetzen. Die Vorgabe, eine radikal neue Gewebekonstruktion zu entwickeln, die jedoch keine neue Prozessgestaltung auf maschinellem Niveau nach sich zieht, trägt zur Reduktion des Risikos durch die Minimierung von Investitionen bei. Dennoch wurde eigens für dieses Entwicklungsprojekt die personelle Kapazität der Design- und Entwicklungsabteilung um zusätzliches Personal aufgestockt. Dieses konnte frei vom Alltagsgeschäft neue kreative Ideen wie die Nachbildung der japanischen Faltkunst ‚Origami‘ auf textilen Flächen ausarbeiten. Dieser innovative Ansatz und die damit verbundene technologische Herausforderung sorgten ihrerseits bei dem Projektteam, bestehend aus Design und Produktion, für einen so starken Impuls, dass die Entwicklung durch die intensive Kollaboration in sechs Monaten abgeschlossen wurde. Speziell die Entscheidung, dem Projektteam mehr Freiräume und die Unterstützung des Managements für dieses Entwicklungsvorhaben zuzusichern, stellte sich als Kern-Erfolgsfaktor für dieses Projekt heraus.

Das innovative und moderne Erscheinungsbild der entwickelten Textilkonstruktion verschaffte dem Unternehmen einen Vorsprung gegenüber seinen Mitbewerbern. Darüber hinaus wurde die Entwicklung mit einem Design-Award ausgezeichnet, wodurch die Innovationskraft des Unternehmens auch über den bisherigen Kundenstamm hinaus bekannt wurde. Auch die im Anschluss an das Projekt entwickelten Produktkollektionen trugen zum wirtschaftlichen Erfolg bei, wengleich der Haupt-Erfolg durch das Innovationsvorhaben im Imagewandel von einer traditionellen zu einer modernen Heimtextilweberei besteht.

Erfahrungsberichte wie zu dem hier vorgestellten Innovationsvorhaben tragen beim interaktiven Leitfaden zur Vermittlung von Erfahrungswissen und zur Verdeutlichung der Empfehlungen bei. Dafür wurden sie, wie in Bild 3 in der englischen Version dargestellt, in einer einheitlichen Struktur zu ansprechenden Geschichten im Sinne des Story-Telling aufbereitet.

Resources – Positive





<p>Once upon a time there was a traditional weaving company, which produced upholstery and decorative fabrics for the home area. The field of competence of this company was located in the traditional technology of jacquard. They always engineered product innovations, which are divided in classical developments (new designs, new quality and materials) and technological developments (new added features).</p> <p>This effort is conducted to meet the expectations of their customers, because they always want to be entertained and get to see something new. Otherwise the company would be forced out of the market.</p>	<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center; margin-right: 10px;">  <p style="font-size: 2em; font-weight: bold; margin: 0;">R</p> </div> <div style="font-size: 0.8em;"> <p>The company recruited a new employee, who had just finished his education, was motivated and ready to look over the plate. As a result, he was not overloaded with the events of the day and had time to deal with creative ideas.</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: flex-start; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center; margin-right: 10px;">  <p style="font-size: 2em; font-weight: bold; margin: 0;">A</p> </div> <div style="font-size: 0.8em;"> <p>The product idea came from the Japanese origami, while the realized appearance of the fabric should convince the costumers by its uniqueness and modernity.</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: flex-start; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center; margin-right: 10px;">  <p style="font-size: 2em; font-weight: bold; margin: 0;">EE</p> </div> <div style="font-size: 0.8em;"> <p>The whole team, design and manufacturing, worked together and realized the innovation in 6 months with a strong momentum.</p> </div> </div> <p style="font-size: 0.8em; margin-top: 10px;">The brand new design was crucial for this innovation. It was honored with the design award, whereby this innovation became famous and got fans. But few were willing to purchase it although it has found many favors.</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-top: 10px;">Instead of the commercial success, this innovation had other benefits for the company. It was successfully, because it drew attention to the traditional company and took another – much more modern – company image to the outside. With the increased awareness, further customers took notice of the company and bought its products.</p>	<p style="font-size: 0.8em;">It was a stroke of luck that a new employee came into the company and had time and scope for innovation at that time...</p> <p style="font-size: 0.8em;">And they developed happily ever after.</p> <p style="text-align: right; font-size: 0.8em;">– The End –</p>
--	--	--

Bild 3: Ausgearbeitete Story einer Fallstudie zu dem Erfolgsfaktor „Ressourcenausstattung“. (Screenshot aus Projekt)

Die Beschreibung eines zum oben vorgestellten Fallbeispiel vergleichbaren Innovationsvorhabens mit den Eigenschaften Innovator (*KMU*), Innovationsgegenstand (*Produkt*), Innovationsnutzen (*Image; Verbesserungen für die Umwelt*), Neuigkeit der Innovation (*neu in Sektor*), Intensität erforderlicher Ressourcen (*leicht zu implementieren*) und Schutzpotenzial (*gering*) führt im Vergleich mit den dokumentierten Fallstudien zu der Empfehlung des in Bild 4 dargestellten Innovationsprozesses. Durch die individuelle Adaption des Innovationsprozesses bietet der interaktive Leitfaden Unterstützung beim operativen Projektmanagement des Innovationsvorhabens. Hierbei sind das Projektmanagement-Cockpit und die ergänzenden Information zu den Prozessaktivitäten besonders

hervorzuheben. Das Projektmanagement-Cockpit visualisiert den aktuellen Stand des Innovationsvorhabens durch eine farbcodierte Darstellung des Innovationsprozesses und aggregiert dabei die Statusinformationen („offen“, „in Bearbeitung“, „abgeschlossen“) der einzelnen Prozessaktivitäten (vgl. Bild 4). Die aus dem Projektmanagement-Cockpit zugängliche Beschreibung der Prozessaktivitäten enthält darüber hinaus hilfreiche Informationen zur Bearbeitung, einschlägige Erfahrungsberichte und Empfehlungen für einsetzbare Methoden. Diese Kombination aus Unterstützung beim operativen Projektmanagement und weiterführenden Informationen erleichtert auch unerfahreneren Unternehmen die Umsetzung komplexerer Innovationsvorhaben.

	Creation of Ideas	Concept development	Prototyping	Sampling	Production and Marketing
Planning	Innovation culture	Project planning (Concept)	Project planning (Prototype)	Project planning (Sample)	Planning of market introduction and marketing
	Innovation strategy and objectives				
	Identification of opportunities				
Execution	Idea generation	Concept elaboration	Prototype elaboration	Sourcing for sampling	Market Introduction
		Functional description	Prototype test (α-Test)	Production of samples	
		Tech. feasibility		Sample test (β-Test)	
		Market study			
Control	Screening and first evaluation	Launch prototyping	Market-oriented evaluation	Launch production	
	Evaluation of IPR situation		Launch sampling		
	Recommendation of project				

Bild 4: Projektmanagement Cockpit auf Basis des individuell adaptierten Prozesses. (Screenshot aus Projekt)

4 Methode zur Einführung

Der entwickelte fallstudienbasierte adaptive Leitfaden bietet in der hier vorgestellten Form Unterstützung beim operativen Management von Entwicklungsvorhaben der Heimtextil-Branche und angrenzender Industrien. Dennoch kann das zugrundeliegende Konzept generalisiert und auf weitere Branchen übertragen werden. Hierzu wurde parallel zur in Kapitel 3.2 beschriebenen Umsetzung eine Methode entwickelt, die weitestgehend dem dort vorgestellten Vorgehen entspricht und nachfolgend beschrieben wird.

4.1 Grundidee

Die beiden Grundpfeiler der entwickelten Methode sind die Identifikation von Erfolgsfaktoren, die dabei helfen den Erfolg von Innovationsvorhaben zu bewerten, und die Entwicklung einer gemeinsamen Beschreibungssprache, um die Vergleichbarkeit von Vorhaben zu gewährleisten. Wie Hauschildt und Salomo (2011, S. 4) bereits festgestellt haben, hängen die Erfolgsfaktoren immer vom Gegenstand der Innovation ab. Auch die von Hauschildt und Salomo (2011, S. 5) genannten allgemeinen Dimensionen zur Beschreibung von Innovation sind nicht universell für alle Branchen anwendbar. Die hier vorgestellte Methode unterstützt bei der branchenspezifischen Adaption der Erfolgsfaktoren und des Innovationsraums.

Zur Identifikation der branchespezifischen Adaptionen sieht die Methode eine Kombination aus einem literaturbasierten Top-Down- und einem fallstudienbasierten Bottom-Up-Ansatz vor. Damit sollen alle relevanten Erfolgsfaktoren aus den von Wohlfeil und Terzidis (2014) beschriebenen Einflussbereichen Umfeld, Unternehmen, Technologie und Innovationsprozess sowie zusätzliche Charakteristika der Innovationen bzw. deren Ausprägung identifiziert werden. Hierfür sieht die Methode die Analyse von Fallstudien vor, die vergangene erfolgreiche und nicht erfolgreiche Projekte aus mehreren Unternehmen umfassen, um einen repräsentativen Überblick über die jeweilige Branche zu erhalten (Eisenhardt 1998). Entscheidend für die Adaption der Erfolgsfaktoren und des Innovationsraums ist jedoch immer die Übertragbarkeit auf die Strukturen und Prozesse der jeweiligen Zielbranche.

4.2 Beschreibung der Fallstudien durch leitfadengestützte Interviews

Die hier vorgestellte Methode nutzt leitfadengestützte Interviews zur Erfassung der Fallstudien. Dabei setzt der entwickelte Leitfaden auf W-Fragen mit offenen Antworten und gezielten Nachfragen. Diese sollen der fragenden Person helfen, ein Verständnis für die jeweilige Problemstellung, aber auch die gesamte Branche zu entwickeln und Einsichten zu Erfolg und Misserfolg der untersuchten Innovationsvorhaben zu gewinnen. Für den aus den Fallstudien abzuleitenden Lernprozess spielt auch die Betrachtung verschiedener Perspektiven eine signifikante Rolle, weshalb die Methode sowohl Einzelinterviews mit verschiedenen Fachbereichen als auch Gruppeninterviews vorsieht.

Das Grundgerüst des Interviewleitfadens besteht aus den nachfolgend aufgeführten Fragen:

- Wie startete das Projekt wirklich?
- Wer oder Was war die treibende Kraft hinter dem Projekt?
- Welche unerwarteten Ereignisse traten im Laufe des Projekts ein?
- Welche Ereignisse führten zu signifikanten Anpassungen an der Idee bzw. am Projekt?
- Wie war die Zusammensetzung des Teams? (fachlich und kognitiv)
- Wie war die Stimmung im Team im Laufe des Projekts? (Motivation, Zuversicht, ...)
- Was sollte beim nächsten Projekt anders erledigt werden?

Zur vollständigen Beschreibung der Fallstudien werden die durchgeführten und aufgezeichneten Interviews zu jedem Projekt gemeinsam in der in Bild 1 dargestellten Form transkribiert und aufbereitet.

4.3 Analyse der Fallstudien zur Adaption des Innovationsraums und der Erfolgsfaktoren

Im zweiten Schritt der Methode werden die Fallstudien durch Innovationsexperten kommentiert, um Erfolgsfaktoren und Besonderheiten der Projekte zu identifizieren. Hierbei spielt auch die Identifikation von beschreibenden Strukturen der jeweiligen Branche eine signifikante Rolle. Anhand dieser Strukturen zu Prozess, Projektgestaltung und Innovationsgegenstand ist es Branchenexperten möglich den Innovationsraum durch zusätzliche Dimensionen oder zusätzliche Ausprägungen allgemeiner Dimensionen an die Branche zu adaptieren.

Die Relevanz der in den Fallstudien identifizierten Erfolgs- bzw. Misserfolgskriterien und der aus der Literatur bekannten Erfolgsfaktoren für Innovationsvorhaben der betrachteten Branche lässt sich über eine statistische Faktoranalyse mithilfe einer multiplen Regressionsanalyse bestimmen (Lehmann 2015).

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein fallstudienbasierter Leitfaden vorgestellt, der Unternehmen einer Branche dabei unterstützt, ihre Innovationsvorhaben besser zu managen und häufiger zum Erfolg zu führen. Er wurde für die Branche der Heimtextilien entwickelt, die sich momentan aufgrund vieler neuer technischer Möglichkeiten zu einem Innovationsmotor für die funktionsintegrierte Gestaltung von Wohn- und Arbeitswelten wandelt. Der Leitfaden basiert auf der Erkenntnis, dass sowohl allgemeine Erfolgsfaktoren wie auch branchenspezifische Erfahrungen zur Entscheidungsunterstützung im Innovationsprozess herangezogen werden sollten. Deswegen wurde zunächst eine branchenspezifische semantische Modellierung zur Beschreibung des Innovationsgeschehens entwickelt. Sie bildet die Basis für den IT-gestützten Leitfaden, der den Unternehmen auf Basis des aktuellen Projektes und des momentanen Standes im Projekt die nächsten sinnvollen Schritte und Aktivitäten vorschlägt.

Neben den allgemeinen Erfolgsfaktoren wurden über 30 Innovationsvorhaben, sowohl erfolgreiche als auch erfolglose, aus der Branche in strukturierten Interviews erfasst und ausgewertet. Die daraus abgeleiteten spezifischen Erfolgsfaktoren ergänzen den Leitfaden um dieses wertvolle, branchenspezifische Erfahrungswissen. Die Fallstudien aus den Interviews dienen darüber hinaus auch der anschaulichen Vermittlung und Weitergabe von Wissen in Form von Geschichten nach der

Methode des Story-Telling. Der Leitfaden lernt nach der Implementierung im Unternehmen mit jedem neuen, dokumentierten Innovationsprojekt mit.

Der Leitfaden in der aktuellen Form ermöglicht die Berücksichtigung der theoretischen Erkenntnisse zu Erfolgsfaktoren in der operativen Bearbeitung von Innovationsvorhaben und lässt sich direkt auf weitere Bereiche der Textil- aber auch der Möbelindustrie übertragen. Durch die bei der Entwicklung eingesetzte Methode ist es jedoch möglich einen vergleichbaren Leitfaden auch für weitere Branchen und Industriezweige zu entwickeln.

Danksagung

Das CorNet-Vorhaben 116 EN „Verbesserung der Qualität von Innovationsprojekten im Bereich textiler Innenraumgestaltung“ der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Berlin, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der flämische Part des Projekts wurde von Flanders In Shape unterstützt und über das IWT finanziert (Projektnummer IWT130956).

Literatur

- Afuah 1998 AFUAH, A.: Innovation Management, Oxford University Press, 1998
- Amtoft 1994 AMTOFT, Mette: *Storytelling as a support tool for project management*. In: International Journal of Project Management Bd. 12 (1994), Nr. 4, S. 230–233.
- Anbari et al. 2008 ANBARI, Frank T. ; CARAYANNIS, Elias G. ; VOETSCH, Robert James: *Post-project reviews as a key project management competence*. In: Technovation Bd. 28 (2008), Nr. 10, S. 633–643.
- Andreasen und Hein 1987 ANDREASEN, M.M.; HEIN, L.: Integrated Product Development, Springer, 1987
- Boutellier et al. 1999 BOUTELLIER, R.; GASSMANN, O.; v. ZEDTWITZ, M.: Managing Global Innovation, Springer, 1999
- Burgelman et al. 1996 BURGELMAN, R.A.; MAIDIQUE, M.A., WHEELWRIGHT, S.C.: Strategic Management of Technology and Innovation, Irwin, Chicago, 1996
- Bürgin 2007 BÜRGIN, Christian: *Reifegradmodell zur Kontrolle des Innovationssystems von Unternehmen*. Zürich : Dissertation, ETH Zürich, 2007.
- Cooper 2010 COOPER, Robert: *Top oder Flop in der Produktentwicklung: Erfolgsstrategien: Von der Idee zum Launch*. 2. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010.
- Cooper et al. 2001 COOPER, R.; EDGETT, S.; KLEINSCHMIDT, E.: *Portfolio management for new product development: results of an industry practices study*, R&D Management, Bd. 31, Nr. 4, S. 361 – 380, 2001
- Eisenhardt 1998 EISENHARDT, Kathleen M.: *Building Theories from Case Study Research*. In: The Academy of Management Review 14 (1989), Nr. 4, S. 532–550.
- Ernst 2002 ERNST, Holger: *Success Factors of New Product Development: A Review of the Empirical Literature*. International Journal of Management Reviews. 1, 2002, Bd. 4, S. 1-40.
- Fischer 2006 FISCHER, Thomas V.: *Koordination der kooperativen Produktentwicklung in Wertschöpfungsketten : ein kybernetischer Ansatz für virtuelle Integration*. Dissertation. Stuttgart. 2006
- Fischer 2007 FISCHER, Thomas V.: *WebTEXpert - a Learning Platform for Integrative Innovation Management, Multidisciplinary Research on New Methods for Learning and Innovation in Enterprise Networks*, 2007

Zukunftsorientierte Konsolidierung von Produktportfolios

M.Sc. Christian Dülme, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, M.Sc. Lisa Hannes

Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn, Deutschland

christian.duelme@hni.upb.de

juergen.gausemeier@hni.upb.de

lias.hannes@hni.upb.de

Abstract: Unternehmen sind mit einem Anstieg der Anzahl von Produkten bzw. Produktvarianten konfrontiert. Vielfach binden alten Produkte einen Großteil der Ressourcen. In der Folge stehen diese für wichtige Zukunftsthemen nicht zur Verfügung – eine Bereinigung des Portfolios ist unausweichlich. Aus Angst des Verlusts von Skalen- und Verbundeffekten scheuen Unternehmen jedoch oftmals die Straffung des Portfolios. Sie stehen vor der Frage, wie sie im Lichte der zukünftigen Entwicklung, unter Maßgabe möglichst geringer Umsatzverluste und möglichst hoher Kosteneinsparungen, ihr Produktportfolio bereinigen und die Ressourcen für Erfolg versprechende Produkte nutzen können.

In dem vorliegenden Beitrag wird eine Methode zur zukunftsorientierten Konsolidierung von Produktportfolios präsentiert. Kern ist eine IT-unterstützte Auswertung der technischen und marktorientierten Vernetzung der Produkte sowie eine Wettbewerbs- und Trendanalyse. Die Anwendung führt zu einer Konsolidierungs-Roadmap, die die Aufgabe unprofitabler Produkte zugunsten vielversprechender Innovationen ermöglicht.

Keywords:

Produktstrategie, Produktportfolio, Portfoliomanagement

1 Konsolidierung von Produktportfolios in der Produktentstehung

In globalen Märkten sehen sich Unternehmen mit vielfältigen Kundenanforderungen konfrontiert. Um diese zu erfüllen und sich gegenüber dem Wettbewerb zu differenzieren werden von Unternehmen neue Produkte bzw. Produktvarianten am Markt angeboten (Kersten 2002). Obwohl allgemein bekannt ist, dass die Variantenvielfalt ein Hauptkostentreiber ist, sehen sich die Unternehmen mit einer steigenden Variantenvielfalt konfrontiert. Vielfach werden bei Neuentwicklungen oder Modellüberarbeitungen vorhandene Lösungen nur ungenügend berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgt oftmals keine konsequente, kontinuierliche Reduzierung des Teilestamms (Ponn und Lindemann 2011). Über den Zeitverlauf führt dies zu einem wuchernden Produktportfolio und einem überproportionalen Anstieg der Komplexitätskosten. Gleichzeitig können sich die Unternehmen aufgrund der gebundenen Ressourcen nicht mit wichtigen Zukunftsthemen beschäftigen. Nach Kersten (2002) sind mehr als ein Viertel aller Produktvarianten und mehr als ein Drittel aller Komponentenvarianten überflüssig.

Studien belegen eine Korrelation zwischen Variantenvielfalt und Unternehmenserfolg: Unternehmen mit einer geringen Variantenanzahl je 100 Mio. USD Umsatz sind wesentlich erfolgreicher als Unternehmen mit einer großen Variantenanzahl (Kluge et al. 2006). Dies gilt insbesondere auch für den Maschinen- und Anlagenbau: Auf das Kerngeschäft fokussierte Unternehmen sind profitabler und verzeichnen mehr Wachstum als diversifizierte Unternehmen (VDMA 2014). Unternehmen haben die Bedeutung des Variantenmanagements erkannt und priorisieren dies zunehmend: 2014 führten in einer Studie von Roland Berger (2014) mehr als 120 Führungskräfte unterschiedlicher Industrien die Bereinigung des Produkt-/Serviceportfolios und die Erarbeitung eines zukunftsfähigen Produkt-/Serviceportfolios als Top-Hebel für ihren Unternehmenserfolg an.

Wir betrachten diese Aufgaben als integralen Bestandteil der Produktstrategie bei der **strategischen Planung und Entwicklung von Marktleistungen**. Der Prozess erstreckt sich von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf (Start of Production – SOP) und weist die Aufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung, Dienstleistungsentwicklung und Produktionssystementwicklung auf. Unserer Erfahrung nach kann der Produktentstehungsprozess nicht als stringente Folge

von Phasen und Meilensteinen verstanden werden. Vielmehr handelt es sich um ein Wechselspiel von Aufgaben, die sich in vier Zyklen gliedern lassen – Bild 1 soll dies verdeutlichen¹.

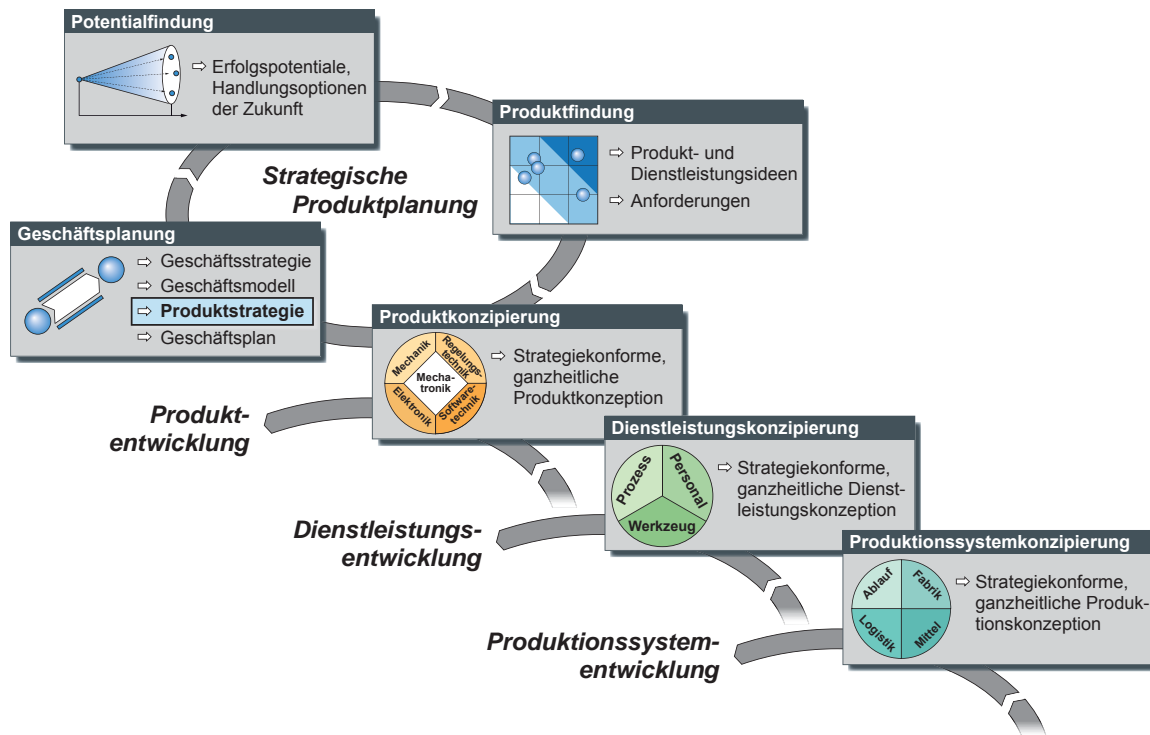


Bild 1: 4-Zyklus-Modell der Kreation von Marktleistungen nach Gausemeier et al. (2014)

Die Produktstrategie umfasst Aussagen zur Differenzierung im Wettbewerb, zum Halten des Wettbewerbsvorsprungs, zur Bewältigung der Variantenvielfalt und zur Gestaltung der Entwicklungs- und Markteinführungsprozesse (Gausemeier und Plass 2014). Bei der **Konsolidierung von Produktportfolios** können grundsätzlich drei Strategien für bestehende Produkte unterschieden werden: Produktintensivierung, Produktvariation und Produkteliminierung (Hansmann 2006). Die Produktintensivierung umfasst Investitionen zur Stärkung der Marktposition. Unter dem Aspekt der Produktvariation werden alle Änderungen der funktionellen oder anderen absatzbeeinflussenden Eigenschaften verstanden. Eine weitere Unterform der Produktvariation ist die Bildung von Varianten für verschiedene Zielgruppen – auch Produktdifferenzierung genannt. Die Produkteliminierung zielt auf das Entfernen eines Produktes aus dem Produktportfolio ab. Bis heute wird die Produkteliminierung allerdings nicht als proaktives, gleichwertiges Werkzeug verwendet (Baker und Hart, 2007).

Unsere Erfahrung zeigt, dass Konsolidierungsüberlegungen vielfach emotional auf Basis diffuser Ängste geführt werden. Aussagen wie „Der Kunde verlangt den gesamten Bauchladen“ seitens des Vertriebs fungieren als K.O.-Kriterium und verhindern eine Straffung des Portfolios. Neben der Vermeidung von subjektiven Meinungen und Emotionen existieren weitere Erfolgsfaktoren bei der Konsolidierung von Produktportfolios.

2 Erfolgsfaktoren bei der Konsolidierung von Produktportfolios

Bereits vor fast 70 Jahren hat u.a. Abromeit (1950) für die regelmäßige Überprüfung des Produktportfolios sensibilisiert. Seitdem sind zahlreiche Veröffentlichungen auf diesem Gebiet entstanden. Avlonitis (1984) analysierte erstmals wiederkehrende Erfolgsfaktoren bei der Konsolidierung. Ähnliche Erhebungen führten u.a. Muir und Reynolds (2011) sowie Argouslidis (2015) durch. Nachfolgend geben wir einen Überblick der zentralen Erfolgsfaktoren bei der Konsolidierung von Produktportfolios.

¹ Eine detaillierte Herleitung des Referenzmodells findet sich bei Gausemeier et al. (2014).

Koordinierung von Neuentwicklungen und Produkteliminierungen: Zur optimalen Ressourcenallokation und Ausbau der Innovationsstärke muss die Konsolidierung des Produktportfolios neben der Eliminierung unprofitabler Produkte auch den Ausbau Erfolg versprechender Produkte umfassen (Muir und Reynolds 2011).

Berücksichtigung von Wechselwirkungen: Eine isolierte Betrachtung einzelner Produkte ist nicht zielführend, es drohen negative Auswirkungen auf profitable Produkte – z.B. durch den Entfall von Kaufverbänden oder den Verlust technischer Synergieeffekte durch die Verringerung von Gleichteilen. Gerade in „historisch gewachsenen“ Produktportfolios sind diese Wechselwirkungen nicht offensichtlich.

Systematische Vorausschau: Unternehmen, die mit disruptiven Veränderungen z.B. durch Industrie 4.0 und die Digitalisierung konfrontiert sind, müssen die zukünftige Entwicklung von Technologien, Märkten und Geschäftsumfeldern antizipieren (Gausemeier et al. 2015). So können Lücken im Produktportfolio erkannt und gleichzeitig in den Märkten von morgen wenig Erfolg versprechende Produkte identifiziert werden.

Rückgriff auf zuverlässige, relevante Daten: In Unternehmen existieren vielfältige Daten, die Orientierung bei der Konsolidierung bieten können. Sie werden aber nur selten genutzt und systematisch ausgewertet (Muir und Reynolds 2011).

Entkopplung der Eliminierungsentscheidung von der Phase des Produktlebenszyklus: Eine Beschränkung auf Produkte in der Reife-Phase als Eliminierungskandidaten ist fahrlässig. Auch bei Produkten in der Einführungs- oder Wachstums-Phase kann Eliminierungsbedarf bestehen (Argouslidis et al. 2015).

3 Stand der Technik

Unternehmen stehen vor der Frage, wie sie im Lichte der zukünftigen Entwicklung, unter Maßgabe möglichst geringer Umsatzverluste und möglichst hoher Kosteneinsparungen, ihr Produktportfolio bereinigen und die Ressourcen für Erfolg versprechende Produkte nutzen können. Eine Methode zur zukunftsorientierten Konsolidierung von Produktportfolios die Unternehmen bei dieser Fragestellung ganzheitlich unterstützt existiert bislang nicht. Selbstredend existieren zahlreiche Veröffentlichungen auf diesem Gebiet – sie adressieren bislang allerdings jeweils nur Teilaspekte.

Die erste Gruppe bilden betriebswirtschaftlich orientierte Ansätze zur Produktelimination wie z.B. die modulare Eliminationsanalyse nach Hermann et al. (2000) oder die Produktelimination nach Meffert et al. (2015). Diese Ansätze sind stark vergangenheitsorientiert und fokussieren ausschließlich die Eliminierung von Produkten. Lücken im Produktportfolio werden nicht identifiziert.

Die zweite Gruppe bilden technisch orientierte Ansätze des Variantenmanagements. Beispiele sind die Methode zur Entwicklung von Vielfalt nach Martin und Ishii (2002) oder die Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden nach Kesper (2012). Bei diesen Ansätzen dominiert die Gestaltung der Produktarchitektur für neue Produkte. Wechselwirkungen mit dem bestehenden Portfolio werden unzureichend abgebildet. Ferner werden keine Eliminierungsempfehlungen ausgesprochen.

Im Folgenden stellen wir daher eine Methode vor, die den angeführten Erfolgsfaktoren Rechnung trägt und Unternehmen eine zukunftsorientierte Konsolidierung des Produktportfolios ermöglicht. Resultat ist eine Konsolidierungs-Roadmap, die die Aufgabe unprofitabler Produkte zugunsten vielversprechender Innovationen ermöglicht.

4 Methode zur zukunftsorientierten Konsolidierung von Produktportfolios

Die vorgeschlagene Methode umfasst gemäß Bild 2 vier Phasen. Zur besseren Verständlichkeit erfolgt die Erläuterung an einem durchgängigen Beispiel aus Sicht eines mittelständischen Antriebsherstellers.

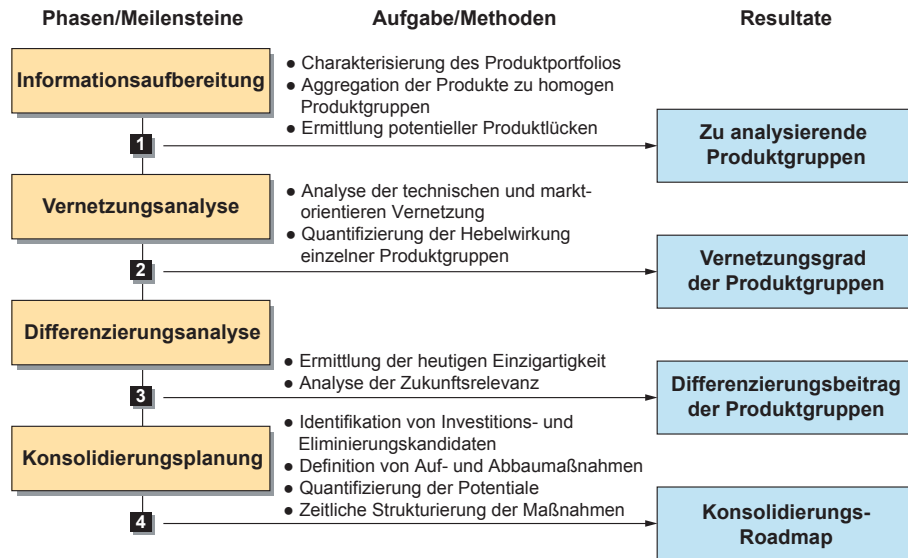


Bild 2: Methode zur zukunftsorientierten Konsolidierung von Produktportfolios (vereinfacht)

4.1 Informationsaufbereitung

Gegenstand ist die Ermittlung der zu analysierenden Produktgruppen. Zunächst wird das heutige Produktportfolio in Anlehnung an Brosch (2014) anhand von Indikatoren, wie der Prozesskomplexität, charakterisiert. Resultat sind die Stärken und Schwächen des derzeitigen Produktportfolios. Ferner werden die Produktvarianten anhand von Merkmalen und Ausprägungen zu einer handhabbaren Anzahl an Produktgruppen zusammengefasst. Grundlage ist eine Bewertung der Differenzierungsstärke der Merkmale. Mit Hilfe eines Diagramms, in dem die kumulierte Differenzierungsstärke der Merkmale über die resultierende Anzahl von Varianten aufgetragen wird, werden die zu berücksichtigenden Merkmale festgelegt. Im vorliegenden Beispiel sind dies Motortyp, Baugröße, Polzahl und Kühlungsart (Dülme et al. 2016). Auf Basis der Merkmale und Ausprägungen werden in Anlehnung an Köckerling (2004) mit Hilfe einer paarweisen Konsistenzbewertung technologisch denkbare, aber heute nicht angebotene, Lösungen identifiziert – potentielle **Produktlücken** (Bild 3). Dabei sind auch Ausprägungen zu berücksichtigen, die das eigene Unternehmen derzeit nicht anbietet, im Wettbewerb aber weit verbreitet sind oder von Kunden nachgefragt werden. Je Ausprägungskombination wird die Frage beantwortet, wie gut sich die Ausprägungen miteinander vertragen. So sind eine sehr kleine Baugröße und eine Wasserkühlung inkonsistent. Eine sehr kleine Baugröße und eine Luftkühlung sind hingegen sehr gut kombinierbar.

Realisierbarkeitsanalyse		Ausprägung											
Fragestellung: Wie verträgt sich Ausprägung i (Zeile) mit der Ausprägung j (Spalte)?													
Bewertungsmaßstab: 1 = totale Inkonsistenz 2 = partielle Inkonsistenz 3 = neutral 4 = partielle Konsistenz 5 = hohe Konsistenz													
Produktmerkmal	Ausprägung	Nr.	1A	1B	...	1M	2A	...	2E	...	4A	4B	4C
Motortyp	Hightorquemotoren (DT)	1A											
	Hochdynamikmotoren (DD)	1B											
											
Baugröße	Servomotoren (DV)	1M											
	sehr groß (20)	2A	4	4		2							
											
Kühlungsart	sehr klein (3)	2E	2	3		4							
	Wasser (W)	4A	4	3		2	5		1				
	Öl (O)	4B	3	3		3	3		2				
	Luft (F)	4C	2	3		4	2		5				

Bild 3: Realisierbarkeitsanalyse – Ermittlung potentieller Produktlücken in Anlehnung an Köckerling (2004)

Gemäß der Kombinatorik resultieren aus der Realisierbarkeitsanalyse in unserem Beispiel über 1000 Ausprägungsbündel. Viele Bündel enthalten allerdings eine totale Inkonsistenz, sie werden gestrichen. Andere werden bereits durch die bestehenden Produkte abgebildet. Für die übrigen Ausprägungsbündel wird der Realisierbarkeitswert ermittelt. Dieser resultiert aus der Summe der Konsistenzbewertungen aller Paare in dem Bündel. Für ihn wird ein Schwellwert definiert. Nur leicht zu realisierende Ausprägungsbündel gehen in die weitere Analyse mit ein.

Resultat der Phase ist ein **Katalog der zu analysierenden Produktgruppen**. Dieser umfasst sowohl die derzeitigen Produkte in Form einer handhabbaren Anzahl von homogenen Produktgruppen, als auch die Auflistung technologisch realisierbarer, potentieller Lücken im Produktportfolio (Bild 4). In unserem Beispiel sind dies 34 bestehende Produktgruppen und fünf potentielle Lücken.

Produktgruppe	Produktmerkmale							Produktgruppe bereits vorhanden?	Realisierbarkeitswert
	Motor-typ	Bau-größe	Polzahl	Küh-lungs-art	Dauer-stillstands-moment	Leerlauf-drehzahl	Geber-typ		
1	Große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren							Ja	
	DT	13	20	W	360	6,000	x		
A	Sehr große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren							Nein	36
	DT	20	20	W					
2	Kleine luftgekühlte drehmomentstarke Motoren							Ja	
	DT	5	10	O	1	9,000	x		
	DT	5	10	O	13	7,300	x		
B	Sehr kleine wassergekühlte drehmomentstarke Motoren							Nein	14
	DT	3	10	W					
3	Mittlere ölgekühlte hoch dynamische Servomotoren							Ja	
	DD	7	10	F	29	7,000	x		
4	Mittlere wassergekühlte hoch dynamische Servomotoren							Ja	
	DV	7	10	W	50				

Betrachtete Produktmerkmale
 Nicht betrachtete Produktmerkmale

Potentielle Lücke wird analysiert

Potentielle Lücke wird verworfen

Bild 4: Katalog der zu analysierenden Produktgruppen (Auszug)

4.2 Vernetzungsanalyse

In diesem Rahmen werden die Wechselwirkungen im Produktportfolio untersucht. Dabei wird zwischen der technischen und marktorientierten Vernetzung unterschieden (Dülme et al. 2016). Resultat ist der Vernetzungsgrad der Produktgruppen.

Die **technische Vernetzung** kann z.B. auf Basis von Fertigungssynergien oder der Verwendung von Gleichteilen hergeleitet werden. Im Falle der Verwendung von Gleichteilen wird paarweise anhand der Stücklisten zweier Produkte der Anteil identischer Bauteile und Komponenten ermittelt. Insbesondere bei umfangreichen Produktportfolios empfiehlt sich der Rückgriff auf IT-Systeme zur Auswertung der Stücklisten.

Die **marktorientierte Vernetzung** resultiert aus einer softwareunterstützten Warenkorbanalyse. Hierbei wird die Frage beantwortet, wie häufig zwei Produkte gemeinsam bestellt wurden. Für eine tiefergehende Analyse kann die Auswertung auch einzeln je Branche erfolgen. Hierdurch können Unterschiede im branchenspezifischen Kaufverhalten ermittelt werden. Ferner ermöglicht die marktorientierte Vernetzungsanalyse die Quantifizierung der Hebelwirkung einzelner Produkte. Hierzu werden **Produktketten** gebildet. Eine Produktkette gibt ausgehend von einem Produkt an, welche anderen Produkte besonders stark mit diesem verbunden sind. Wir empfehlen zwecks Übersichtlichkeit lediglich die fünf Produkte mit der höchsten Vernetzung zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beispiel wird der adressierte Umsatz zur Quantifizierung der Hebelwirkung verwendet (Bild 5). Bezogen auf den Startpunkt „große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“ werden alle verbundenen Produkte nach absteigendem Vernetzungsgrad aufgelistet. Anschließend wird der adressierte Umsatz durch Addition der Umsätze der einzelnen Produkte multipliziert mit dem Vernetzungsgrad berechnet. So beträgt der direkte Umsatz für „große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“ lediglich 6,2 Mio. €, der adressierte Umsatz ist mit fast 24 Mio. € aber ungleich höher.

	Bezeichnung	Direkter Umsatz (B)	Marktorientierte Vernetzung zum Startpunkt (G)	Adressierter Umsatz (BxG)
Produktkette	Startpunkt	Große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren		6,2 Mio. €
	Zweites Element	...	0,74	3,9 Mio. €
	Drittes Element	Mittlere wassergekühlte hoch dynamische Servomotoren	0,69	2,3 Mio. €
	...			
	Sechstes Element	Kleine ölgekühlte drehmomentstarke Motoren in Kurzbauweise	0,57	3,0 Mio. €
Adressierter Umsatz (Σ)				23,8 Mio. €

Bild 5: Produktketten – Quantifizierung der Hebelwirkung einzelner Produkte

Für die potentiellen Produktlücken ist selbstredend aufgrund der fehlenden Daten keine softwareunterstützte Auswertung möglich. Daher erfolgt sowohl die technische als auch die marktorientierte Bewertung auf Basis von Expertengesprächen. Die Ergebnisse der Vernetzungsanalyse können im Anschluss in ein Portfolio eingetragen werden (Bild 6).

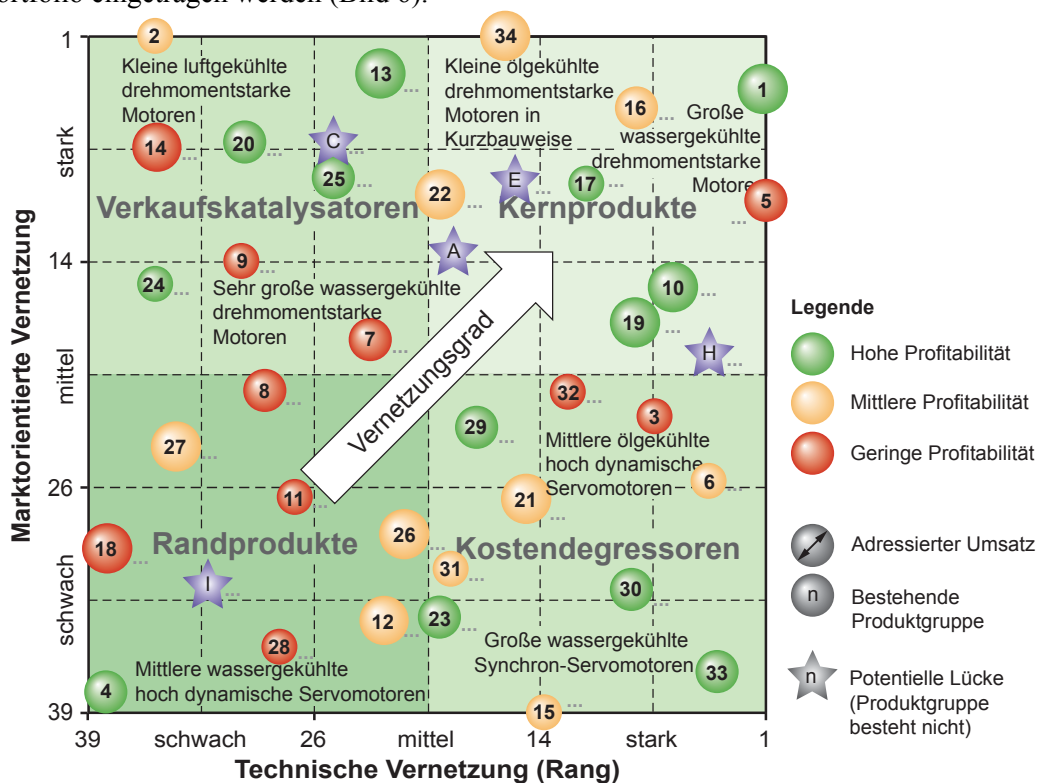


Bild 6: Vernetzungsportfolio

Innerhalb des Portfolios ergeben sich vier charakteristische Bereiche:

- **Kernprodukte** haben eine starke technische und marktorientierte Vernetzung – sie dürfen nicht isoliert betrachtet werden. Für unprofitable Produkte muss berücksichtigt werden, dass diese ggf. stark vernetzt mit profitablen Produkten sind. Ein Beispiel ist Produktgruppe 1 „große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“.
- Produkte mit schwacher technischer und starker marktorientierter Vernetzung fungieren als **Verkaufskatalysatoren**. Kunden erwarten dieses Produkt im Portfolio. Oft liegt hier eine Fremdfertigung nahe. Dies gilt beispielsweise für Produktgruppe 2 „kleine luftgekühlte drehmomentstarke Motoren“.
- Eine starke technische und schwache marktorientierte Vernetzung charakterisieren **Kostendegressoren**. Durch die umfangreiche Verwendung von Gleichteilen trägt dieses Produkt sowohl im Einkauf als auch der Produktion zur Senkung der Kosten von anderen Produkten bei. Die Produktgruppe 3 „mittlere ölgekühlte hoch dynamische Servomotoren“ liegt in diesem Bereich.

- **Randprodukte** kennzeichnet eine schwache technische und marktorientierte Vernetzung – sie können isoliert betrachtet werden. Dies trifft auf die Produktgruppe 4 „mittlere wassergekühlte hoch dynamische Servomotoren“ zu.

4.3 Differenzierungsanalyse

Im Zuge der Differenzierungsanalyse wird der Differenzierungsbeitrag der Produktgruppen ermittelt. Hierfür werden die heutige Einzigartigkeit der Produktgruppen im Wettbewerb und die Zukunftsrelevanz unter Berücksichtigung der weiteren Entwicklung von Technologien, Märkten und Geschäftsumfeldern bewertet. Dabei werden auch die potentiellen Lücken analysiert.

Für die **Wettbewerbsanalyse** werden zunächst relevante Wettbewerber identifiziert. Anschließend werden die Eigen- und Fremdprodukte bezüglich der Merkmale und Ausprägungen aus Phase eins eingestuft. Nach Inventarisierung der Produkte wird auf Basis der relativen Häufigkeit der Ausprägungen der Produktmerkmale die heutige Einzigartigkeit der Produktgruppen bestimmt. So verfügt die potentielle Produktlücke A „sehr große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“ über eine hohe Einzigartigkeit, da bei dem Merkmal „Baugröße“ die Ausprägung „sehr groß“ nur selten im Wettbewerb vertreten ist. Die Zukunftsrelevanz wird durch eine **Trendanalyse** ermittelt. Hierfür werden relevante Entwicklungen in den Bereichen Technologie, Gesellschaft sowie Umwelt & Politik identifiziert und bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet. Anschließend wird bewertet, wie gut eine Produktgruppe zu einem Trend passt. Darauf aufbauend wird unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit die Zukunftsrelevanz der Produktgruppen berechnet (Dülme et al. 2016).

Die Ergebnisse der Wettbewerbs- und der Trendanalyse können im Anschluss in ein Portfolio eingetragen werden (Bild 7). Hierdurch können auch die in Phase 1 ermittelten potentiellen Lücken im Produktportfolio verifiziert werden.

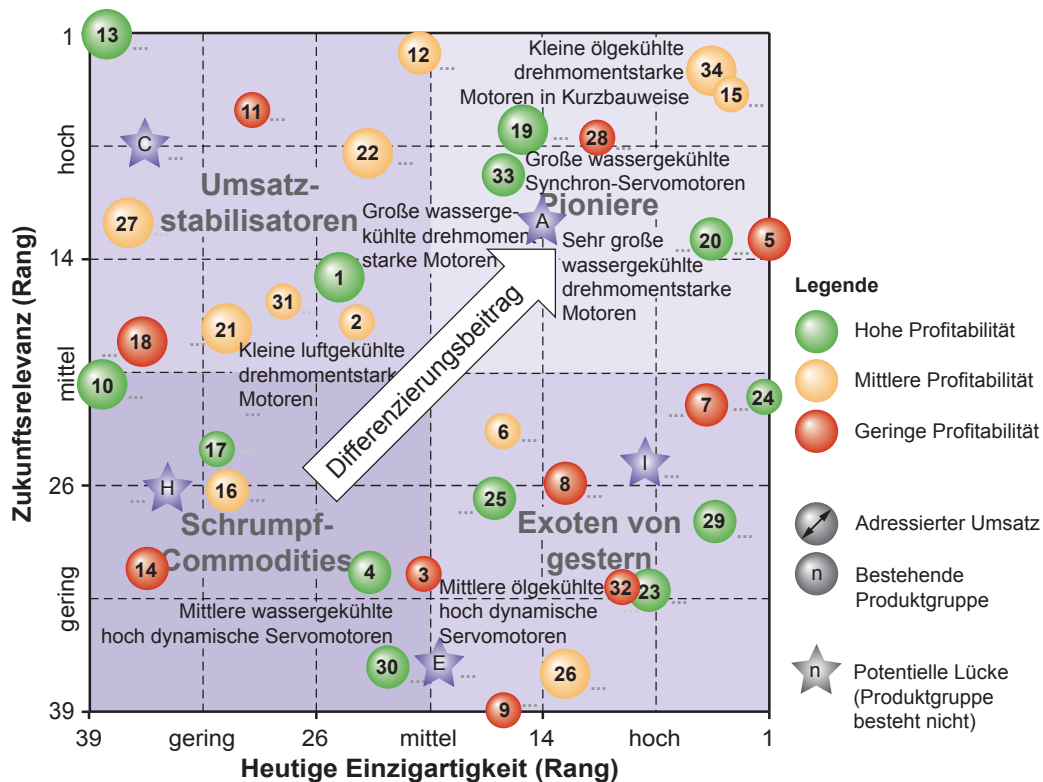


Bild 7: Differenzierungsportfolio

Basierend auf der heutigen Einzigartigkeit und der Zukunftsrelevanz resultieren vier Felder:

- **Pioniere** sind einzigartig im Wettbewerb und weisen eine hohe Zukunftsrelevanz auf. Als zentraler Differenzierungsfaktor sind sie für den langfristigen Unternehmenserfolg von besonderer Bedeutung. Die Produktgruppe 34 „kleine ölgekühlte drehmomentstarke Motoren in Kurzbauweise“ liegt in diesem Bereich.

- Eine geringe Einzigartigkeit bei hoher Zukunftsrelevanz charakterisieren **Umsatzstabilisatoren**. Die Produkte fungieren in den Märkten von morgen als Hygienefaktor – sie verhindern Unzufriedenheit beim Kunden, sorgen aber für keine Begeisterung. Dies trifft auf die Produktgruppe 1 „große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“ zu.
- Produkte mit hoher Einzigartigkeit und geringer Zukunftsrelevanz sind **Exoten von gestern**. Sie haben in der Vergangenheit zur Profilierung des Unternehmens beigetragen, sind aber zukünftig nicht mehr gefragt. Ein Beispiel ist Produktgruppe 3 „mittlere ölgekühlte hoch dynamische Servomotoren“.
- **Schrumpf-Commodities** kennzeichnet eine geringe Einzigartigkeit und geringe Zukunftsrelevanz. Sie leisten keinen Differenzierungsbeitrag. Dies gilt beispielsweise für Produktgruppe 4 „mittlere wassergekühlte hoch dynamische Servomotoren“.

4.4 Konsolidierungsplanung

Unter Berücksichtigung des Vernetzungsgrads und des Differenzierungsbeitrags werden Investitions- und Eliminierungskandidaten identifiziert – die sogenannten kritischen Produktgruppen. Für diese werden Auf- und Abbaumaßnahmen abgeleitet und in eine Konsolidierungs-Roadmap überführt. Hierfür werden zunächst die Ergebnisse aus Phase 2 und 3 in ein Portfolio übertragen (Bild 8). Es resultieren vier Normstrategien: Investieren, Halten, Überprüfen und Eliminieren.

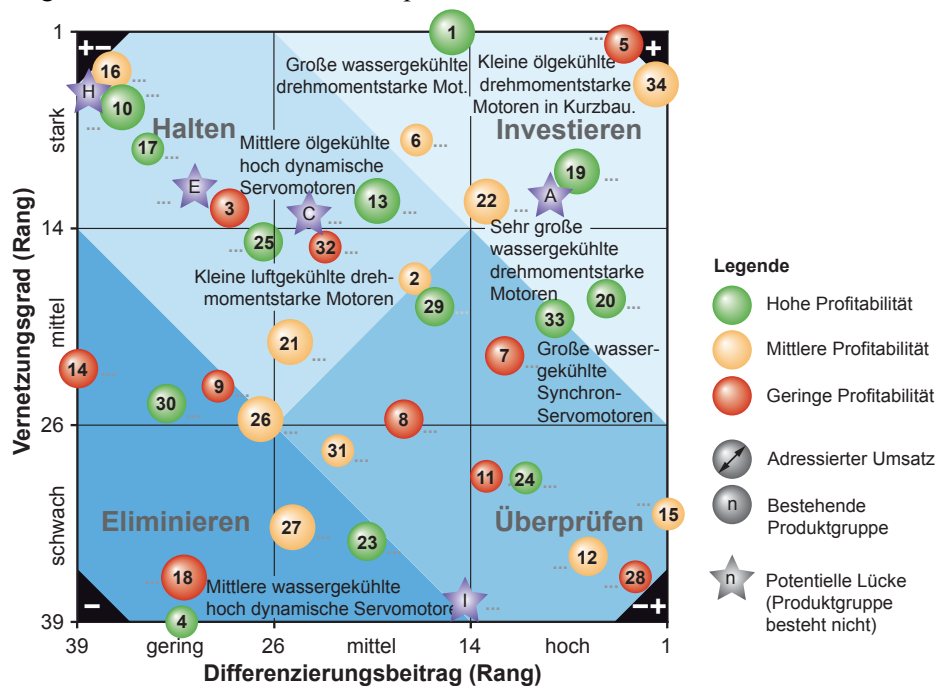


Bild 8: Konsolidierungsportfolio

Insgesamt konnten 16 kritische bestehende Produktgruppen identifiziert werden. Bei sieben Produktgruppen sollten weitere Investitionen erfolgen (z.B. Produktgruppe 1 „große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“). Weiterhin sollte Produktgruppe A „sehr große wassergekühlte drehmomentstarke Motoren“ in das Produktportfolio aufgenommen werden, da diese Produktgruppe zur weiteren Differenzierung des Unternehmens beitragen würde und zugleich von starken Skalen- und Verbundeffekten auszugehen ist.

Dem gegenüber sollten neun Produktgruppen eliminiert werden (z.B. Produktgruppe 18). Diese Produkte tragen weder zur Differenzierung des Unternehmens noch zur Realisierung von Skalen- und Verbundeffekten bei. Auch wenn Produktgruppe 4 „mittlere wassergekühlte hoch dynamische Servomotoren“ derzeit profitabel ist, sollten weitere Investitionen unterbleiben. Die kurzfristigen Erträge sollten z.B. durch Preiserhöhungen maximiert werden. Langfristig empfiehlt sich eine Eliminierung, da die entsprechenden Ressourcen besser für neue Produkte genutzt werden können.

Die übrigen 18 Produktgruppen sollten zunächst gehalten werden – es besteht kein unmittelbarer Handlungsdruck. So sind z.B. die „mittleren ölgekühlten hoch dynamischen Servomotoren“ (Produktgruppe 3) trotz der geringen Profitabilität im Portfolio zu halten; sie leisten einen zentralen Beitrag zu den Skalen- und Verbundeffekten. Für die „großen wassergekühlten Synchron-Servomotoren“ (Produktgruppe 33) ist zu überprüfen wie Skalen- und Verbundeffekte gesteigert werden können, da sie aufgrund ihres Differenzierungsbeitrags langfristig Bestandteil des Portfolios sein werden. Auch 6 potentielle Produktlücken liegen in den Bereichen Halten bzw. Überprüfen. Sie sind zunächst zurückzustellen und im Sinne einer jährlichen Widervorlage erneut zu beurteilen.

Für die kritischen Produktgruppen werden konkrete Maßnahmen abgeleitet und die Potentiale quantifiziert. Hierbei unterstützen die Ergebnisse aus den Phasen zwei und drei. Bei bestehenden Produktgruppen, in die weiter investiert werden soll, können z.B. die ermittelten Trends Anregungen für Produktpassungen geben. Ferner können z.B. auf Grundlage des adressierten Umsatzes die Umsatzeinbußen einer Produkteliminierung realistisch abgebildet werden (Dülme et al. 2016).

Die Maßnahmen werden mit Hilfe einer Design Structure Matrix (DSM) nach Steward (1981) auf zeitliche Abhängigkeiten hin analysiert. Ferner werden unternehmensspezifische Nebenbedingungen, wie die maximalen Umsatzverluste pro Jahr, definiert. Darauf aufbauend werden die Maßnahmen softwareunterstützt in eine Konsolidierungs-Roadmap überführt. Die Roadmap dient der zielgerichteten Operationalisierung und dem Umsetzungscontrolling für das Unternehmen (Dülme et al. 2016).

5 Resümee

In Zeiten der rapiden Zunahme an Varianten ist eine regelmäßige Überprüfung des Produktportfolios unausweichlich. Konsolidierungsüberlegungen werden vielfach emotional, auf Basis diffuser Ängste, geführt, die einer zielgerichteten Straffung des Portfolios entgegenwirken. Neben der Vermeidung von Emotionen sind insbesondere Wechselwirkungen im Portfolio zu berücksichtigen und die Eliminierung unprofitabler Produkte mit dem Ausbau Erfolg versprechender Produkte zu synchronisieren. Die angeführte Methode greift diese Erfolgsfaktoren auf und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Objektivierung von Konsolidierungsentscheidungen. Kern ist eine IT-unterstützte Auswertung der technischen und marktorientierten Vernetzung der Produkte sowie eine Wettbewerbs- und Trendanalyse. Unternehmen werden befähigt, die Zukunftsfähigkeit des Produktportfolios zu erhöhen und gleichzeitig, bei Wahrung der Differenzierung, die Komplexitätskosten zu reduzieren. Selbstredend ist die angeführte Methode in Abhängigkeit der Randbedingungen im jeweiligen Unternehmen spezifisch auszuprägen. So können z.B. spezifische K.O.-Kriterien vorliegen, die einzelne Analyseschritte erübrigen.

Literatur

- | | |
|-------------------------|--|
| Abromeit 1950 | ABROMEIT, Günther: <i>Erzeugnisplanung und Produktionsprogramm</i> . Wiesbaden: Springer, 1950. |
| Argouslidis et al. 2015 | ARGOULIDIS, Paraskevas C. ; BALTAS, George ; MAVROMMATIS, Alexis: <i>An empirical investigation into the determinants of decision speed in product elimination decision processes</i> . In: <i>European Management Journal</i> , 33(4), 2015, S. 268-286. |
| Arthur D. Little 1994 | ARTHUR D. LITTLE: <i>Management erfolgreicher Produkte</i> . Wiesbaden: Gabler Verlag, 1994. |
| Avlonitis 1984 | AVLONITIS, George J.: <i>Industrial Product Elimination: Major Factors to Consider</i> . In: <i>Industrial Marketing Management</i> , 13, 1984, S. 77-85. |
| Baker und Hart 2007 | BAKER, Michael J. ; HART, Susan: <i>Product Strategy and Management</i> . 2nd ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. |
| Dülme et al. 2016 | DÜLME, Christian ; ECKELT, Daniel ; FRIEBE, Milena ; GAUSEMEIER, Jürgen: <i>Future-oriented consolidation of product portfolios – Create space for innovations</i> . Proceedings of the XXVII ISPIM Innovation Conference, Porto, Portugal, 19. - 22. June 2016, International Society for Professional Innovation Management (ISPIM). |

- Gausemeier und Plass 2014 GAUSEMEIER, Jürgen ; PLASS, Christoph: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- Gausemeier et al. 2014 GAUSEMEIER, Jürgen ; AMSHOFF, Benjamin ; DÜLME, Christian ; KAGE, Martin: *Strategische Planung von Marktleistungen im Kontext Industrie 4.0*. In: Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): *Vorausschau und Technologieplanung – 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014.
- Gausemeier et al. 2015 GAUSEMEIER, Jürgen ; CZAJA, Anja ; DÜLME, Christian: *Innovationspotentiale auf dem Weg zu Industrie 4.0*. In: *10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*, Paderborn, April 23-24, 2015, S. 11-49.
- Hansmann 2006 HANSMANN, Karl-Werner: *Industrielles Management*. 8. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006.
- Herrmann et al. 2000 HERRMANN, Andreas ; HUBER, Frank ; FISCHER, Marc: *Produktelimination auf Basis des Fuzzy-Set-Ansatzes*. In: *Thexis*, 17(2), 2000, S. 28-33.
- Kersten 2002 KERSTEN, Wolfgang: *Vielfaltsmanagement. Integrative Lösungsansätze zur Optimierung und Beherrschung der Produkt- und Teilevielfalt*. München: TCW Transfer-Centrum, 2002.
- Kesper 2012 KESPER, Heiner: *Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden*. Technische Universität München, Fachbereich Maschinenwesen, Dissertation, 2012.
- Kluge et al. 2006 KLUGE, Jürgen ; STEIN, Lothar ; KRUBASIK, Edward ; BEYER VON MORGENSTERN, Ingo ; DÜSEDAU, Dieter ; HUHN, Wolfgang: *Wachstum durch Verzicht: Schneller Wandel zur Weltklasse: Vorbild Elektronikindustrie*. Heidelberg: Redline Wirtschaft, 2006.
- Köckerling 2004 KÖCKERLING, Matthias: *Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte*. Universität Paderborn, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2004.
- Martin und Ishii 2002 MARTIN, Mark V. ; ISHII, Kosuke: *Design for Variety: developing standardized and modularized product platform architectures*. In: *Research in Engineering Design*, Vol. 13, Springer Verlag, London, 2002.
- Muir und Reynolds 2011 MUIR, Jonathan ; REYNOLDS, Nina: *Product elimination: a critical overview and empirical insight into this process*. In: *Journal of General Management*, 37(1), 2011, S. 5-30.
- Meffert et al. 2015 MEFFERT, Heribert ; BURMANN, Christoph ; KIRCHGEORG, Manfred: *Marketing : Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung Konzepte – Instrumente – Praxisbeispiele*. 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- Ponn und Lindemann 2011 PONN, Josef ; LINDEMANN, Udo: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2011.
- Roland Berger 2014 ROLAND BERGER: *6. Operations-Effizienz-Radar. Die Top-Hebel für die CFO-Agenda 2015 – Eine Entscheidungshilfe*. München/Stuttgart: Roland Berger Strategy Consultants, Oktober 2014.
- Steward 1983 STEWARD, Donald V.: *The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems*. In: *IEEE Transaction on Engineering Management*, 28(3), 1983, pp. 71-74.
- VDMA 2014 VDMA: *Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren*. Frankfurt/Main, Berlin: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., McKinsey & Company, 2014.

Webbasierte Informationsvisualisierung zur frühen Kundenintegration

Maurice Preidel¹, Thomas Damerau², Rainer Stark¹,

¹Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, Berlin, Deutschland
maurice.preidel@tu-berlin.de
rainer.stark@tu-berlin.de

²Fraunhofer IPK, Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung, Berlin, Deutschland
thomas.damerau@ipk.fraunhofer.de

Abstract: Getrieben durch die Entwicklungen der Informationstechnik, insbesondere im Bereich der Virtualisierung von Entwicklungsmodellen, sieht sich die Produktentwicklung mit steigenden Datenmengen konfrontiert. Die Fähigkeit Daten zu Information zu verdichten, zu visualisieren und mit ihnen zu interagieren gewinnt für den Entwicklungserfolg an Relevanz. Insbesondere gilt dies für neue Entwicklungsansätze wie etwa Open Innovation, denn abgegebenes Kundenfeedback kann mit steigender Informationsmenge vom Produktentwickler schlechter verwertet werden. Die geeigneten IT-Werkzeuge zur Beherrschung dieser Informationsmenge und –art fehlen derzeit. Damit Entwicklungsingenieure produktiv mit einer großen Menge an positionsgebundenen Freitext-Kundenkommentaren arbeiten können, wird ein webbasiertes Software Framework (VCIVF: Virtual Customer Integration Visualization Framework) vorgestellt. Dieses Softwareframework ermöglicht Analyse der Kundenkommentare im Webbrowser direkt am 3D CAD Modell. In einer Anwenderstudie wird abschließend gezeigt, dass das VCIVF die Zeit zur Interpretation von Kundenfeedback reduziert und gleichzeitig die Interpretationsqualität erhöht.

Keywords:

Informationsvisualisierung, Open Innovation, Web-Framework, aktive Kundenintegration

1 Motivation und Einordnung in die Produktentwicklung

Infolge des Aufkommens des „Customer-Active“ Paradigmas in den 1980er Jahren (vgl. Hippel 1986) wurden in den Forschungsfeldern der Interaktionsforschung sowie der Produktentwicklung neue Muster der Kunden-Hersteller Interaktion beschrieben und erforscht (vgl. Lühje 2000). Gemein ist diesen die Erkenntnis, dass Kunden entlang des Entwicklungsprozesses aktiv Beiträge leisten und Aufgaben wahrnehmen können, die vormals dem Hersteller vorbehalten waren (vgl. Füller und Matzler 2007). Die Herausforderung diese Beiträge in die Produktentstehung zu integrieren einerseits sowie die zunehmende Virtualisierung der Produktentstehung als solche andererseits, konstituieren den Bedarf an IT-Lösungen, die einen Brückenschlag zwischen Herstellern und Kunden vollbringen. Dabei lassen sich nach Füller und Matzler (2007) vier wesentliche Ausprägungen der virtuellen Kooperation mit Kunden anhand der Dimensionen Integrationsgrad und Kontinuität unterscheiden. Diese Veröffentlichung fokussiert die intensivste Ausprägung: den fortlaufenden Dialog in online Communities.

Sowohl Schulte (2006) als auch Damerau und Hayka (2015)¹ stellen hierzu Ansätze vor, die die modellgestützte Erhebung von retrospektiven (Produktgeneration n-1) als auch prospektiven (Produktgeneration n+1) Kundenfeedback erlauben und dieses mittels Anbindung an Produktlebenszyklusmanagementsysteme (PLM) der Produktentwicklung verfügbar machen (Schulte 2006, Damerau et al. 2013). Eine zentrale Rolle im Dialog nehmen dabei Engineering-Modelle (konkret: 3D CAD Modelle) ein (vgl. auch Vinck 2011), die mit Kundenfeedback annotiert werden.

¹Das von Damerau und Hayka 2015 vorgestellte VCI3D (Virtual Customer Integration 3D) inspirierte diese Forschungsarbeit und wurde technisch kompatibel gestaltet. Das VCIVF versteht sich als Lösungskomponente in VCI3D.

Um operative Maßnahmen aus dem in 3D CAD Modellen annotierten Kundenfeedback abzuleiten, muss dieses aufbereitet werden, da ansonsten die Datenanalyse mit manuellen Methoden zu aufwändig – und damit unrentabel – ist. Besonders visuelle Verfahren werden zur Aufbereitung von textbasierten Kundenfeedbacks bereits in Kontexten außerhalb des Engineerings erfolgreich angewendet, um relevante Eigenschaften des Kundenfeedbacks hervorheben und damit dessen Interpretation zu erleichtern (vgl. Oelke et al. 2009). Die Informationsvisualisierung entscheidend zur Verbesserung von Engineering-Prozessen beiträgt, zeigt beispielsweise Beier (2014) anhand von Traceability-Modellen sowie Wolter et al. (2013) anhand von Produktstrukturen. Wenig betrachtet wurde bisher die Frage, wie Produktentwickler mit massenhaft erhobenem Kundenfeedback interagieren können. Diese Veröffentlichung stellt dazu eine webbasierte Lösung für den Einsatz in den frühen Produktentwicklungsphasen Planen und Konzipieren vor, die sowohl in der Konsum- als auch Investitionsgüterentwicklung verwendet werden kann.

2 Webbasiertes Software Framework

Damit Entwicklungsingenieure produktiv mit großen Mengen an positionsgebundenen Freitext-Kundenkommentaren arbeiten können, wird das webbasierte Virtual Customer Integration Visualization Framework (VCIVF) zur Visualisierung und Analyse von Kundenkommentaren an 3D CAD Modellen vorgestellt. Kern des VCIVF ist die Informationsvisualisierung an 3D CAD Modellen, da sich diese als besonders geeignet für die Kunden-Produktentwickler-Kommunikation herausgestellt haben (Damerau und Hayka 2015).

Im Allgemeinen ist die Entwicklung des VCIVF motiviert durch die Forschungsfrage: *Führt die Verbesserung der Darstellungsform dazu, dass an 3D-Modellen annotiertes Kundenfeedback schneller und korrekter als aktuell möglich interpretiert werden kann?* Zur Beantwortung dieser Frage werden zwei Forschungshypothesen aufgestellt:

1. Wenn Kundenfeedback an 3D CAD Modellen visualisiert wird, können Personen mit Erfahrungen in der virtuellen Produktentstehung dieses Kundenfeedback *schneller* interpretieren.
2. Wenn Kundenfeedback an 3D CAD Modellen visualisiert wird, machen Personen mit Erfahrungen in der virtuellen Produktentstehung bei der Interpretation dieses Kundenfeedbacks *weniger Fehler*.

Ausgehend von den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Anforderungen, werden die für das VCIVF zu verwendenden Technologien festgelegt und in Abschnitt 2.2 beschrieben. In Abschnitt 2.3 folgt eine Beschreibung der Datenbasis des Softwareprototypens, dessen Benutzerschnittstelle in Abschnitt 2.4 erläutert wird. Abschließend wird die Softwarearchitektur des VCIVF in Abschnitt 2.5 dargelegt.

2.1 Anforderungserhebung

Zur Anforderungserhebung wird ein durch agile Methoden geprägter Workshop mit sechs Experten aus dem Bereich virtuelle Produktentwicklung und Informationstechnik in Anlehnung an Rupp (2007) durchgeführt. Das in Abbildung 1 dargestellte System-Use-Case-Diagramm fasst die Ergebnisse der Anforderungserhebung zusammen.

Da der Produktentwickler bei der Entwicklung des VCIVF im Fokus steht, werden an dieser Stelle nur elementare Use Cases diskutiert. Ein elementarer Use Case wird als Use Case verstanden, der keinen anderen Use Case erweitert und direkt mit der Rolle (*leitender*) *Produktentwickler* verknüpft ist. Es stellt sich heraus, dass (*leitende*) *Produktentwickler* das VCIVF neben der (1) Visualisierung von Kundenfeedback zur (2) Unterstützung von Anforderungsentscheidungen, (3) Darstellung von Änderungsbedarf, (4) Erstellung von Anforderungen und (5) Darstellung von Geometrieabweichungen nutzen wollen. Grundsätzlich werden alle fünf dieser Use Cases bei der Entwicklung des VCIVF durch die entsprechende Ausgestaltung der Softwarearchitektur mitgedacht, jedoch werden nur die Use Cases (1) bis (3) prototypisch umgesetzt.

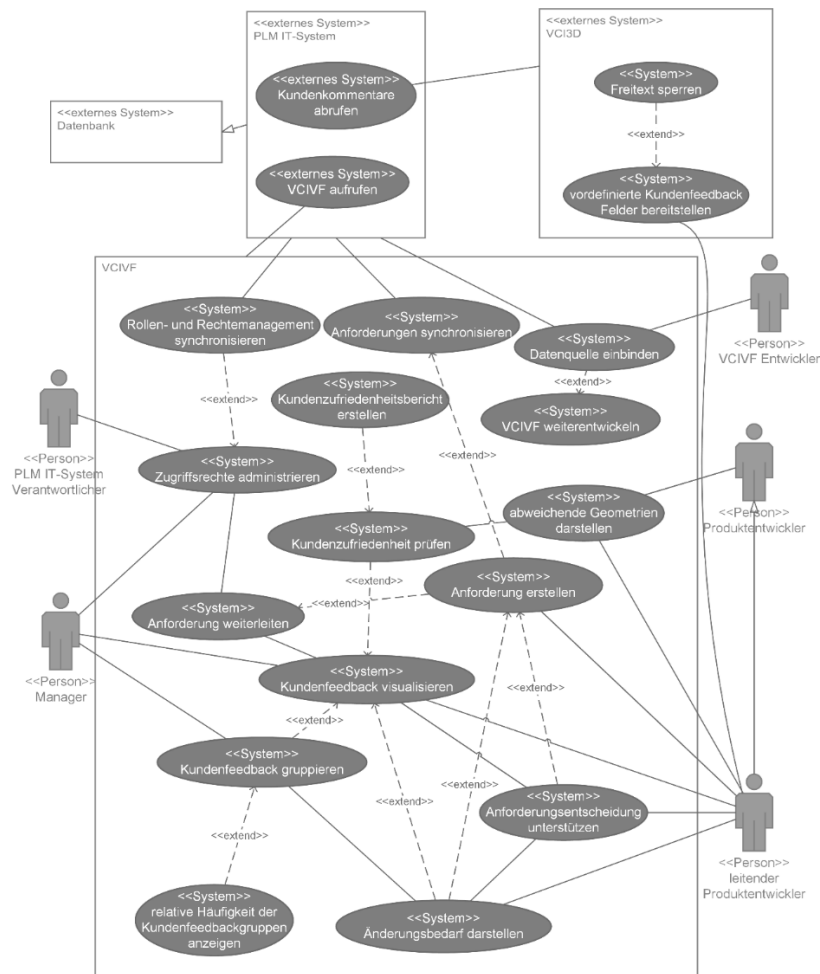


Abbildung 1: Ergebnis des Workshops zur Anforderungserfassung: System-Use-Case-Diagramm

2.2 Genutzte Technologien

Treibend für die Technologieauswahl sind vor allem die nicht-funktionalen Anforderungen: Aufgrund global agierender Unternehmen, wollen Produktentwickler jederzeit und örtlich unabhängig auf Kundenfeedback zugreifen. Fernerhin soll eine bestehende IT-Infrastruktur erhalten bleiben sowie eine flexible Erweiterung der Visualisierungsmöglichkeiten gegeben sein, damit das VCIVF einfach an spezifische Unternehmensanforderungen angepasst werden kann. Diese Anforderungen lassen sich durch Webtechnologien realisieren: Dazu gehören die Hypertext Markup Language (HTML), Cascading Style Sheets (CSS), JavaScript und die JavaScript Object Notation (JSON). Sie bilden das technologische Grundgerüst für das VCIVF. Um die Kommunikation über IT-Systemgrenzen hinweg zu ermöglichen, wird das Representational State Transfer (REST) Paradigma für die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation genutzt. Das 3D CAD Modell muss aufgrund der beschriebenen Technologieauswahl mit Hilfe webfähiger Technologien visualisiert werden können. Dazu wird das Format Extensible 3D (X3D) genutzt: Dieses kann mit Hilfe der JavaScript Bibliothek *x3dom.js*² von jedem HTML5-fähigen Endgerät angezeigt werden. Außerdem hat das X3D-Format einen sehr geringen Bedarf an Rechenleistung. (Kim et al. 2015) Um Rechtekonzepte umzusetzen und die Benutzerschnittstelle des VCIVF anpass- und verwaltbar zu gestalten, wird ein Content-Management-System (CMS) verwendet. Als Programmiersprache für das Backend wird die Programmiersprache Java gewählt, da Java umfangreiche Möglichkeiten der Datenanalyse und Datenbankanbindung bereitstellt, im Unternehmenskontext relevante Sicherheitsmechanismen implementiert und Bibliotheken für Webservices bietet.

² <https://www.x3dom.org/>

2.3 Datenbasis

Zur Evaluation des Softwareprototypens wird eine fiktive Datenbasis erstellt. Diese enthält Kundenkommentare mit Zeitstempel und Koordinaten (x, y, z) sowie Informationen über den Autor (Rolle, Name). Jeder Kommentar kann von der Community durch binäre Auswahl zwischen positiv und negativ bewertet werden: Dazu wird zu jedem Kommentar eine Zählvariable gespeichert, die um eins erhöht wird, wenn der Kommentar positiv bewertet wird. Das Gegenteil tritt ein, wenn der Kommentar negativ bewertet wird. Neben der Bewertung können Kommentare auch von anderen Community-Mitgliedern kommentiert werden (im Folgenden *Antworten* genannt). Antworten können äquivalent zu Kommentaren bewertet werden. Der Term *Beiträge* bezeichnet im Folgenden Kommentare und Antworten gleichermaßen. Damit die Interpretationsfähigkeit der Endnutzer im Rahmen der Validierung evaluiert werden kann, enthält die Datenbasis auch widersprüchliche Kundenmeinungen. Inhaltlich decken die Beiträge unterschiedliche Detailgrade ab: Dabei reicht die Spannweite von allgemeinen Aussagen wie „*finde ich schön*“, bis zu spezifischen Anforderungen mit Änderungswünschen wie „*Das Material hält an dieser Stelle nicht meinen Belastungsanforderungen stand! Bitte steiferes Material verwenden. So ist das schlecht gelöst.*“.

2.4 Benutzerschnittstelle

Die Gestaltung der Benutzerschnittstelle basiert auf folgenden Use Cases: (1) Visualisierung von Kundenfeedback zur (2) Unterstützung von Anforderungsentscheidungen und (3) Darstellung von Änderungsbedarf (vgl. Abschnitt 2.1). Abbildung 2 zeigt eine beispielhafte Ansicht, die erscheint, wenn ein Benutzer die Webseite des VCIVF aufruft. Diese Webseite wird im Folgenden *Dashboard* genannt. Das Dashboard soll intuitiv bedienbar sein. Daher werden zahlreiche Tooltips und Hinweise angezeigt, die eine integrierte, selbsterklärende Dokumentation realisieren.

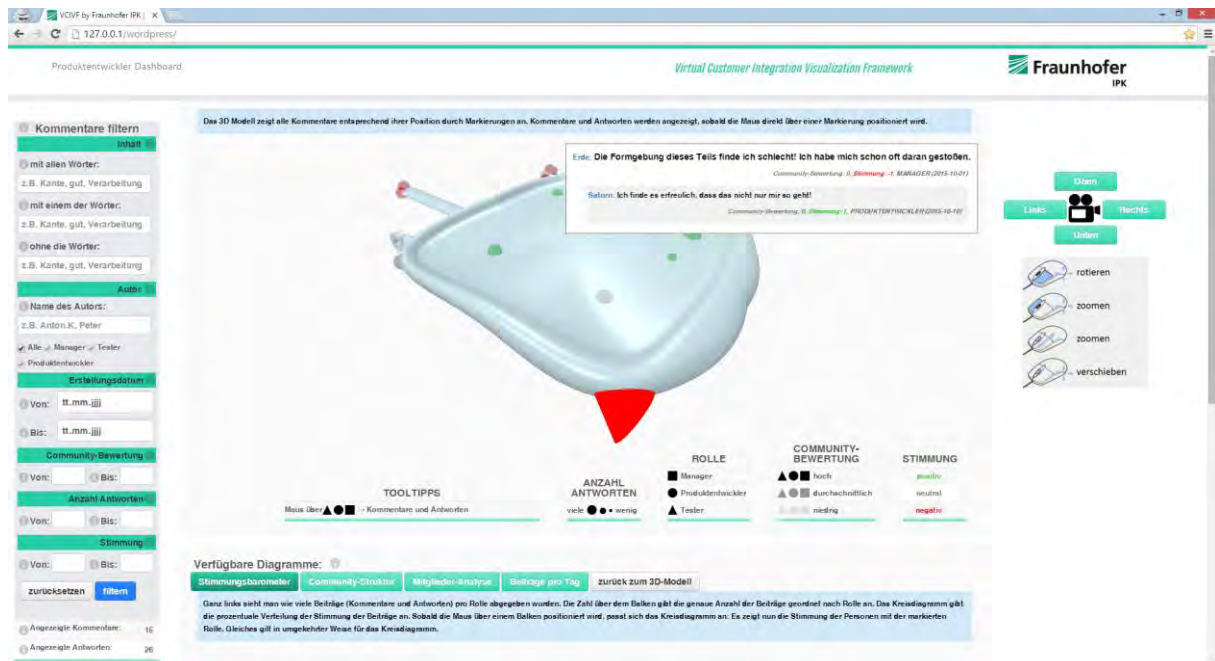


Abbildung 2 Startansicht des Dashboards (3D Modell: Sitz eines dreirädrigen Stadtfahrrads)

Im Mittelpunkt des Dashboards befindet sich das 3D CAD Modell des Produkts: In Abbildung 2 ist exemplarisch der Sitz eines dreirädrigen Stadtfahrrads dargestellt. Das im X3D-Format vorliegende 3D CAD Modell wird mit Hilfe von *x3dom.js* geladen und mit Kundenkommentaren verknüpft. Die Kundenkommentare werden je nach Inhalt, Autor und Community-Bewertung unterschiedlich auf dem 3D CAD Modell markiert. Größe, Form, Transparenz und Farbe der Markierung sind mit den Eigenschaften der zugehörigen Kommentare verknüpft: Die Anzahl der Antworten bestimmt die Größe, die Rolle des Autors eines Kommentars bestimmt die Form, die Community-Bewertung des Kommentars bestimmt

die Transparenz und die grundlegende Stimmung eines Kommentars legt die Farbe einer Markierung fest. Die Stimmung eines Beitrags wird im Backend berechnet. Dazu wird der Beitrag mit jeweils einer Liste positiver und negativer Wörter abgeglichen und die Differenz gebildet. Kommentare mit positiver Stimmung werden grün; Kommentare mit negativer Stimmung werden rot gefärbt. Der Benutzer kann mit dem 3D CAD Modell auf unterschiedliche Weise mit der Maus interagieren: Sobald der Benutzer mit der Maus über eine Markierung fährt, öffnet sich eine Ansicht, die die Daten des Kommentars und der zugehörigen Antworten anzeigt. Folgende Daten werden angezeigt: Autor, Beitragsinhalt, Community-Bewertung, Stimmung, Rolle und Datum der Erstellung. Darüber hinaus sind Mausektionen zum Rotieren, Zoomen und Verschieben des Modells sowie vordefinierte Kameraansichten verfügbar.

Damit gezielt nach bestimmten Informationen gesucht werden kann, werden auf der linken Seite des Dashboards Filterfunktionen bereitgestellt. Mit diesen kann der Benutzer nach Inhalt, Autornamen und –rolle, Erstellungsdatum, Community-Bewertung, Anzahl der Antworten sowie Stimmung filtern. Wird der Button *filtern* geklickt, wird das Dashboard aktualisiert und zeigt nur Kommentare mit zugehörigen Antworten an, die den Filterkriterien entsprechen.

Die in Abbildung 3 dargestellten Diagramme, die Möglichkeiten zur tiefergehenden Analyse bieten, werden im unteren Teil des Dashboards bereitgestellt. Ein Stimmungsbarometer zur Evaluation der Stimmung innerhalb der Community und in Bezug auf spezifische Rollen, ein Community-Struktur-Netzwerkdiagramm zur Darstellung der Interaktionshäufigkeit zwischen Community-Mitgliedern, ein Mitglieder-Analyse-Diagramm zur Analyse der Aktivität und durchschnittlichen Beitragsstimmung einzelner Community-Mitglieder sowie ein Säulendiagramm zur zeitlichen Darstellung der Beitragsanzahl. Die Diagramme sind zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit mit einer kurzen Beschreibung versehen (vgl. Abbildung 2 unten: Beschreibung des Stimmungsbarometers). Außerdem ist – sofern aufgrund der Diagrammkomplexität erforderlich – eine detaillierte Legende dargestellt.

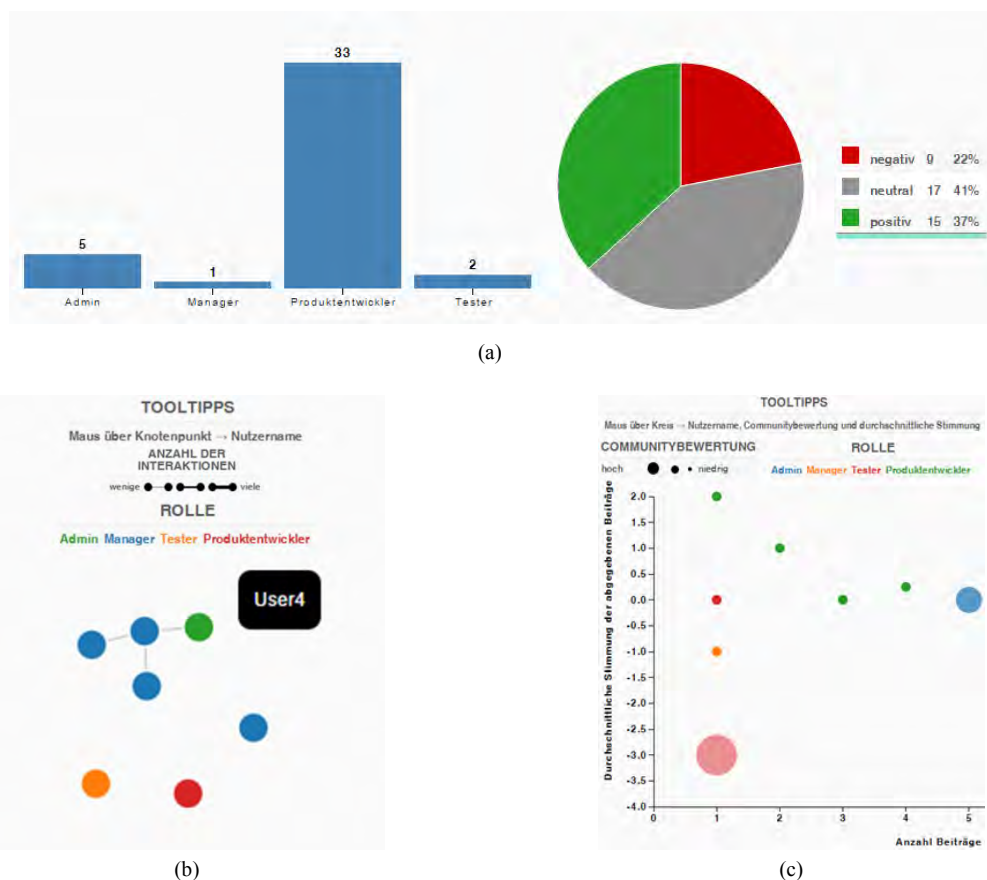


Abbildung 3: (a) Diagramm zur Darstellung der Kundenzufriedenheit (Stimmungsbarometer), (b) Diagramm zur Darstellung der Community-Struktur, (c) Diagramm zur Analyse der Community-Mitglieder

2.5 Softwarearchitektur

Das VCIVF verwendet die in Abbildung 4 dargestellte Drei-Schichten-Architektur, die schützenswertes Know-How sicher verbirgt. Die Präsentationsschicht nutzt Wordpress als Content-Management-System, ist mit Webbrowsern lauffähig und kommuniziert mit Hilfe einer REST Schnittstelle. Die in Java programmierte Logikschicht verarbeitet die Nutzeranfragen: Benötigte Daten werden über Datenbankschnittstellen aggregiert, analysiert, in Zielformate (X3D für Geometriedaten, JSON für Diagramme) konvertiert und über einen Webservice-Provider bereitgestellt.

Das verwendete CMS *Wordpress* stellt bereits einige responsive Designs sowie Plug-Ins zum Rollen- und Rechtemanagement zur Verfügung. Um spezifische VCIVF-Funktionalitäten in der Präsentationsschicht bereitzustellen, werden drei JavaScript-Bibliotheken in die CMS-Dateistruktur integriert: Die Diagramm-Bibliothek beinhaltet den auf dem Visualisierungsframework *D3.js*³ aufbauenden Programmcode zur Erstellung der Diagramme. Die 3D-Modell-Bibliothek beinhaltet den Programmcode zur Darstellung des 3D CAD Modells und darauf angebrachter Markierungen. Die Interaktions-Bibliothek beinhaltet JavaScript Programmcode, der nicht direkt zu den anderen Bibliotheken der VCIVF Präsentationsschicht zuzuordnen ist – beispielsweise Filterfunktionen. Zur Kommunikation mit der Logikschicht wird ein REST-konformer Webservice Consumer bereitgestellt, der durch Verwendung von Asynchronous JavaScript and XML (AJAX) Technologie einen asynchronen Datenaustausch ermöglicht. Durch die Möglichkeit zum asynchronen Datenaustausch zwischen Präsentations- und Logikschicht, entfällt das Neuladen des gesamten Dashboards, wenn nur die Daten – zum Beispiel durch Auslösen einer Filteranfrage – aktualisiert werden müssen.

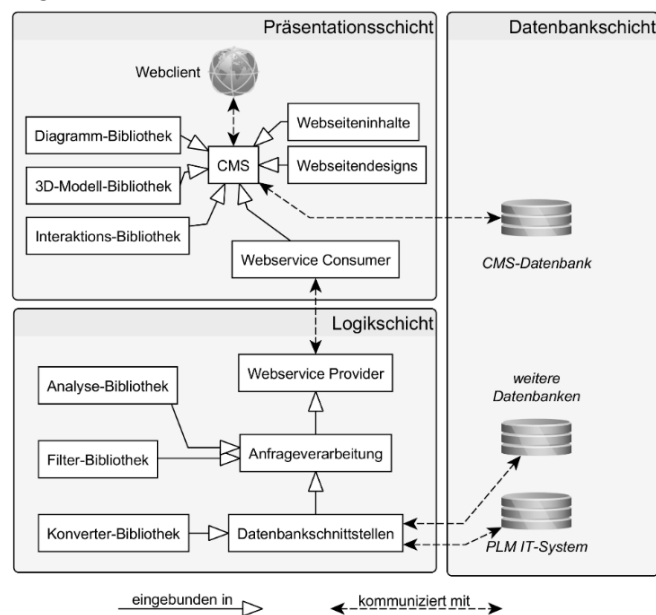


Abbildung 4: Lösungskonzept aus Architektursicht

Als Kommunikationspartner zum Webservice Consumer der Präsentationsschicht, existiert in der Java-basierten Logikschicht ein Webservice Provider, der die Funktionen der Logikschicht nach außen über eine REST-konforme API zur Verfügung stellt. Sobald ein Webservice Consumer die vom Webservice Provider angebotenen Funktionen anspricht, wird die Anfrage in einem separaten Modul *Anfrageverarbeitung* interpretiert. In das Anfrageverarbeitungsmodul sind Funktionen zur Datenanalyse (*Analyse-Bibliothek*) und Filterung (*Filter-Bibliothek*) von Beiträgen integriert. Die Kommunikation mit Datenbanken erfolgt in einem separaten Modul *Datenbankschnittstellen*. In diesem Modul werden Lese- und Schreiboperationen zwischen Logik- und Datenbankschicht koordiniert. Auch gängige PLM IT-Systeme können dadurch angebunden werden. In das Modul *Datenbankschnittstellen* ist eine *Konverter-Bibliothek* eingebunden: Diese stellt sicher, dass über die Datenbankschnittstelle eingelesene Daten bei Bedarf nach JSON, X3D oder in Java Objekte konvertiert werden.

³ <https://d3js.org/>

3 Validierung durch Nutzerstudie

Das VCIVF wird in einer Blindstudie mit insgesamt 18 Probanden, die Kenntnisse in virtueller Produktentwicklung haben, validiert. Fünf Probanden sind Studierende, zwölf Probanden sind wissenschaftliche Mitarbeiter mit Diplom- oder Masterabschluss und ein Proband ist wissenschaftlicher Mitarbeiter mit abgeschlossener Promotion. Ein Proband der Experimentalgruppe hat eine Rot-Grün-Sehschwäche und ein Proband der Kontrollgruppe kennt das VCIVF, jedoch sind ihm die im Rahmen der Studie zu bearbeitenden Aufgaben des fachlichen Fragenkatalogs unbekannt. Die Nutzerstudie ist wie in Abbildung 5 dargestellt aufgebaut und hat die Überprüfung der Forschungshypothesen sowie die Evaluierung der Benutzerfreundlichkeit des Dashboards zum Ziel. Pro Termin sind – bis auf eine Ausnahme – zwei Probanden und der Erstautor dieser Veröffentlichung als Studienleiter anwesend. An einem Termin nahm nur ein Proband teil. Alle Probanden erhalten Vorab-Informationen, in dem der Studienablauf, Funktionsweise und Zweck der Software VCI3D sowie das von der Software VCI3D erstellte Datenausgabeformat beschrieben sind. Kern der Studie ist ein fachlicher Fragenkatalog, der im Schwierigkeitsgrad ansteigt, aus insgesamt 36 Single-Choice-Fragen mit jeweils vier Antwortmöglichkeiten besteht und so konzipiert ist, dass die Bearbeitung aller 36 Fragen in den dafür zur Verfügung stehenden 17 Minuten nicht zu schaffen ist. Falls Probanden eine Frage des fachlichen Fragenkatalogs nicht beantworten können, ist das Überspringen von Fragen möglich.

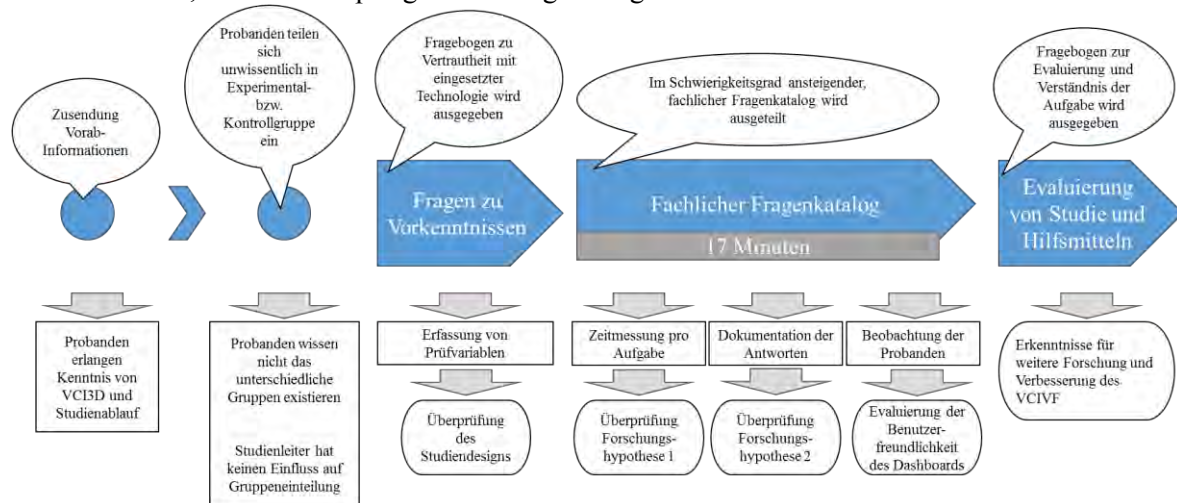


Abbildung 5: Ablauf und Ziele der Nutzerstudie zur Validierung des VCIVF

Folgende Annahmen liegen der Nutzerstudie zu Grunde:

1. Eine Einarbeitungszeit von fünf Minuten reicht aus, um die Bedienung des VCIVF zu verstehen.
2. Alle Probanden sind erfahrene PC-Anwender.
3. Je mehr Informationen zur Beantwortung einer Frage ausgewertet werden müssen, desto höher ist der Schwierigkeitsgrad der Frage.
4. Alle neben dem VCIVF zur Verfügung gestellten Hilfsmittel (Microsoft Excel, Windows Taschenrechner, Google Chrome) sind so weit bekannt, dass sie ohne Einarbeitung von jedem Probanden verwendet werden können.
5. Je mehr Fragen ein Proband bearbeitet hat, desto vertrauter sind ihm Fragestil und Hilfsmittel. Deswegen wird seine Antwortqualität wahrscheinlich steigen. Dieser Effekt betrifft beide Probandengruppen. Da alle Probanden identische Fragen in der gleichen Reihenfolge beantworten und die Auswertung anhand des Vergleichs der Probandengruppen erfolgt, kann der beschriebene Effekt vernachlässigt werden.
6. Wenn keine Frage übersprungen wird, ist es keinem Probanden möglich, alle Fragen des fachlichen Fragenkatalogs innerhalb von 17 Minuten zu beantworten.
7. Das Stresslevel der Probanden erhöht sich durch starken Zeitdruck, Beobachtung bei der Aufgabenerledigung und der Einführung eines Wettbewerbs (Gewinn für beste Leistung möglich).

Obwohl der fachliche Fragenkatalog aus insgesamt 36 Fragen besteht, kann kein Proband der Vergleichsgruppe mehr als 17 Fragen beantworten. Der beste Proband der Experimentalgruppe beantwortet insgesamt 29 Fragen, überspringt keine Frage und beantwortet alle Fragen korrekt. Die Erfassung der Prüfvariablen (Vorkenntnisse im Bereich Web-Applikationen, CAD Modelle und Auswertung von schriftlichem Kundenfeedback) zeigt keine Auffälligkeiten.

Die Zeit zur Beantwortung einer Frage aus dem fachlichen Fragenkatalog wird von den Probanden mit Hilfe einer softwarebasierten Stoppuhr selbst gemessen. In Abbildung 6 ist erkennbar, dass die Probanden der Experimentalgruppe – bis auf Frage 14 – alle Fragen schneller als die Probanden der Kontrollgruppe beantworteten (negative Werte: Experimentalgruppe ist schneller). Der Ausreißer bei Frage 14 ist damit zu erklären, dass einige Probanden das in Abbildung 3 (c) dargestellte Diagramm nicht finden. Da die Beantwortung von Frage 14 für die Experimentalgruppe nur durch dieses Diagramm wesentlich erleichtert wird, dauert die Beantwortung dieser Frage im Durchschnitt bei der Experimentalgruppe 36% länger. Da die Probanden der Experimentalgruppe die Fragen durchschnittlich 39% schneller als die Kontrollgruppe beantworteten, ist Forschungshypothese 1 bestätigt.

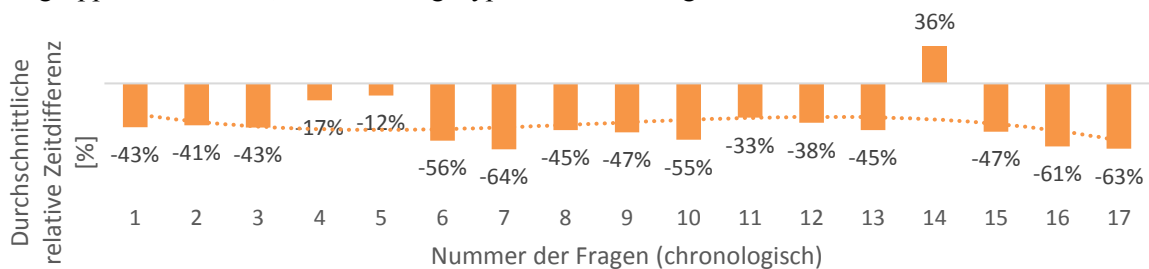


Abbildung 6: Vergleich der relativen Differenz der mittleren Zeit zur Lösung der Aufgaben der Nutzerstudie

Abbildung 7 lässt erkennen, dass Probanden der Experimentalgruppe von Frage 1 bis 8 keine statistisch relevanten Unterschiede bzgl. des Anteils richtiger Antworten aufweisen. Ab Frage 9 geben Probanden der Experimentalgruppe durchschnittlich 89% richtige Antworten, wohingegen die Kontrollgruppe nur zu 21% richtig antwortet. Es ist daher davon auszugehen, dass eine gewisse Einarbeitungszeit nötig ist, um die Bedienung des VCIVF zu erlernen. Während dieser Einarbeitungszeit (ca. 7-8 Minuten), ist die Forschungshypothese 2 widerlegt. Nach dieser Einarbeitungszeit ist Forschungshypothese als bestätigt anzusehen. Daher ist insgesamt davon auszugehen, dass Forschungshypothese 2 unter der Voraussetzung, dass Benutzer, die hinreichend Einarbeitungszeit erhalten (ca. 8 Minuten), bei der Auswertung von schriftlichem Kundenfeedback unter Zuhilfenahme des VCIVF weniger Fehler machen. Weitere Untersuchungen zur finalen Klärung der Forschungshypothese 2 erscheinen sinnvoll.

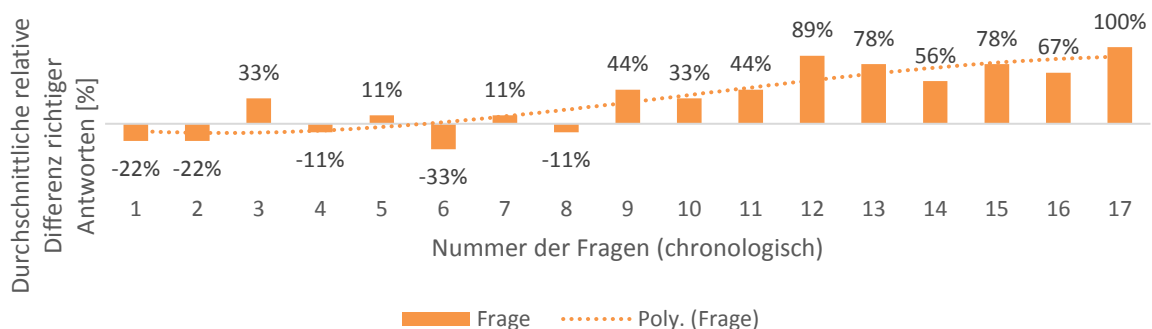


Abbildung 7: Vergleich der Differenz der richtigen Antworten in Prozent

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Abschlussbefragung zur Evaluierung (Likert-Skala) der bereitgestellten Hilfsmittel. Folgende Aussagen werden bewertet: *Die Excel Tabelle und das 3D Modell im Webbrowser...* (Kontrollgruppe), *Die Software VCIVF...* (Experimentalgruppe) (1) *haben / hat mir sehr geholfen, die Kundenbeiträge zu interpretieren*, (2) *haben / hat mir inhaltlich bei der Beantwortung der Fragen sehr geholfen*, (3) *haben / hat mir bei der schnellen Beantwortung der Fragen sehr geholfen*,

(4) sind / ist sehr intuitiv bedienbar, (5) sind / ist als Hilfsmittel zur Beantwortung der gestellten Fragen sehr gut geeignet und (6) konnte ich aufgrund meiner Vorkenntnisse ohne Probleme bedienen. Es zeigt sich, dass aus Probandensicht das VCIVF im Vergleich zum Stand der Technik ein besser geeignetes, intuitiveres Softwarewerkzeug, zur schnellen Interpretation von Kundenfeedback ist.

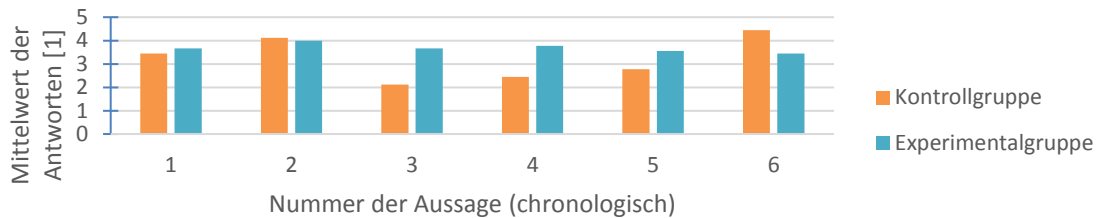


Abbildung 8: Auswertung des Bewertungsbogens zur Beurteilung der Hilfsmittel

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Softwareframework VCIVF ermöglicht Produktentwicklern eine schnelle, präzise und umfassende Visualisierung von Kundenfeedback direkt am 3D CAD Produktmodell, wodurch diese produktiv mit einer großen Menge an positionsgebundenen Freitext-Kundenkommentaren arbeiten können. Durch den webbasierten Ansatz ist die Nutzung der vorgestellten Lösung auf jedem HTML5-fähigen Gerät mit Internetzugang möglich. Der modulare Aufbau der Softwarearchitektur ermöglicht eine Anpassung an verschiedenste Use Cases und IT Infrastrukturen. Durch die eingesetzten Webtechnologien ist die vorgeschlagene Lösung VCIVF sowohl von kleinen Teams als auch von global agierenden Großkonzernen einsetzbar. Gleichzeitig gibt es noch Verbesserungspotential: Die Stimmungsanalyse der Kommentare basiert auf einem einfachen Verfahren, das durch semantische Textanalyseverfahren verbessert werden könnte. Aktuell unterstützt das VCIVF nur X3D-Daten basierend auf einer händisch durchzuführenden VRML97 Konvertierung. Für den Produktiveinsatz müsste eine automatisierte Lösung geschaffen werden, die von gängigen 3D CAD Datenformaten in das Zielformat X3D konvertieren kann. Dies erscheint aufgrund der modularen Softwarearchitektur machbar. Entsprechende Konverter sind am Markt verfügbar. Bei Nutzung von mobilen Endgeräten, deren Auflösung geringer als 1920 mal 1080 Pixel ist, fällt auf, dass Optimierungspotential im responsive Design besteht: Einige Elemente sind „fix“ positioniert, wodurch die Bedienung erschwert ist. Durch Anpassung des CSS-Programmcodes, soll dies in Zukunft verbessert werden. Insgesamt kann festgestellt werden, dass das VCIVF prototypisch aufgezeigt hat, wie Informationsvisualisierungswerkzeuge zur frühen Kundenintegration ausgestaltet werden können, um die Kunden-Produktentwicklerinteraktion wertschöpfend auszugestalten. Zur Erweiterung der Interaktionsmöglichkeiten zwischen Nutzer und Produktentwickler könnten soziale Aspekte intensiver berücksichtigt werden: Dazu könnten Nutzer- und Produktentwicklerprofile sowie Newsfeeds ergänzt werden. Fernerhin könnten per Drag & Drop konfigurierbare Dashboards den Produktentwickler befähigen, individuelle Auswertungen in Form von personalisierten Analysen und Visualisierungen zu erstellen.

5 Anmerkung

Die Ergebnisse der Masterarbeit von Maurice Preidel sind in diese Veröffentlichung eingeflossen. Der Titel der Arbeit lautet „Entwicklung einer produktbezogenen Visualisierung in PLM IT-Systemen für die Nutzung von Kundenfeedback in der Produktentstehung“. Die Masterarbeit wurde bei der Fakultät V der Technischen Universität Berlin am 18.12.2015 vorgelegt.

Literatur

- BEIER, Grischa: *Verwendung von Traceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme*. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2013. Stuttgart : Fraunhofer-Verl., 2014 (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)
- DAMERAU, Thomas ; HAYKA, Haygazun: Customer Integration through 3D models : Study Results & Implications, Bd. 26. In: ISPIM Conference (Hrsg.): *ISPIM Conference : Shaping the Frontiers of Innovation Management*, 2015 (ISPIM Conference), S. 1-11.
- DAMERAU, Thomas ; HAYKA, Haygazun ; STARK, Rainer: PLM-Centered Support of Active Virtual Customer Integration into the Product Creation Process, Bd. 5. In: Michael Abramovici; Rainer Stark (Hrsg.): *Smart Product Engineering* : Springer, 2013 (Lecture Notes in Production Engineering), S. 51–60
- FÜLLER, Johann ; MATZLER, Kurt: *Virtual product experience and customer participation—A chance for customer-centred, really new products*. In: *Technovation* 27 (2007), 6-7, S. 378–387
- HIPPEL, Eric von: *Lead Users: An Important Source of Novel Product Concepts* (1986)
- KIM, EunHee ; HWANG, Jinsang ; HAHM, Gyeong-June ; LEE, Jae Hyun: *3D CAD model visualization on a website using the X3D standard*. In: *Computers in Industry* 70 (2015), S. 116–126. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361515000457> – Überprüfungsdatum 2017-02-16
- LÜTHJE, Christian: Untersuchung zur Gestaltung der Kunden-Hersteller-Interaktion. In: LÜTHJE, Christian (Hrsg.): *Kundenorientierung im Innovationsprozess*. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverlag, 2000, S. 88–129
- OELKE, D. (Hrsg.); HAO, M. (Hrsg.); ROHRDANTZ, C. (Hrsg.); KEIM, D. A. (Hrsg.); DAYAL, U. (Hrsg.); HAUG, L. E. (Hrsg.); JANETZKO, H. (Hrsg.): *Visual opinion analysis of customer feedback data*. 2009 IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology. 2009 IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology, 2009
- RUPP, Chris: *Requirements-Engineering und -Management : Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis*. 4., aktualisierte und erw. Aufl. München : Hanser, 2007
- SCHULTE, Stefan: *Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. 2006. URL <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/net/html/HSS/Diss/SchulteStefan/diss.pdf> – Überprüfungsdatum 2017-02-15
- VINCK, Dominique: *Taking intermediary objects and equipping work into account in the study of engineering practices*. In: *Engineering Studies* 3 (2011), Nr. 1, S. 25–44
- WOLTER, Lars ; HAYKA, Haygazun ; STARK, Rainer: Improving the Usability of Collaboration Methods and Technologies in Engineering, Bd. 411. In: KOVÁCS, George L.; KOCHAN, Detlef (Hrsg.): *Digital Product and Process Development Systems : IFIP TC 5 International Conference, NEW PROLAMAT 2013, Dresden, Germany, October 10-11, 2013. Proceedings*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer, 2013 (IFIP Advances in Information and Communication Technology, 411), S. 73–84

Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Albert Albers¹, Simon Rapp¹, Clemens Birk¹, Nikola Bursac¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland
{Albert.Albers, Simon.Rapp, Clemens.Birk, Nikola.Bursac}@kit.edu

Abstract: Eine bewertete Produktspezifikation, die ausreichend viele Differenzierungsmerkmale für einen Produkterfolg vorsieht und dennoch ein gewisses Entwicklungsrisiko nicht überschreitet, ist das Ziel der „Frühen Phase“ der Produktgenerationsentwicklung. Hierbei getroffene Entscheidungen haben einen großen Einfluss auf nachgelagerte Prozess- und Produkteigenschaften, deren Tragweiten zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung kaum abzusehen sind und folglich eine hohe Unsicherheit verursachen. Betrachtet man die „Frühe Phase“ nicht im Verständnis einer klassischen Neukonstruktion, sondern im Sinne der PGE (Produktgenerationsentwicklung), kann der reale Sachverhalt klarer beschrieben und strukturiert werden. Entsprechend wird in diesem Beitrag eine Definition der „Frühen Phase“ im Kontext der PGE eingeführt. Es wird gezeigt, wie die Struktur der „Frühen Phase“ gesteigert und die Unsicherheit auf Basis des PGE-Ansatzes mit Referenzprodukten als zentralen Elementen reduziert werden kann. Durch die präziserte Beschreibung und gezieltere Gestaltung der „Frühen Phase“ verbessern sich sowohl die Grundlage für zu treffende Entscheidungen als auch die Abschätzung von deren Auswirkungen und somit deren Güte.

Keywords:

Entwicklungsplanung, Entwicklungsrisiko, Neuentwicklung, radikale Innovation

1 Variable Verdichtung, eine „radikale Innovation“

Auf dem Autosalon Paris 2016 hat Infiniti erstmalig einen serienreifen Motor mit variablen Verdichtungsverhältnis vorgestellt, der 2018 auf den Markt erscheinen soll. Bei diesem kann der Kolbenhub so variiert werden, dass eine stufenlose Einstellung der Verdichtung zwischen 8:1 und 14:1 erfolgen kann und damit Benzin-Einsparungen von bis zu 25 % ermöglicht werden. 20 Jahre, mehr als 100 Prototypen und über eine Milliarde Euro investierte Infiniti in diese, gemäß der Fachliteratur, „radikale Innovation“, die im Wesentlichen von der „Frühen Phase der Produktentwicklung“ abhängt. Dennoch sind viele Teilsysteme des Motors identisch mit bestehenden Motoren. Daher ist offensichtlich, dass eine „white-piece-of-paper“-Theorie nicht den Kern dieser „radikalen Innovation“ darstellen kann. So ist die Idee des variablen Verdichtungsverhältnisses fast hundert Jahre alt und schnell auf einem Blatt Papier skizziert. Viel mehr liegt der Kern dieser „radikalen Innovation“ in der detaillierten Gestaltung und Umsetzung des Prinzips. Dies wird u.a. durch mehr als 300 angemeldete Patente dokumentiert. (Spiegel Online 2016) Dieser Beitrag betrachtet auf Basis des Ansatzes der PGE -Produktgenerationsentwicklung die „Frühe Phase“ der Produktentwicklung und leitet eine Theorie ab, die Entwicklungen, wie die des Infiniti-Motors realitätsnah beschreiben kann. Damit dient sie als Grundlage, um in künftigen Projekten die „Frühe Phase“ methodisch zu unterstützen und Unsicherheiten bei der Entscheidung für die Realisierung einer neuen Produktgeneration zu reduzieren.

2 Stand der Forschung

2.1 „Frühe Phase“ der Produktentwicklung

Fallstudien zeigen, dass der Erfolg eines Projekts stark von Entscheidungen bestimmt wird, die bereits in der „Frühen Phase“ der Produktentwicklung getroffen werden (Cooper und Kleinschmidt 1993). Dies resultiert weitestgehend aus dem großen Einfluss auf die nachgelagerten Prozess- und zukünftigen Produkteigenschaften wie beispielsweise Entwicklungszeit, Kosten und Qualität. Neben der Tragweite

von Entscheidungen lässt sich die „Frühe Phase“ durch weitere Merkmale wie Unsicherheit, Ressourceneinsatz und Strukturierung charakterisieren (Verworn 2005). Um dem gering strukturierten Charakter der „Frühen Phase“ Rechnung zu tragen, wird in der englischsprachigen Literatur zur Benennung auch die Bezeichnung „fuzzy front end“ genutzt (Khurana und Rosenthal 1997). Dabei lässt sich dieser Charakterzug im Wesentlichen durch eine hohe Unsicherheit begründen, die in der Literatur unterschiedlich strukturiert wird.

Im Kontext der Problemlösung lässt sich dabei Unsicherheit als Differenz zwischen benötigten und vorhandenen Informationen beschreiben (Galbraith 1973), woraus sich im Entwicklungsprozess zwangsläufig das Risiko inkorrektur Prämissen ergibt (Weck et al. 2007). Die genannte Unsicherheit kann dem Projektlösungsteam gleichermaßen bekannt oder unbekannt sein und sich sowohl auf die Produktdefinition als auch auf die vorhandene Datenbasis beziehen (Earl et al. 2005). Entsprechend lässt sich Unsicherheit auch auf Basis der Herkunft klassifizieren, wobei zwischen Wissenslücke (engl.: „lack of knowledge“) und einer Definitionslücke (engl.: „lack of definition“) differenziert werden kann. ALBERS et al. (2011) beschreiben die Tatsache, dass zum Schließen von Definitionslücken problemspezifisches Wissen und zur zielgerichteten Wissensgenerierung Definitionen notwendig sind, als Unsicherheitsdilemma. Folglich ergibt sich als Ziel in der Produktentwicklung, die Unsicherheit durch ein iteratives Vorgehen kontinuierlich zu reduzieren (Lindemann und Lorenz 2008).

In der Literatur werden Definitionen der „Frühen Phase“ oftmals im Kontext einer Neukonstruktion gemäß PAHL & BEITZ beschrieben (Pahl et al. 2007) und infolgedessen auch als „front end of innovation“ bezeichnet (Koen et al. 2001). Entsprechend sind die Ideengenerierung und deren Bewertung die hauptsächlichen Aktivitäten in der „Frühen Phase“ (Khurana und Rosenthal 1997). Mit einer anschließenden, positiven Entscheidung für ein Entwicklungsprojekt wird – unter Erhöhung des Ressourceneinsatzes – eine klassische, strukturierte Produktentwicklung begonnen (Koen et al. 2001). Eine Übersicht verschiedener Definitionen sowie differenzierende Aspekte findet sich in Bild 1.



Autor	Spezifikum	Visualisierung
KHURANA & ROSENTHAL 1998	Finanzierung und Start der Produktentwicklung auf Basis einer „Go / No-Go“ Entscheidung	Go / No-Go Frühe Phase  PEP
KOEN et al. 2001	Alle Aktivitäten vor dem Beginn des formalen und strukturierten Produktentwicklungsprozesses	Frühe Phase  PEP
JETTER 2005	Brücke zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung	Strategie  Frühe Phase PEP
MUSCHIK 2011	Zeitraum von der Initiierung eines Projektes bis zur Formulierung einer ersten Produktspezifikation	Initiierung Produktspezifikation  Frühe Phase 

Bild 1: Definition der „Frühen Phase“, Darstellung nach Bursac 2016

2.2 PGE - Produktgenerationsentwicklung

PGE nach ALBERS (2015a) dient der Beschreibung unternehmerischer Produktentwicklung als Grundlage zur Erforschung und Entwicklung geeigneter unterstützender Methoden, Tools und Prozesse. Der Ansatz fußt auf der empirisch untermauerten Erkenntnis, dass bisherige Theorien aus Konstruktionsmethodik (Pahl et al. 2007) und Innovationsmanagement (Henderson und Clark 1990) das breite Spektrum an Neuentwicklungsanteilen in realen Produktentwicklungsprojekten nicht vollständig abbilden können (Albers et al. 2015a). Der PGE-Ansatz erweitert daher die bestehenden Ansätze daher. In einer zweiten empirischen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass der PGE-Ansatz grundsätzlich geeignet ist, die Lücken der bisherigen Beschreibungssystematiken zu schließen (Albers et al. 2016b). Zwei Elemente sind für den PGE-Ansatz grundlegend. Erstens: Neue Produkte oder technische Lösungen werden fast immer auf der Grundlage von Referenzprodukten oder Referenzlösungen entwickelt. Darunter werden bestehende Lösungen verstanden, deren Teilsysteme und deren Struktur

der Entwicklung einer neuen Produktgeneration zu Grunde liegen (Albers et al. 2016a). Referenzlösungen können u.a. firmeneigene Vorgängerprodukte oder Wettbewerbsprodukte, aber auch branchenfremde Produkte sein sowie unternehmenseigene Systeme, die noch nicht oder nie Marktreife erreicht haben. Zweitens: Die Entwicklung einer neuen Produktgeneration in diesem Sinne geschieht durch die gezielte Kombination der Aktivitäten Übernahme- (ÜV), Gestalt- (GV) und Prinzipvariation (PV), wobei die letzten beiden zusammen den Neuentwicklungsanteil einer neuen Produktgeneration darstellen (Albers et al. 2015a).

Auf Basis einer Zuordnung der einzelnen Variationsarten zu den verschiedenen Teilsystemen einer neuen Produktgeneration lässt sich der PGE-Ansatz auch in Form einer mathematischen Beschreibung ausdrücken. Als Variationsanteil wird dann der Anteil bezeichnet, den die Teilsysteme, die einer bestimmten Variationsart unterliegen, an der Gesamtzahl der Teilsysteme haben. Erste Untersuchungen an Fallbeispielen (Albers et al. 2016a) konnten zeigen, wie mit Hilfe des Contact-and-Channel-Ansatzes, C&C²-A (Albers und Wintergerst 2014) bei der vergleichenden Analyse von Produktgenerationen und ihren Referenzprodukten die einzelnen Variationsarten anhand von Änderungen des technischen Systems identifiziert werden können. Diese Fallbeispielanalysen lassen außerdem mögliche Motive für bestimmte Variationsarten erkennen - exemplarisch Bereiche, in denen sich Variationen auswirken, z.B. Validierungssystem oder Produktionssystem, sowie den tendenziellen Umfang daraus resultierender Entwicklungsrisiken und Kosten. So stellt beispielsweise das erste Zweimassenschwungrad (ZMS) ausgehend vom Referenzprodukt Einscheiben-Kupplung eine PV dar, die darin begründet ist, dass das bisherige System technologisch ausgereift war. Die Folge waren hohe Risiken und Kosten im Entwicklungsprozess (Albers et al. 2016a). Risiken und Kosten sind darüber hinaus auch davon abhängig, ob für einen Entwickler, eine Abteilung oder ein Unternehmen „das verwendete Prinzip [...] neu ist“ (Albers et al. 2016a). Insgesamt stellt der PGE-Ansatz eine durchgängige Verbindung her zwischen technischen Änderungen am System einerseits und Größen wie Risiko und Kosten einer Produktentwicklung andererseits.

Das Konzept der PGE lässt sich auch auf einzelne Produktentwicklungsprozesse übertragen, wo z.B. verschiedene, prototypisch realisierte Reifegradstufen analog zu Produktgenerationen als Entwicklungsgenerationen aufgefasst werden können (Albers et al. 2016b). Davon ausgehend bietet der PGE-Ansatz das Potential, aktuellen Herausforderungen für die Forschung (wie sie beispielsweise auch in Entwicklungsbereichen der Automobilbranche zu finden sind), sowohl auf operativer als auch strategischer Ebene, sowohl in der Zielsystem-Bildung als auch in der Objektsystem-Validierung, zu begegnen (Albers et al. 2016b). Beispielhaft konnte am Fahrzeug-Teilsystem Nockenwelle bereits gezeigt werden, wie auf Basis des PGE-Ansatzes die Angebotserstellung bei Kundenanfragen effizienter erfolgen kann (Albers et al. 2016c).

3 Forschungsbedarf

Aus dem Stand der Forschung wird ersichtlich, dass die meisten Produkte auf Basis von bestehenden Referenzprodukten entwickelt werden. Darüber hinaus ist dem Stand der Forschung zu entnehmen, dass die Entscheidung, ob ein Produktentstehungsprozess realisiert werden soll, ein wichtiges Element der „Frühen Phase“ ist. Diese Entscheidung ist jedoch meist komplex und kann nicht auf Basis von konzeptionellen Lösungen, die auf einem Blatt Papier skizziert wurden, gefällt werden. Deshalb sind in der Entwicklungspraxis viele Validierungsaktivitäten notwendig. Dafür müssen oft zunächst Prototypen entwickelt und produziert werden. Erst dadurch können komplexe Wechselwirkungen identifiziert und damit das Entwicklungsrisiko abgeschätzt werden. Mithilfe der PGE als Beschreibungsmodell wird ersichtlich, wie es auch in der „Frühen Phase“ ökonomisch vertretbar sein kann, den für die Entscheidung notwendigen Reifegrad z. B. durch Prototypen zu erreichen. Um dies erklären zu können, müssen zunächst folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie kann die „Frühe Phase“ im Kontext der PGE definiert werden?
- Wie können hieraus Vorgehensweisen abgeleitet werden, um die Produktentwicklung in der „Frühen Phase“ zu unterstützen?

In den folgenden Kapiteln wird zunächst eine Definition der „Frühen Phase“ der PGE abgeleitet und mit Beispielen veranschaulicht. Anschließend werden Vorgehensweisen abgeleitet, um die „Frühe Phase“ zu unterstützen.

4 Definition und Abgrenzung: „Frühe Phase“ der PGE

Definition: „Frühe Phase“ der PGE (–Produktgenerationsentwicklung)

Die „Frühe Phase“ der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit einer bewerteten technischen Lösung endet, die schließlich das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente abdeckt. Die zur technischen Lösung gehörende Produktspezifikation als Teil des Zielsystems enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Systems hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen oder des technischen und ökonomischen Risikos.

Mit drei Beispielen aus begleiteten realen Produktentwicklungsprozessen soll die Definition veranschaulicht werden: (1) In der Automobilindustrie wird häufig anhand von ersten Konzeptfahrzeugen das initiale Zielsystem auf künftige Bedürfnisse abgestimmt und definiert. Um z. B. einen leistungsstärkeren Motor aus einer anderen Fahrzeug-Baureihe für eine neue Produktgeneration effektiv auf seine Eignung zu validieren, werden in hohem Maße Teilsysteme wie die Karosserie und Teile des Antriebsstrangs aus vorherigen Produktgenerationen übernommen, so dass der Entwicklungsprozess in der „Frühen Phase“ beschleunigt werden kann. (2) Ein weiteres Beispiel aus der Automobil-Zulieferer-Industrie ist die Entwicklung einer neuen Generation des ZMS mit besonderer Bauraumoptimierung für Front-Quer-Anwendungen (Albers et al. 2016a): Um eine als kritisch erkannte, neu gestaltete Schwungradverschraubung zu validieren, wurde dafür zunächst ein neuer Prüfstand entwickelt, um das Löseverhalten zu untersuchen. Erst nach erfolgter Absicherung wurde der eigentliche Entwicklungsprozess in seine nächste Konkretisierungsphase weitergeführt. (3) Ein drittes Beispiel ist die Entwicklung einer neuen Generation von Stanzmaschinen. Mit dem Ziel, die Energieeffizienz der neuen Produktgeneration zu steigern, sollte an Stelle eines hydraulisch aktuierten Werkzeugs ein elektrisch aktuiertes eingesetzt werden. Zur Validierung der gestellten Anforderungen, wie z. B. Stanz-Geschwindigkeit, wurde ein Prototyp aufgebaut, in den die meisten Teilsysteme der vorherigen Produktgeneration übernommen werden konnten. Komplettiert wurde der Prototyp durch einen elektrischen Aktuator. So konnte in der „Frühen Phase“ bereits das Funktionsprinzip abgesichert werden.

Aus diesen Beispielen wird ersichtlich, dass sich für die Bewertung des initialen Zielsystems der neuen Produktgeneration die Potentiale der PGE nutzen lassen. Hierbei war es zielführend, für die Beurteilung des Entwicklungsrisikos Prototypen mit einem hohen Übernahmeanteils aufzubauen, denn anhand von Skizzen war eine valide Bewertung der Produktkonzepte nicht ausreichend möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Komplexität der zu entwickelnden Produkte mit dieser Art der Modellierung (Prinzipskizze) für eine verlässliche Validierung nicht hinreichend abgebildet werden kann.

Mit dem Ziel, Technologien und Wissen für künftige Produktgenerationen aufzubauen, werden in verschiedenen Branchen Forschungs- oder Vorentwicklungsprojekte durchgeführt (Heismann und Maul 2012). Dabei besitzen solche Projekte ebenfalls eine „Frühe Phase“ und basieren oftmals auf Referenzprodukten, die den Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration bilden. Als Beispiel lässt sich hier die Entwicklung einer Keramik-Bremse nennen, deren Ausgangspunkte eine konventionelle Bremse war (Harrer et al. 2013). Ein möglicher zeitlicher Verlauf eines Vorentwicklungsprojektes zusammen mit der Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist in Bild 2 dargestellt.

Die schematische Abbildung veranschaulicht, dass Vorentwicklungsprojekte – wenn auch auf anderen Randbedingungen basierend – ebenfalls einen Produktentwicklungsprozess durchlaufen. Außerdem

können einzelne Phasen der Entwicklung bereits zeitlich parallel zur Entwicklung der vorherigen Produktgeneration verlaufen, wie es beispielsweise bei den Smartphones zu beobachten ist.

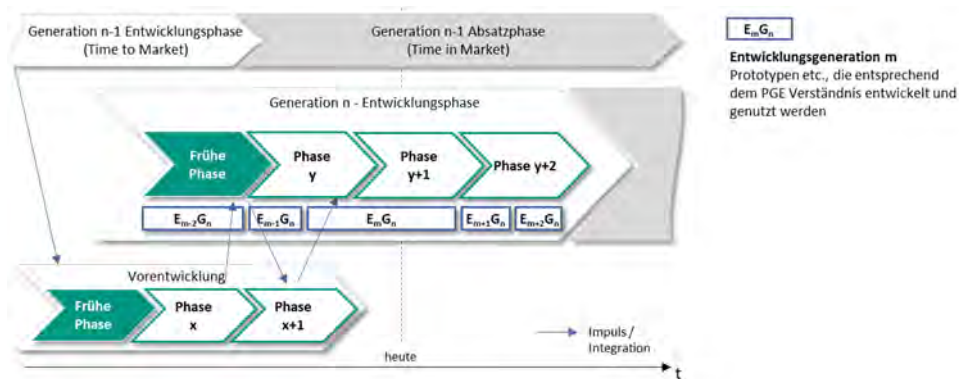


Bild 2: Schematische Darstellung der „Frühen Phasen“ einer Produktgenerationsentwicklung und der dazugehörigen Vorentwicklung eines (Teil-)Systems

Im Rahmen eines Vorentwicklungsprojektes ist es darüber hinaus möglich, dass es einzelne Phasen (Phase x) gibt, die - obwohl zeitlich früher gelegen als die „Frühe Phase“ der neuen Produktgeneration – nicht als „Frühe Phase“ bezeichnet werden können, da sie nicht deren Spezifika aufweisen. Dabei sind zu diesem Zeitpunkt die Produktspezifikationen, die im Rahmen eines Vorentwicklungsprozesses umgesetzt werden, lediglich hinsichtlich des Vorentwicklungsprojektes bewertet. In der „Frühen Phase“ der neuen Produktgeneration bleibt schließlich zu evaluieren, ob eine Integration der Ergebnisse der Vorentwicklung in die neue Produktgeneration möglich ist und in den nachfolgenden Phasen der Entwicklung für die Produktgeneration weiterentwickelt werden kann (Heismann und Maul 2012). Die vorangegangenen Betrachtungen verdeutlichen, dass sich der Begriff „Frühe Phase der PGE“ vom Begriff des „front loadings“ (Thomke und Fujimoto 2000) abgrenzt. „Front loading“ meint, dass bestimmte Aktivitäten in früheren Phasen als bisher durchgeführt werden (z. B. Phase y+1 statt y+2).

5 Unterstützung der „Frühen Phase“ der Produktgenerationsentwicklung

5.1 Differenzierungsmerkmale neuer Produktgenerationen

Als gängige Differenzierungsmerkmale zur ausreichenden Abgrenzung einer neuen Produktgeneration von den jeweiligen Referenzprodukten lassen sich beispielsweise Funktionalität, Leistung, Kosten oder optische Merkmale nennen. Dabei ist die Spezifikation dieser Merkmale bereits in der „Frühen Phase“ einer PGE von entscheidender Bedeutung, da durch sie das Zielsystem der neuen Produktgeneration definiert wird.

An eben dieser Stelle entfalten sich die Potentiale der PGE in der „Frühen Phase“. So lässt sich mit Hilfe von analytischen Ansätzen abschätzen, welche der Teilsysteme der vorangegangenen Generation zur Erfüllung der neuen Funktionen in Gestalt- und Prinzip variiert werden müssen. Entsprechend lassen sich die übrigen Teilsysteme als Übernahmevariation in die neue Produktgeneration transferieren. Dabei sind die Variationen nicht nur auf physische Teilsysteme beschränkt, sondern beziehen sich gleichfalls auch auf Softwaresysteme. Die Betrachtung im Sinne der PGE ermöglicht es damit, bereits in der „Frühen Phase“ eine Priorisierung und Fokussierung auf die relevanten Teilsysteme vorzunehmen und die Unsicherheit nachhaltig zu reduzieren.

Ein Beispiel für eine strategische Planung lässt sich in der Automobilindustrie finden. OEMs teilen die Entwicklung von Produkten gezielt in Generationen ein, u.a. um mit jeder Produktgeneration eine kontinuierliche Auslastung der Ressorts sicherzustellen. So folgt auf eine neue Produktgeneration mit hohem Neuentwicklungsanteil meist eine weitere Produktgeneration mit geringerem Neuentwicklungsanteil („Facelift“). Anhand definierter Differenzierungsmerkmale und entsprechender

Methoden lassen sich Teilsysteme identifizieren, die für eine neue Produktgeneration überarbeitet werden müssen. Dabei ist der Zielkonflikt aufzulösen, dass auf der einen Seite so viele Differenzierungsmerkmale vorhanden sein müssen, dass die neue Produktgeneration die erwarteten Verkaufszahlen erreichen kann, auf der anderen Seite aber sichergestellt werden muss, dass das Entwicklungsrisiko durch zu große Neuentwicklungsumfänge nicht zu sehr gesteigert wird. Methodisch kann dies durch Zielvorgaben in Verbindung mit Portfoliodarstellungen unterstützt werden. (vgl. Bild 3 a)).

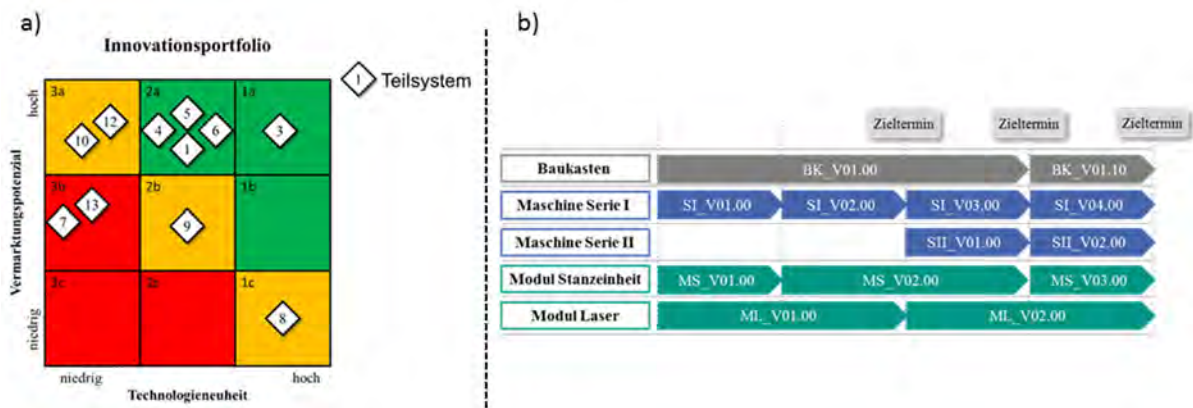


Bild 3: a) Einordnung von Teilsystemen einer neuen Produktgeneration in ein Innovationsportfolio (Heismann 2010); b) Beispielhafte Darstellung einer ganzheitlichen Serienstandsplanung

Das dort gezeigte Portfolio wird zur strategischen Festlegung von neuen Produktgenerationen verwendet: Von den Teilsystemen einer neuen Produktgeneration muss jeweils eine bestimmte Mindestanzahl in einem der unterschiedlichen Bereiche liegen. Diese Mindestanzahl ist dabei für Facelifts geringer als für Produktgenerationen mit hohem Neuentwicklungsanteil. Überlegungen zur strategischen Planung von Produktgenerationen betreffen aber keineswegs nur Differenzierungsmerkmale, die das Produkt aus Kundensicht von Vorgängergenerationen absetzen. Auch Potentiale, die vor allem dem Hersteller zugutekommen bzw. in manchen Fällen für ihn sogar unumgänglich sind, wie beispielsweise gesenkte Produktionskosten, müssen berücksichtigt bzw. als Ziele eingeplant werden. Sind sowohl kunden- als auch unternehmensorientierte Potentiale bzw. Ziele bekannt, können diese außerdem systematisch auf mehrere Produktgenerationen verteilt werden. Für die einzelnen Produktgenerationen wird damit ein möglichst optimales Verhältnis von Entwicklungsaufwand und wirtschaftlichem Nutzen angestrebt. Ein Beispiel hierfür ist bei der PGE des ZMS der Übergang von Oberklassen-Segment-Anwendungen hin zu Mittelklasse-Anwendungen (Albers et al. 2016a). Dieser Übergang ist konstruktiv zwingend mit dem Übergang vom Hinterradantrieb hin zum typischen Front-Quer-Antriebsstrang-Konzept dieser Fahrzeugsegmente verbunden. In der Folge wurden neue Technologien für die bauraumoptimierte Darstellung der Torsionsdämpferfunktion benötigt, da der axiale Bauraum für das Kupplungssystem extrem begrenzt ist. Gleichzeitig musste nun der höheren zu erwartenden Stückzahl und dem damit verbundenen niedrigeren Preispotential Rechnung getragen werden. Dies ließ sich nicht zuletzt durch völlig neue Fertigungstechnologien in der Blechumformung erreichen. Die Produktplanung eines Werkzeugmaschinenherstellers ist ein weiteres Beispiel für die strategische Planung von Produktgenerationen. Dieser plant auf Basis einer kontinuierlichen Baukastenentwicklung (im Sinne von Albers et al. (2015b)) neue Produktgenerationen von Werkzeugmaschinen so, dass diese jeweils rechtzeitig zu definierten Zielterminen (z. B. Messen) vorgestellt werden können. Die Teilsysteme der neuen Produktgenerationen basieren dabei auf Modulen eines Baukastens, die ebenfalls dem Ansatz der PGE folgen. So werden die Module (wie z.B. Stanzeinheit und Laser) gezielt so entwickelt, dass sie über einen definierten Zeitraum im Baukasten genutzt werden können, bevor sie durch eine neue Produktgeneration des Moduls ersetzt werden. (vgl. Bild 3 b)).

5.2 Einschätzung des Technischen Entwicklungsrisikos

Am Ende der „Frühen Phase“ ist die Produktspezifikation zu bewerten, die u.a. Informationen zu den zu verwendenden Technologien und Teilsystemen beinhaltet. Wie zuvor gezeigt, kann mit dem PGE-Ansatz ein gesteigerter Reifegrad als Bewertungsgrundlage erreicht werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie auf der Basis von Referenzprodukten, Übernahme- und Neuentwicklungsanteilen eine Abschätzung des Entwicklungsrisikos sowie der benötigten Ressourcen erfolgen kann. Bereits in der Zielsystembildung können verschiedene „Arten“ von Referenzprodukten unterschieden werden, insbesondere unternehmenseigene und unternehmensfremde (vgl. Albers et al. 2016b und Albers et al. 2016d). Für eine gesamte Produktgeneration können mehrere Produkte Referenzprodukt sein, z.B. gleichzeitig ein firmeneigenes Vorgängerprodukt und ein Wettbewerberprodukt.

Daher wird die Art bzw. Herkunft des jeweiligen Referenzproduktes als ein Einflussfaktor betrachtet, aus dem sich das Entwicklungsrisiko abschätzen lässt: So sind für unternehmensfremde Referenzprodukte in der Regel nur die Produkte als solche, nicht aber explizite Zielsysteminhalte verfügbar (Albers et al. 2016b). Das gilt meist auch für explizites oder implizites Erfahrungswissen. Somit ist im Unternehmen u.U. zunächst nicht das erforderliche Wissen vorhanden, um die Funktionserfüllung des geplanten Produkts sicherstellen zu können. Da fehlendes Wissen, z. B. durch entsprechende Validierungsaktivitäten generiert oder in Form erforderlicher Kompetenzträger organisiert und integriert werden muss, hat die Herkunft von Referenzprodukten auch unmittelbare wirtschaftliche Implikationen.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Entscheidung, ob ein Teilsystem übernommen oder durch Gestalt- oder ggf. auch Prinzipvariation neu entwickelt werden soll. In ähnlicher Weise wie bei firmenfremden Referenzprodukten muss hier ggf. bereits frühzeitig zusätzlicher Validierungsaufwand eingeplant werden. Darüber hinaus kann eine Neuentwicklung auch Auswirkungen auf das Produktionssystem haben, wenn Anlagen möglicherweise angepasst, neu beschafft oder entwickelt werden müssen. Des Weiteren ist zu bedenken, dass eine Prinzipvariation stets mit einer Neugestaltung und damit Gestaltvariation einhergeht. Der daraus resultierende Entwicklungsaufwand ist ebenfalls zu berücksichtigen. Trägt man die Dimensionen „Neuentwicklungsanteil (GV + UV)“ und „Herkunft des Referenzprodukts“ gegeneinander auf und berücksichtigt den Zusammenhang zum Entwicklungsrisiko, ergibt sich das Portfolio in Bild 4.

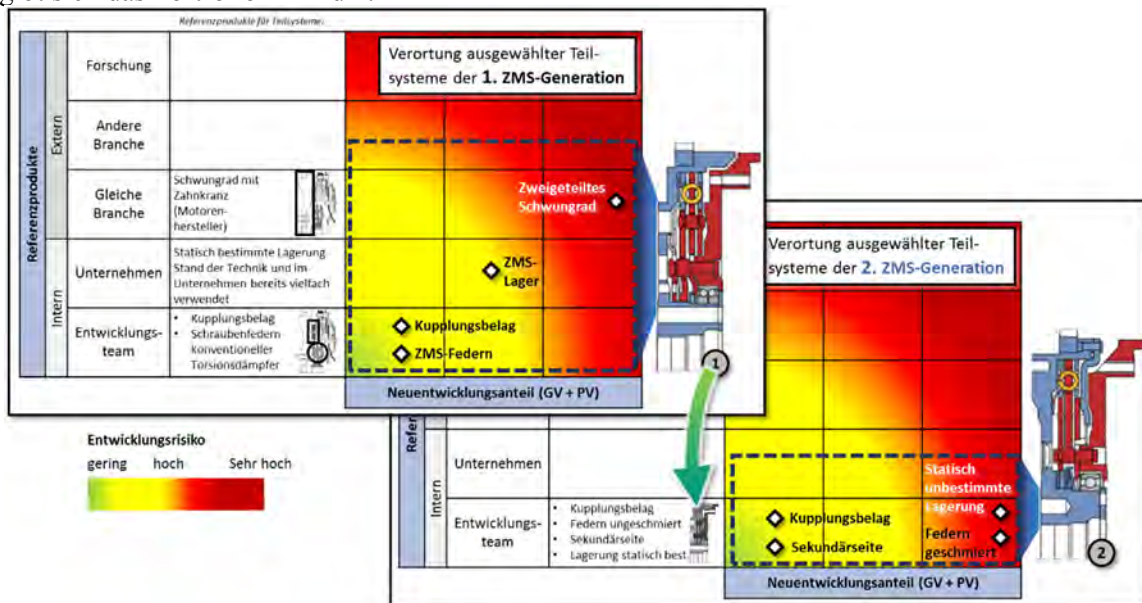


Bild 4: „Risiko-Portfolios“ für ausgewählte Teilsysteme der ersten und zweiten ZMS-Generation. Risiko auf Basis von Neuentwicklungsanteil (GV + PV) und Herkunft des Referenzprodukts

Zu beachten ist, dass diese Darstellung vor allem Tendenzen zeigt. Die Untersuchung einer ausreichenden Menge an Fallbeispielen für eine empirisch fundierte Quantifizierung ist noch

Gegenstand laufender Forschungsarbeiten. Das Portfolio wurde in einem realen Entwicklungsprojekt bereits erfolgreich angewandt. Da sich das dazugehörige technische System derzeit in der Patentanmeldung befindet, wird die Vorgehensweise zur Veranschaulichung retrospektiv am Beispiel des ZMS angewandt. In Bild 4 ist zu sehen, wie in den verschiedenen Produktgenerationen der Aufwand zur Neuentwicklung und damit einhergehend auch das Risiko auf unterschiedliche Teilsysteme fokussiert wird. Gleichzeitig erkennt man, dass Teilsysteme nach erfolgter Neuentwicklung in weiteren Produktgenerationen eher übernommen als nochmals neu entwickelt werden. Als Ergebnis der unternehmenseigenen Entwicklungsarbeit bewegt sich daher die Einordnung von Teilsystemen über Produktgenerationen hinweg durch das Portfolio hin zu Bereichen geringeren Risikos. Ein weiterer Grund für eine geänderte Einordnung von Teilsystemen kann sein, dass andere Unternehmen Technologien weiterentwickeln und in Produkten umsetzen. Dadurch liegen dann Referenzprodukte beispielsweise nicht mehr nur in der Forschung vor, sondern können aus einer anderen oder sogar der eigenen Branche stammen. Gleichzeitig kann die erforderliche Variation ebenfalls mit weniger Risiko behaftet sein. Im bereits zuvor erwähnten aktuellen Entwicklungsprojekt konnte so beispielsweise Bluetooth-Technologie einfach zugekauft und als Übernahmevariation verwendet werden, die vor einigen Jahren in dieser Form noch nicht erhältlich war und daher hätte neu entwickelt werden müssen. Während der Neuentwicklungsanteil (GV + PV) in der „Frühen Phase“ der PGE für einzelne Teilsysteme, basierend auf funktionalen Überlegungen, teilweise noch abgeschätzt werden muss, lässt sich im fortschreitenden Entwicklungsprozess – u.a. mittels Funktions-Gestalt-Modellen auf Basis des C&C²-Ansatzes – eine genauere Analyse und damit auch Risikoüberwachung und –steuerung vornehmen. Dabei kann letztlich das Risiko für eine bestimmte Variationsart sehr unterschiedlich sein, abhängig davon, wie groß der Umfang der Variation ist. Die Reduktion eines Wälzlagerdurchmessers (GV) kann z. B. geringfügig und damit verhältnismäßig risikoarm sein. Ist die Reduktion jedoch erheblich, so wie beispielsweise bei der Entwicklung einer ZMS-Generation, die auch in den kleineren Bauräumen von Mittel- und Kompaktklasse eingesetzt werden konnte, resultiert daraus ein deutlich höheres Risiko.

6 Fazit & Ausblick

Die „Frühe Phase“, wie hier für die PGE definiert, beschreibt den realen Sachverhalt von Entwicklungsprozessen klarer und ist im Verhältnis zu etablierten Definitionen im Kontext des Innovationsmanagements deutlich umfangreicher und zeitlich länger. Die Begründung für die neue Definition ergibt sich aus der Notwendigkeit, valide Entscheidungen über ein Entwicklungsprojekt treffen zu können. Wesentliche Grundlage ist hier die Spezifikation mit Angaben zu Referenzprodukten, Übernahme- und Neuentwicklungsanteilen. Durch die systematische Verwendung von Referenzprodukten kann so das Entwicklungsrisiko gesenkt und Ressourcen können eingespart werden. Auf diese Weise lässt sich die PGE nutzen, um strategisch Produkte zu planen und ihr Risiko zu steuern. Mit dem Ansatz eines „Target Risking“, analog zum „Target Costing“ und „Target Weighing“ (Albers et al. 2013), kann so beispielsweise festgelegt werden, für welche Alleinstellungsmerkmale Neuentwicklungsaufwand bei einer Produktgeneration eingeplant werden soll. Über die Planung einzelner Generationen hinaus lassen sich Übernahme- und Neuentwicklungsanteile generationsübergreifend planen. So kann eine ausreichende Differenzierung der neuen Produktgeneration (G_n) zu Vorgängergenerationen erreicht werden, während unnötiger Entwicklungsaufwand reduziert wird bzw. Ressourcen frühzeitig auf die Entwicklung der übernächsten Produktgeneration fokussiert (G_{n+1}) werden. Erste Untersuchungen zeigen, dass sich das Konzept der PGE nicht nur für der Entwicklung von Produkten im klassischen Sinne sondern auch der Entwicklung komplexer Systeme zugrunde legen lässt. So wurden beispielsweise neue Geschäftsmodelle oder auch System-of-Systems (wie der Connected Car) modelliert. In weiteren Forschungsarbeiten wird der Ansatz der PGE systematisch im Sinne einer SGE – Systemgenerationsentwicklung weiter ausgebaut. Beim Infiniti-Motor handelt es sich um eine „radikale Innovation“, die als Entwicklung einer neuen Produktgeneration beschrieben werden kann. Auf Basis bestehender Motoren als Referenzprodukten wurde eine neue Produktgeneration entwickelt, die einen hohen Anteil an Prinzip- und Gestaltvariation

bei der Verstellung des Pleuels besitzt. Der Infiniti-Motor wurde zunächst im Rahmen eines Vorentwicklungsprojekts konzipiert und anschließend gezielt in die Entwicklung eines Fahrzeugs integriert. Sowohl das Fahrzeug als auch der Motor besitzen eine eigene „Frühe Phase“ der PGE. Beide können auf Basis bestehender Referenzprodukte frühzeitig validiert werden. Dadurch kann eine valide Bewertung der zu entwickelnden technischen Lösung erfolgen und jeweils in einen eigenen Produktentstehungsprozess überführt werden.

Literaturverzeichnis

- Albers et al. 2011 ALBERS, A.; LOHMEYER, Q.; EBEL, B.: Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects. In: S. J. Culley, B. J. Hicks, T. McAlloone, T. J. Howard und A. Dong (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED 11* (2011), S. 256–265.
- Albers et al. 2013 ALBERS, A.; WAGNER, D.; RUCKPAUL, A.; HESSENAUER, B.; BURKARDT, N.; MATTHIESEN, S.: Target Weighing - a new approach for conceptual light-weight design in early phases of complex systems development. *International Conference on Engineering Design ICED13* (2013).
- Albers und Wintergerst 2014 ALBERS, A.; WINTERGERST, E.: The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: A. Chakrabarti und L.T.M. Blessing (Hrsg.): *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Exploration*. London: Springer, 2014
- Albers et al. 2015a ALBERS, A.; BURSAC, N.; WINTERGERST, E.: Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: H. Binz und B. Bertsche (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015* (2015).
- Albers et al. 2015b ALBERS, A.; SCHERER, H.; BURSAC, N.; RACHENKOVA, G.: Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development - Two Case Studies. In: M. Shpitalni, A. Fischer und G. Molcho (Hrsg.): *Procedia CIRP* (2015).
- Albers et al. 2016a ALBERS, A.; BURSAC, N.; RAPP, S.: PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: *Forschung im Ingenieurwesen 81(1)*, S. 13–31. DOI: 10.1007/s10010-016-0210-0 (2017 print, online 2016)
- Albers et al. 2016b ALBERS, A.; HAUG, F.; HEITGER, N.; ARSLAN, M.; RAPP, S.; BURSAC, N.: Produktgenerationsentwicklung - Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen Produktentwicklung. In: J. Gausemeier (Hrsg.): *Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung 2016*. Berlin. Paderborn, S. 227–242.
- Albers et al. 2016c ALBERS, A.; WALCH, M.; BURSAC, N.: Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung. In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (1/2016).
- Albers et al. 2016d ALBERS, A.; GLADYSZ, B.; HEITGER, N.; WILMSEN, M.: Categories of product innovations – A prospective categorization framework for innovation projects in early development phases based on empirical data. *Procedia CIRP* (2016)
- Bursac 2016 BURSAC, N.: Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerations-

- entwicklung. In: A. Albers (Hrsg.): *IPEK - Forschungsberichte*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Dissertation, 2016.
- Cooper und Kleinschmidt 1993 COOPER, R. G.; KLEINSCHMIDT, E. J.: Screening new products for potential winners. In: *Long Range Planning* 26 (6) (1993), S. 74–81.
- Earl et al. 2005 EARL, C.; JOHNSON, J.; ECKERT, C. M.: Complexity. In: P. J. Clarkson und C. M. Eckert (Hrsg.): *Design process improvement: A review of current practice*. 1. Aufl. London: Springer, 2005.
- Galbraith 1973 GALBRAITH, J. R.: *Designing complex organizations*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co, 1973.
- Harrer et al. 2013 HARRER, M.; GÖRICH, H.-J.; REUTER, U.; WAHL, G.: 50 Jahre Porsche 911 Optimierung von Fahrwerkregelung und Bremssystemen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 115 (12/2013), S. 962–969.
- Heismann und Maul 2012 HEISMANN, R.; MAUL, L.: Mit systematischem Innovationsmanagement zum Erfolg. In: S. Ili (Hrsg.): *Innovation Excellence: wie Unternehmen ihre Innovationsfähigkeit systematisch steigern*: Symposium Publishing GmbH, 2012.
- Henderson und Clark 1990 HENDERSON, R.; CLARK, K.: Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. In: *Administrative science quarterly* (1990), S. 9–30.
- Khurana und Rosenthal 1997 KHURANA, A.; ROSENTHAL, S.: Integrating the Fuzzy Front End of New Product Development. In: *Sloan Management Review* (6/1997), S. 103–120.
- Koen et al. 2001 Koen, P.; Ajamian, G.; Burkart, R.; Clamen, A.; Davidson, J.; D’amore, R. et al.: Providing Clarity and a Common Language to the Fuzzy Front End. In: *Research-Technology Management* Vol. 2001 (2001), S. 46–55.
- Lindemann und Lorenz 2008 LINDEMANN, U.; LORENZ, M.: Uncertainty Handling in Integrated Product Development. In: D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic und N. Bojetic (Hrsg.): *Proceedings of the 10. International Design Conference* (2008)
- Pahl et al. 2007 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- Spiegel Online 2016 PANDER, J.: Diese Zylinder können zaubern.
<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/infiniti-motor-vc-turbo-diese-zyylinder-koennen-zaubern-a-1122724.html>, zuletzt Geprüft 15.02.2017.
- Thomke und Fujimoto 2000 THOMKE, S.; FUJIMOTO, T.: The Effect of Front-Loading Problem-Solving on Product Development Performance. In: *Journal of Product Innovation Management* 17 (2/2000), S. 128–142.
- Verworn 2005 VERWORN, B.: Die frühen Phasen der Produktentwicklung: Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Gabler Edition Wissenschaft : Forschungs-, Entwicklungs-, Innovations-Management), 2005.
- Weck et al. 2007 WECK, O. DE; ECKERT, C. M.; CLARKSON, P. J.: A Classification of Uncertainty for Early Product and System Design. In: J.-C. Bocquet (Hrsg.): *Proceedings of the 16. International Conference on Engineering Design ICED07* (2007).

Zielkonfliktidentifikation zwischen Design, Technik und Ergonomie – Ein Beitrag zur Lösungsfindung am Beispiel der PKW-Maßkonzeption

Petia Krasteva¹, Theodoros Tzivanopoulos², Thomas Vietor¹, David Inkermann¹

¹Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik, Braunschweig, Deutschland
p.krasteva@tu-braunschweig.de; t.vietor@tu-braunschweig.de;
d.inkermann@tu-braunschweig.de

²Volkswagen AG (Konzernforschung), 38436 Wolfsburg, Deutschland
theodoros.tzivanopoulos@volkswagen.de

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Identifikation fachübergreifender Zielkonflikte in der frühen Phase der Fahrzeugkonzeption. Fokussiert wird das Spannungsfeld der Entwicklungsdisziplinen Design, Technik und Ergonomie, die durch ihre Interaktion die Gestalt des Gesamtfahrzeugkonzepts wesentlich bestimmen. Ausgehend von fachspezifischen Zieleigenschaften werden bestehende Verifikationsmodelle zur Abbildung ästhetischer, technischer und ergonomischer Eigenschaften vorgestellt und die Verknüpfung dieser Modelle in etablierten Vorgehensweisen und Werkzeugen diskutiert. Hieraus wird der Handlungsbedarf zur Verbesserung der Kommunikation bspw. durch Nutzung integrierter Modelle abgeleitet. Mit dem Fokus auf Design-bestimmende Elemente und Verhältnisse und einer rudimentären PKW-Maßkettenberechnung unter Berücksichtigung ergonomischer Eigenschaften wird ein Ansatz zur Zielkonfliktidentifikation in der frühen Fahrzeugkonzeption vorgestellt. Der Ansatz wird anhand eines Fahrzeugkonzepts für das automatisierte Fahren verdeutlicht.

Keywords:

Zielkonflikte, Fahrzeugkonzeption, PKW-Maßkonzeption, Design-DNA

1 Einleitung

Ein Zielkonflikt bezeichnet „die wechselseitige, sachbegründete Abhängigkeit von wenigstens zwei Zielen (Anforderungen) zueinander, wobei die (graduelle) Erfüllung eines Ziels zwangsweise die Erfüllung des anderen Ziels (der anderen Anforderungen) behindert bzw. hemmt“ (Eiletz 1999, S.15). Zielkonflikte entstehen während der Fahrzeugkonzeption als Folge des Zielsystems und können anhand verschiedener Modelle identifiziert werden. Neuartige Nutzungsmöglichkeiten der Fahrzeuge, bspw. ermöglicht durch automatisiertes Fahren, setzen zurzeit eine grundlegende Anpassung der Fahrzeuginnenraumarchitektur (sowohl People- als auch Mechanical-Package) voraus, wodurch sich auch die ästhetischen Merkmale der einzelnen Fahrzeugklassen verändern. Dadurch wird oftmals die individuelle, markenspezifische Gestaltkennzeichnung – die Design-DNA der Fahrzeugfamilie – beeinflusst. Bleibt die Veränderung der Design-DNA bei der Maßkonzeption unberücksichtigt, können Fehlinterpretationen der ursprünglichen ästhetischen Zieleigenschaften wie bspw. disharmonische Wirkung des Gesamtfahrzeugs hervorgerufen werden (Krasteva et al. 2016). Die entstehenden disziplinübergreifenden Wechselwirkungen zu erkennen und die Zielkonflikte zu bewältigen ist eine Herausforderung, welche zukünftig aufgrund steigender Anforderungen bspw. des Fahrers, des Verkehrssystems und der Umwelt einen noch größeren Stellenwert einnehmen wird (Braess 1992), (Pischinger und Seiffert 2016).

Vor diesem Hintergrund schlägt der Beitrag einen methodischen Ansatz zur Unterstützung der Kommunikation und der Kompromissfindung zwischen den Entwicklungsdisziplinen Design und Technik unter Berücksichtigung ergonomischer Anforderungen der Insassenhaltung vor. Die folgenden Forschungsfragen bilden den Rahmen des Beitrags:

- Welche ästhetischen Merkmale müssen neben dem People- und dem Mechanical-Package während der PKW-Maßkonzeption berücksichtigt werden, um die Fortführung der charakteristischen Gestaltkennzeichnung einer Fahrzeugfamilie sicherzustellen?

- Welches Vorgehen ist bei der Maßkonzeption zielführend, um trotz rudimentärer, geometrischer Fahrzeuginformationen ein konsistentes PKW-Maßkonzept zu generieren?
- Wie können Relationen zwischen Identität-bestimmenden Merkmalen und relevanten Maßketten der frühen PKW-Maßkonzeption zur Identifikation von Zielkonflikten abgebildet werden?

Hierzu werden die ästhetischen, technischen und ergonomischen Zieleigenschaften betrachtet und aktuelle Möglichkeiten zur Zielkonfliktfindung durch fachübergreifende Modellverknüpfungen in der frühen Phase der Fahrzeugkonzeption vorgestellt (Abschnitt 2). Daraus leitet sich der aktuelle Handlungsbedarf ab, eine durchgängige Verknüpfung der Design-, Technik- und Ergonomiebestimmenden Merkmale durch geeignete Modelle zu erarbeiten. Durch die Beantwortung der Forschungsfragen wird schrittweise ein methodischer Ansatz zur disziplinübergreifenden Identifikation von Zielkonflikten während der frühen PKW-Maßkonzeption erarbeitet (Abschnitt 3). Abschließend erfolgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick (Abschnitt 4).

2 Die Fahrzeugkonzeption

Die Fahrzeugkonzeption umfasst sämtliche Aufgaben, die zu Beginn des Produktentstehungsprozesses erforderlich sind, um einen konstruktiven Entwurf in Form einer ersten Produktidee und deren Realisierbarkeit darzustellen (Braess und Seiffert 2007). Ausgehend von einem spezifischen Zielmodell werden durch die beteiligten Entwicklungsdisziplinen (Akteure) sukzessive eigenschaftsspezifische Modelle erarbeitet, bewertet, zusammengeführt, detailliert und angepasst, bis eine optimale Gesamtlösung für das Fahrzeugkonzept entsteht (Bild 1).

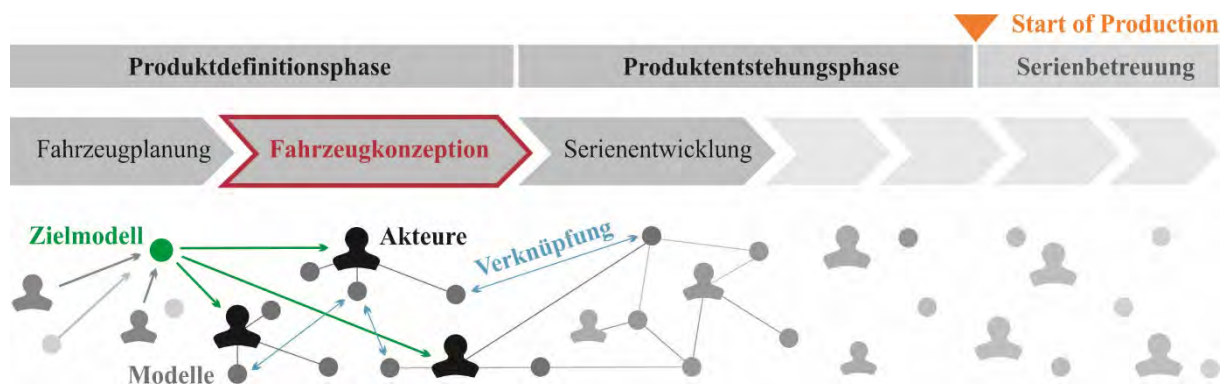


Bild 1: Einordnung der Fahrzeugkonzeption in den Fahrzeugentstehungsprozess nach (Braess und Seiffert 2007) und exemplarische Darstellung der komplexen Zusammenhänge zwischen Zielen, Modellen und Akteuren

Ein besonderes Kennzeichen der Fahrzeugkonzeption ist die disziplinübergreifende Zusammenarbeit zwischen Design, Technik und Ergonomie. Im Abstimmungsprozess zwischen diesen Akteuren gilt es, neben der Einhaltung der ästhetischen Zieleigenschaften die kollisionsfreie Anordnung aller relevanten Fahrzeugkomponenten durch das Package sicherzustellen. Ein wesentlicher Zielkonflikt ergibt sich hierbei oftmals durch den Abgleich zukünftiger Designeigenschaften bei gleichzeitiger Berücksichtigung anspruchsvoller, gesetzlicher Vorgaben auf der einen und der stetig steigenden Forderung nach mehr Insassenergonomie auf der anderen Seite (Pischinger und Seiffert 2016, S. 135). Um einen Überblick über die Entstehung der Zielkonflikte zwischen den Entwicklungsdisziplinen zu bekommen, werden im Folgenden zunächst das Zielmodell und die Zieleigenschaften erläutert.

2.1 Das Zielmodell und die Zieleigenschaften

Zu Beginn der Fahrzeugkonzeption werden sämtliche geforderten Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts in einem Zielmodell erfasst, strukturiert und dokumentiert (Nehuis 2014). Exemplarische Zieleigenschaften innerhalb des Zielmodells sind in Bild 2 dargestellt. Das Zielmodell wird während der Fahrzeugplanung erstellt und als Arbeitsgrundlage zu Beginn der Fahrzeugkonzeption allen

beteiligten Entwicklungsdisziplinen bereitgestellt. Abhängig von den Fachkompetenzen, die für die Erreichung der einzelnen Ziele erforderlich sind, werden Teilaufgaben und Verantwortungen definiert.

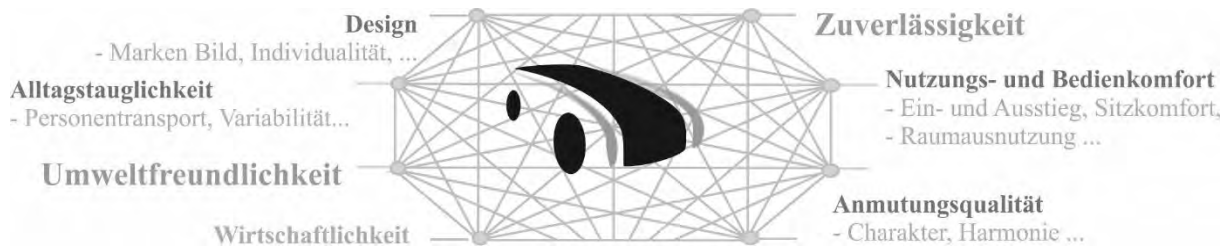


Bild 2: Beispielhafte Zieleigenschaften innerhalb des Zielmodells

Die ästhetischen Zieleigenschaften wie ansprechendes Aussehen, moderne Anmutung, individuelle Erscheinung oder unverwechselbarer Charakter werden durch die Entwicklungsdisziplin Design verantwortet und weiter spezifiziert. Hauptaufgabe ist dabei, die Wahrnehmungsvorgänge der Nutzer vorauszudenken (Gestaltwahrnehmung) und mithilfe visueller Sprache eine vollständige Außen- und Innengestalt zu definieren, sowie individuelle Wiedererkennungsmerkmale zu schaffen (Gestaltkennzeichnung) (Krasteva et al. 2016). Technische Zieleigenschaften wie bspw. hohe Funktionalität, die Erfüllung zukünftiger Gesetzesanforderungen oder eine sehr gute Raumausnutzung für die Insassen sind Kernaufgaben, die durch das technische Fahrzeugkonzept realisiert werden müssen. Die teilweise parallel ausgearbeiteten Teillösungen bspw. für physische Komponenten müssen schließlich in einem funktionstüchtigen und geometrisch abgestimmten Gesamtfahrzeug zusammengeführt werden, das alle geforderten Zieleigenschaften erfüllt (Pischinger und Seiffert 2016). Aufgabe der Disziplin Ergonomie ist es hierbei, die ergonomischen Zieleigenschaften – vorrangig in Bezug auf den Fahrzeuginnenraum – zu beurteilen und durch konstruktive Lösungen zu realisieren. Hierzu zählen, neben einem angenehmen Ein- und Ausstieg und einer komfortablen Sitzhöhe, insbesondere der Bedienkomfort und ausreichende Freiräume für alle vorgesehenen Tätigkeiten der Insassen (Tzivanopoulos und Vietor 2015).

Nach der Verteilung der eigenschaftsspezifischen Kernaufgaben ist zu klären, wie diese von den jeweiligen Disziplinen im weiteren Entwicklungsprozess spezifiziert werden und durch welche methodischen Ansätze aktuell die fachübergreifende Zielkonfliktfindung unterstützt wird.

2.2 Bestehende Ansätze zur Identifikation von Zielkonflikten

Zur Erfassung und Analyse der geforderten Eigenschaften werden während der Fahrzeugkonzeption verschiedene aufgabenspezifische Modelle eingesetzt (Braess und Seiffert 2007). Zweck der Modelle ist es, die komplexen Sachverhalte für die Beteiligten verständlich und überschaubar zu machen und die Informationsmenge auf die wesentlichen aufgabenspezifischen Problembereiche zu reduzieren. Daher sind die Repräsentationsformen und Abstraktionen meist disziplinspezifisch und unterscheiden sich erheblich hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, ihres Informationsumfangs und Detaillierungsgrads. Ein exemplarischer Überblick über die verschiedenartigen Design-, Technik- und Ergonomie-Modelle, während der Fahrzeugkonzeption, ist in Bild 3 dargestellt. Es werden sowohl physische als auch virtuelle Modelle in ebener und räumlicher Darstellung genutzt, die nacheinander oder parallel erarbeitet werden. Beispielsweise werden die physisch erzeugten 2D-Handskizzen vor den 3D-Clay-Modellen, aber meist parallel zu den virtuellen 2D/3D-Package-Modellen und zu der Auslegung der Insassenhaltung, mithilfe von digitalen Menschmodellen erstellt. Um die Konsistenz der disziplinübergreifenden Modelle überprüfen zu können und die Zielkonfliktidentifikation frühzeitig zu ermöglichen, werden einzelne Modelle miteinander verknüpft. Da die jeweils abgebildeten Eigenschaften in der Regel sehr unterschiedlich sind, ist die Zusammenführung nicht immer direkt möglich. Meist ist eine Umwandlung in ein anderes Modell erforderlich, da keine vergleichbaren Modellmerkmale wie bspw. geometrische Größen vorliegen. Ein Beispiel ist die Überführung freier Handskizzen in 3D-CAS-Modelle für die weiterführenden technischen und ergonomischen Validierungen des Fahrzeugkonzepts. Darüber hinaus gelingt es nicht immer die Modelle bidirektional zu verbinden und die Informationen somit wechselseitig zu kommunizieren. Oftmals erfolgt die

Zusammenführung monodirektional, indem Merkmale ausschließlich aus Modell 1 an Modell 2 als Vorgaben weitergegeben werden.

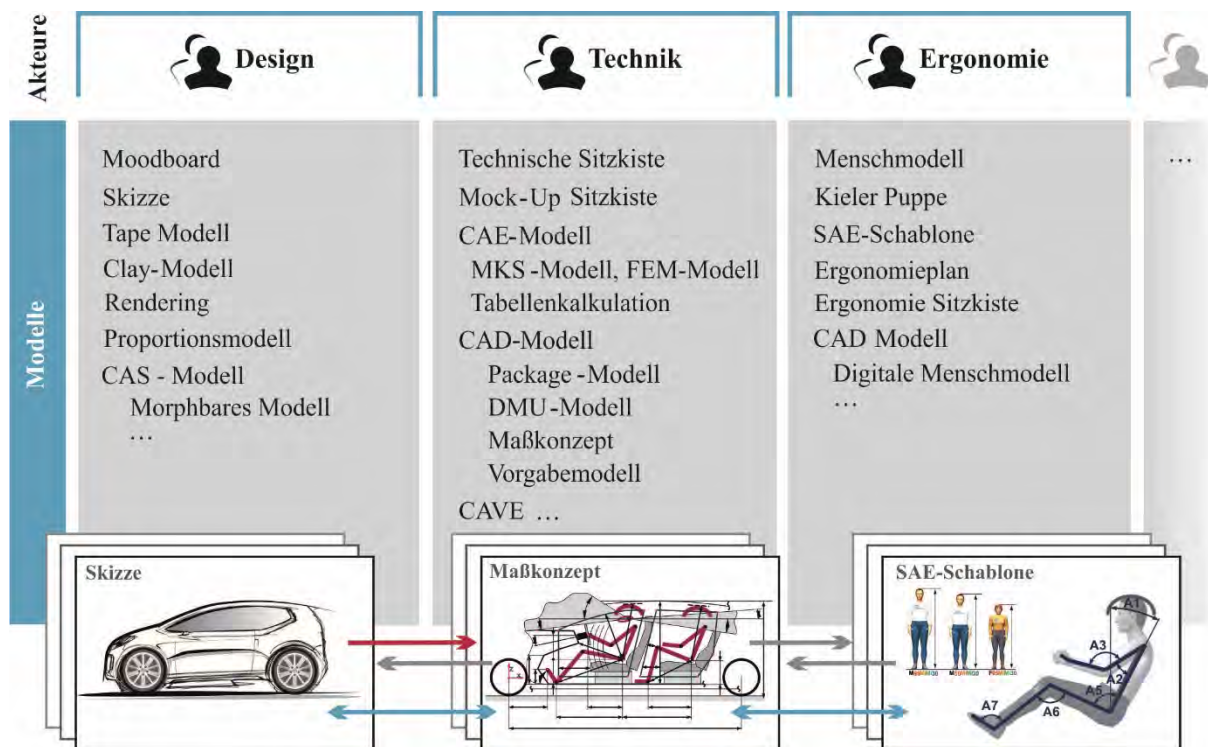


Bild 3: Überblick über die Design-, Technik- und Ergonomie-Modelle

Hilfestellungen zur Verknüpfung von Modellen werden durch verschiedene rechnergestützte Ansätze gegeben. Einige Softwarelösungen wie bspw. *RAMSIS* (Seidl 1995), *Vehicle Occupant Accomodation* oder *Occupant Packaging* legen den Fokus sowohl auf die mono- als auch auf die bidirektionale Zusammenführung von Technik- und Ergonomie-Modellen. Andere Lösungsansätze beziehen auch die Design-Modelle mit in die Betrachtung ein. Ein solcher Ansatz ist bspw. *ConceptCar* (Hillebrandt et al. 2012), in dem neben der Ergonomie (vertreten durch die Kopplung mit digitalen Menschmodellen) und technischen Aspekten des Fahrzeugpackages auch die Möglichkeit der Weitergabe von Informationen an das Design berücksichtigt. Allerdings ist die vorgesehene Verknüpfung ausschließlich monodirektional, weil keine Kommunikation der Design-bestimmenden Merkmale an die Technik und / oder Ergonomie erfolgt. Ein vergleichbarer Ansatz ist bei Müller (Müller 2010) zu finden. Er stellt einen Ansatz zur nutzerzentrierten Generierung von PKW-Maßkonzepten – durch Kopplung von Modellen aus Technik und Ergonomie – als Vorgabe für die ästhetische Innen- und Außengestalt vor. Raabe (Raabe 2013) liefert einen alternativen Vorschlag zur durchgängigen Modellverknüpfung. Er stellt ein rechnergestütztes Werkzeug zur Generierung konsistenter PKW-Maßkonzepte und parametrisierten Designvorgaben vor, unterstützt jedoch nicht die Identifikation von Zielkonflikten hinsichtlich des Fahrzeugdesigns.

Die bestehenden Ansätze unterstützen die Identifikation von Zielkonflikten durch Zusammenführung einzelner Modelle oder Modellteile in der frühen PKW-Maßkonzeption. Allerdings ist hierbei eine durchgängige bidirektionale Verknüpfung von allen drei Modellgruppen nicht vorhanden. Die ästhetischen Merkmale, die die individuellen Erscheinung und Wirkung des Produkts bestimmen, werden derzeit in der bekannten methodischen Hilfsmittel noch nicht berücksichtigt. Weiterhin können ausschließlich konventionelle Fahrzeugarchitekturen, bspw. mit vier in Fahrtrichtung ausgerichteten Insassen, mit den Ansätzen modelliert werden. Grundlegend neue Fahrzeugarchitekturen wie bspw. Fahrzeuginnenraumarchitekturen mit einer Vis-à-Vis-Insassen-Sitzanordnung können mit diesen Konzeptionswerkzeugen aktuell nicht dargestellt werden (Tzivanopoulos et al. 2015). Dies unterstreicht den anfangs beschriebenen Forschungsbedarf und motiviert bei der Lösungssuche nach weiteren Verknüpfungsmöglichkeiten.

3 Ein Ansatz zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen Design, Technik und Ergonomie

Nachdem die Herausforderung der Verknüpfung fachspezifischer Modelle aufgezeigt wurde, wird in diesem Kapitel ein Ansatz zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen Design, Technik und Ergonomie während der PKW-Maßkonzeption vorgestellt. Hierzu werden die in Abschnitt 1 formulierten Forschungsfragen beantwortet. Zunächst wird ein methodischer Ansatz zur Formalisierung der ästhetischen Gestaltmerkmale, die die Identität einer Fahrzeugfamilie bestimmen vorgestellt (Abschnitt 3.1). Mithilfe einfacher Maßkettenberechnungen wird in Abschnitt 3.2 ein Ansatz zur Generierung konsistenter, rudimentärer PKW-Maßkonzepte erläutert. Abschließend wird die Zusammenführung beider Ansätze und die dadurch mögliche Identifikation von Zielkonflikten aufgezeigt (Abschnitt 3.3).

3.1 Ansatz zur Formalisierung der Identität-bestimmenden Gestaltmerkmale

Im Folgenden wird der Fokus auf die quantitative Erfassung der individuellen Gestaltkennzeichnung gelegt. Im Speziellen wird die Erfassung der Grundharmonie am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt erläutert und ein Hilfsmittel zur systematischen Aufbereitung der charakteristischen harmonischen Verhältnisse (Harmonie-Matrix) vorgestellt.

Die Harmonie wird, wie die anderen ästhetischen Eigenschaften auch, durch Gestaltmerkmale - Gestaltelemente und -ordnungen - bestimmt (Löbach 1976), (Weber 2014). Dabei können die visuell wahrnehmbaren Gestaltelemente - Punkt, Linie, Fläche, Körper/Form und Raum - als „Alphabet“ der gestaltbildenden Sprache verstanden werden (Hammad 2013). Weitere allgemein anerkannte Gestaltelemente sind Farbe/Ton und Oberflächenstruktur/Textur. Losgelöst von der Gestalt weisen die einzelnen Gestaltelemente wenig Bedeutung auf. Ihre Semantik ergibt sich erst durch die individuelle Kombination und systematische Anordnung durch den Designer (Löbach 1976). Gezielt genutzt führt die Ordnung zu einer guten Gestalt, zu Gestaltqualitäten und wahrnehmbaren Werten (Schmidt 1956). Aus diesem Grund müssen die strategisch hinterlegte Gestaltelemente und Ordnungsprinzipien während der Fahrzeugkonzeption disziplinübergreifend kommuniziert und berücksichtigt werden. Jede Änderung, bspw. aufgrund eines veränderten People- und/oder Mechanical-Packages, kann die Ursprungsaussage der Gestalt sowie deren Wirkung auf den Betrachter beeinflussen. Durch Missachtung der individuellen Ordnungsprinzipien, bspw. des „Prinzips der Proportionalität“ kann unter anderem eine disharmonische Wirkung des Gesamtfahrzeugs hervorgerufen werden.

Ein methodischer Ansatz zur systematischen Ableitung der Identität-bestimmenden Gestaltmerkmale am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt wurde von *Krasteva* (Krasteva et al. 2016) bereits in vorangehenden Arbeiten beschrieben. Der Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA baut auf Grundlagenkenntnissen aus der Natur auf und zeigt eine neue Perspektive zur syntaktischen Analyse der Designsprache auf (Bild 4 links). Der Fokus des Vorgehens liegt zum einen auf der Identifikation der Gestaltelemente (Schritt 1), zum anderen auf der Ableitung zugrunde liegender Ordnungsprinzipien (Schritt 2) und proportionaler Verhältnisse (Schritt 3). Somit lassen sich bspw. die Fahrzeuge innerhalb einer Fahrzeugfamilie systematisch analysieren und die charakteristische Gestaltmuster sowie -gesetze erfassen, die das individuelle Erscheinungsbild der Fahrzeugfamilie, unter anderem ihrer Harmonie, bestimmen. Die Aufbereitung der abgeleiteten Informationen erfolgt aktuell im einen Design-DNA-Katalog (Bild 4 rechts). Die Zeilen dieses Kataloges entsprechen den drei Schritten des Vorgehensmodells. Die Spalten repräsentieren die allgemeinen Hauptkategorien, in die die visuell wahrnehmbaren Gestaltelemente grundsätzlich unterteilt werden können: Raum, Körper/Form, Linien/Flächen (inkl. Referenzpunkte) und Farbe. Am Beispiel des ersten Gestaltelement „Raum“ (Spalte 1) wird im ersten Schritt (Zeile 1) die geometrische Grundform des zu analysierenden Fahrzeugs betrachtet, hier der Hexaeder und dessen visuelle Zerlegung in Höhe (H), Länge (L) und Breite (W) durch Räder, Sichtflächen und Lichtquellen dargestellt. Als Teilergebnis wird das hinterlegte Raumuster der Grundform qualitativ abgeleitet. Im zweiten Schritt (Zeile 2) werden die spezifischen Ordnungsprinzipien – Gestaltprinzipien wie bspw. „Prinzip der Symmetrie“ - untersucht und mithilfe von Checklisten dokumentiert.

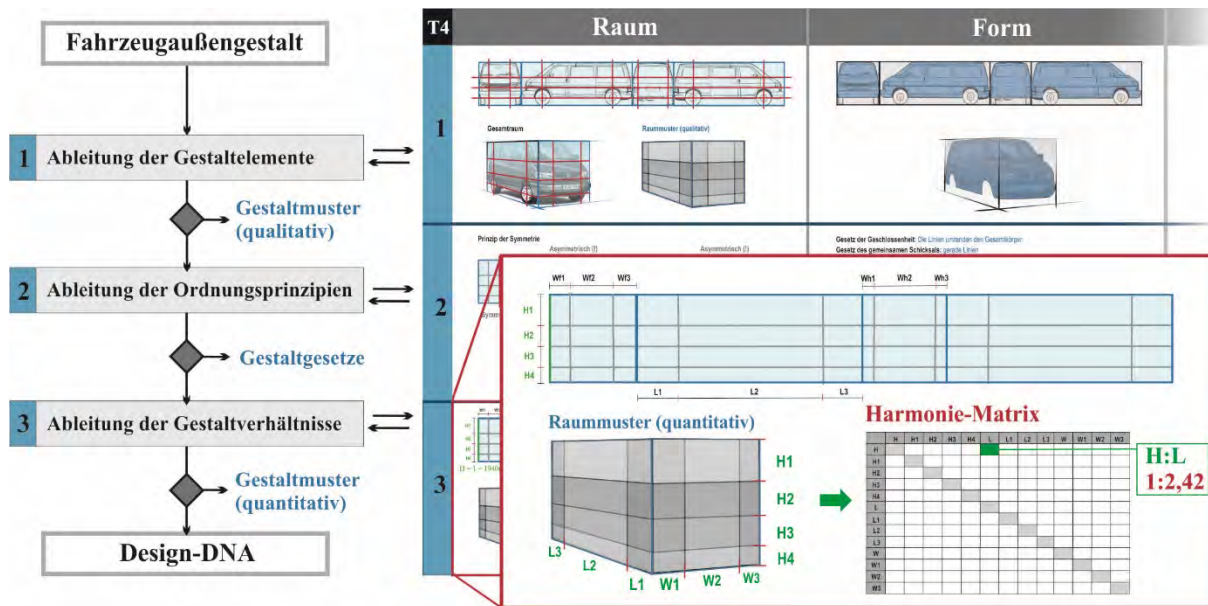


Bild 4: Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA (links) und Ausschnitt aus dem Design-DNA-Katalog am Beispiel der Volkswagen Transporter, Generation 4 (rechts)

Anschließend (Zeile 3) werden die Gestaltverhältnisse des identifizierten Raummusters abgeleitet. Schrittweise werden dazu die Hauptproportionen der Grundform (H:L, H:W, L:W) und alle Nebenproportionen innerhalb des Hexaeders, bspw. zwischen dem Überhang vorne (L1) und dem Radstand (L2), berechnet und in eine symmetrisch aufgebaute Harmonie-Matrix, siehe Bild 4, überführt. In den Zeilen und Spalten der Harmonie-Matrix werden die Gesamthöhe (H), die durch die Zerlegung definierten Teilhöhen (H1, H2, H3, H4), die Gesamtlänge (L), die Teillängen (L1, L2, L3), die Gesamtbreite (W) und die Teilbreiten (W1, W2, W3) eingeordnet und in Verhältnis zueinander gesetzt. Die Berechnung erfolgt nach dem „Prinzip der Proportionalität“, bspw. $H:L=1940:4707=1:2,42$. Die abgeleiteten Zahlenverhältnisse repräsentieren die hinterlegte Grundharmonie. Somit wird eine mathematische Beschreibung des Raummusters ermöglicht und ein Hilfsmittel zur systematischen Erfassung der Informationen von Spalte 1 geschaffen. Die Harmonie-Matrix selbst ermöglicht zum einen die weitere Analyse und Modellierung der individuell hinterlegten Harmonien durch die Designer und zum anderen die Berücksichtigung der harmonischen Gestaltverhältnisse (bspw. als Festforderungen) bei der technischen und ergonomischen Konzeption nachfolgender Produkt-generationen. Eine beispielhafte Möglichkeit zur Einbindung der Harmonie-Matrix in der PKW-Maßkonzeption wird im Abschnitt 3.3 erläutert.

3.2 Vorgehen zur Generierung konsistenter, rudimentärer PKW-Maßkonzepte mithilfe einfacher Maßkettenberechnungen

Das PKW-Maßkonzept beschreibt die maßliche Dimensionierung eines Fahrzeugkonzepts und besteht aus allen dafür notwendigen Abmessungen zur Berücksichtigung technischer und ergonomischer Eigenschaften (Müller 2010). Insbesondere konzeptbestimmende Unstimmigkeiten können anhand eines Maßkonzepts schnell und einfach visualisiert werden. Als zentraler Referenzpunkte für die Bemaßungen und Auslegung werden der Sitzreferenzpunkte (R-Punkt) und die Hüftpunkte (H-Punkt) der Insassen herangezogen. Bezugnehmend auf diesen Punkt lassen sich für alle Insassen sowohl die Sitzhaltung über die Maße H30, L53 und A40 als auch alle Komfortmaße geometrisch beschreiben (Rückschluss auf die Insassenergonomie). Zur Generierung eines konsistenten, rudimentären Maßkonzepts werden in diesem Ansatz insgesamt 50 Maße herangezogen, die sich in 13 technische und 37 ergonomische Maße aufteilen (Bild 5).

Um aus der Vielzahl an Maßen ein konsistentes Maßkonzept zu erhalten, müssen zum einen alle gesetzten Vorgaben an das Fahrzeugkonzept erfüllt und zum anderen die sogenannte Maßketten, die Summe an aneinandergereihten Maßen in einem Maßkonzept, konsistent sein. Bspw. darf die Fahrzeuginnenraummaßkette nicht länger sein als die der Gesamtfahrzeugmaßkette. Es handelt sich

bei den Maßketten um geometrische Gleichungen, worin die Abmessungen (Maße) als Parameter fungieren (Beispiel in Bild 5). Unbekannte Parameter lassen sich mit der richtigen Maßkette anhand der bekannten Parameter berechnen. Ein derartiges Vorgehen wurde in *Bandow und Stahlecker* (Bandow und Stahlecker 2001, S. 913) aufgezeigt und von *Raabe* (Raabe 2013) zur Erstellung konsistenter Maßkonzepte erfolgreich angewandt. In *Tzivanopoulos und Viotor* (Tzivanopoulos und Viotor 2015) wurde der Ansatz von *Raabe* zur Berechnung von Maßen aufgegriffen und als Konglomerat der notwendigen geometrischen Gleichungen in einem mathematischen Gleichungssystem zusammengeführt. Darin definiert jede Spalte einen Parameter des Maßkonzepts und jede Gleichung wird in einer separaten Zeile gelistet. Damit lassen sich alle identischen Parameter aus den unterschiedlichen Gleichungen gleichermaßen miteinander verknüpfen (Bild 5).

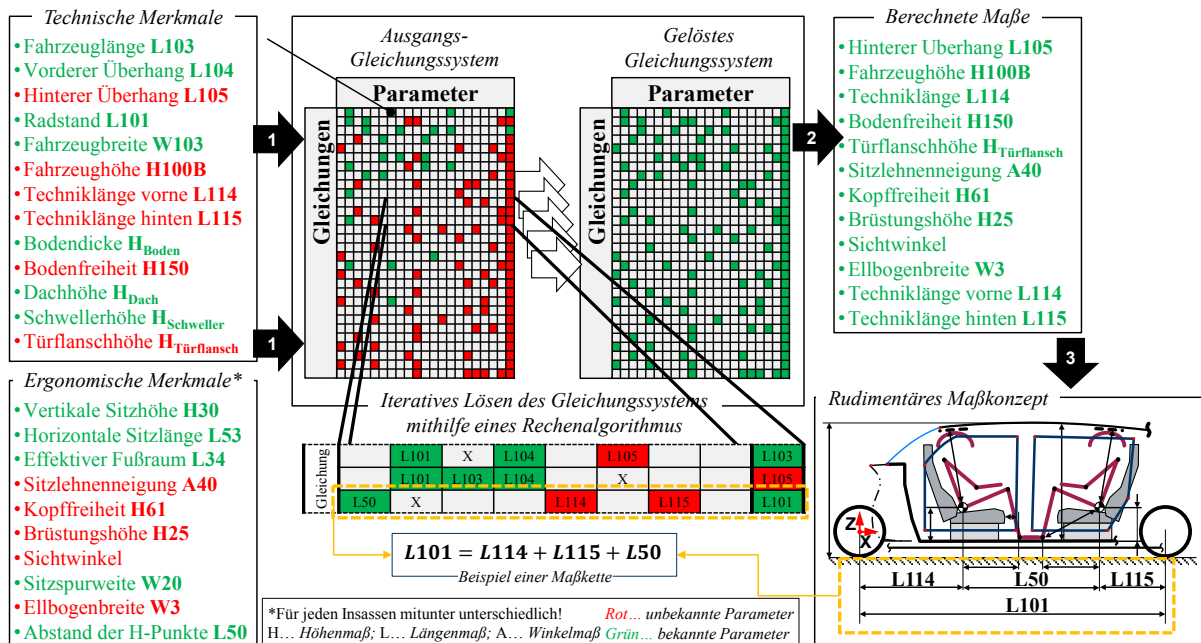


Bild 5: Vorgehen zur Überführung der technischen und ergonomischen Merkmale in ein rudimentäres Maßkonzept mithilfe eines mathematischen Gleichungssystems

Zum Lösen des Gleichungssystems kommt ein Rechenalgorithmus zum Einsatz, der im ersten Schritt (1) alle bekannten Parameter in ein Ausgangsgleichungssystem einbindet und durch sukzessives Berechnen aller hinterlegten Gleichungen das Gleichungssystem löst (gelöstes Gleichungssystem). Je nachdem, wie viele Maße zu Beginn der Berechnung bekannt sind, benötigt der Algorithmus zwischen sechs und acht Iterationsschleifen zum Berechnen aller unbekannt Parameter (Schritt 2). Alle bekannten und berechneten Maße werden in Schritt 3 in einem Maßkonzept dargestellt. Viele der hinterlegten Gleichungen werden dabei nicht direkt zur Berechnung unbekannter Parameter herangezogen, sondern dienen dem Algorithmus als Plausibilisierung (Nebengleichungen). Somit kann nach jedem Iterationsschritt die Konsistenz des Rechenvorgangs geprüft werden. Besteht bei der Berechnung der Parameter keine Übereinstimmung mit den Nebengleichungen, so zeigt der Algorithmus die entsprechenden Maßketten aus und weist diese als technischen Zielkonflikt aus.

Bild 5 zeigt das Vorgehen zur Überleitung von technischen und ergonomischen Merkmalen in ein rudimentäres Maßkonzept, unter Zuhilfenahme eines mathematischen Gleichungssystems, auf. Zur Berechnung der Insassenhaltung im Maßkonzept, beschrieben durch die Maße H30, L53 und A40, werden im vorgestellten Ansatz die Maßketten um sogenannte Metamodelle (Künstliche Neuronale Netze) erweitert. Diese sind im Vorfeld mit Trainingsdaten bekannter Insassensitzhaltungen angeleitet worden und können eine Haltungsberechnung anhand weniger Fahrzeuginnenraumabmessungen durchführen. Daraus lassen sich aufbauend auf der errechneten Sitzhaltung, ergonomische Zielkonflikte (bspw. hervorgerufen durch eine unkomfortable Insassensitzhaltung oder die Unterschreitung von Mindestabmessungen wie bspw. Bewegungsfreiräume) in Form von Maßen identifizieren.

3.3 Zusammenführung der Design- Technik- und Ergonomie-Merkmale

Die Zusammenführung der Ansätze aus Abschnitt 3.1 und 3.2 zu einem übergreifenden Lösungsansatz zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen ästhetischen, technischen und ergonomischen Zieleigenschaften wird in Bild 6 verdeutlicht. Die Zielkonfliktfindung erfolgt dabei auf Grundlage der Verknüpfung fachspezifischer Zielmerkmale, welche die Zieleigenschaften bestimmen. Hierzu wird das harmonische Aufbaumuster aus Abschnitt 3.1 mit dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen technisch-ergonomischen Maßkonzept zusammengeführt. Die proportionalen Verhältnisse aus der Harmonie-Matrix (bspw. $H100B:L103=1:2,42$) werden zunächst in lineare Gleichungen transformiert ($L103=2.42*H100B$) und neben den technischen und ergonomischen Zielmerkmalen als zusätzliche Gleichungen in das Gleichungssystem eingesetzt.

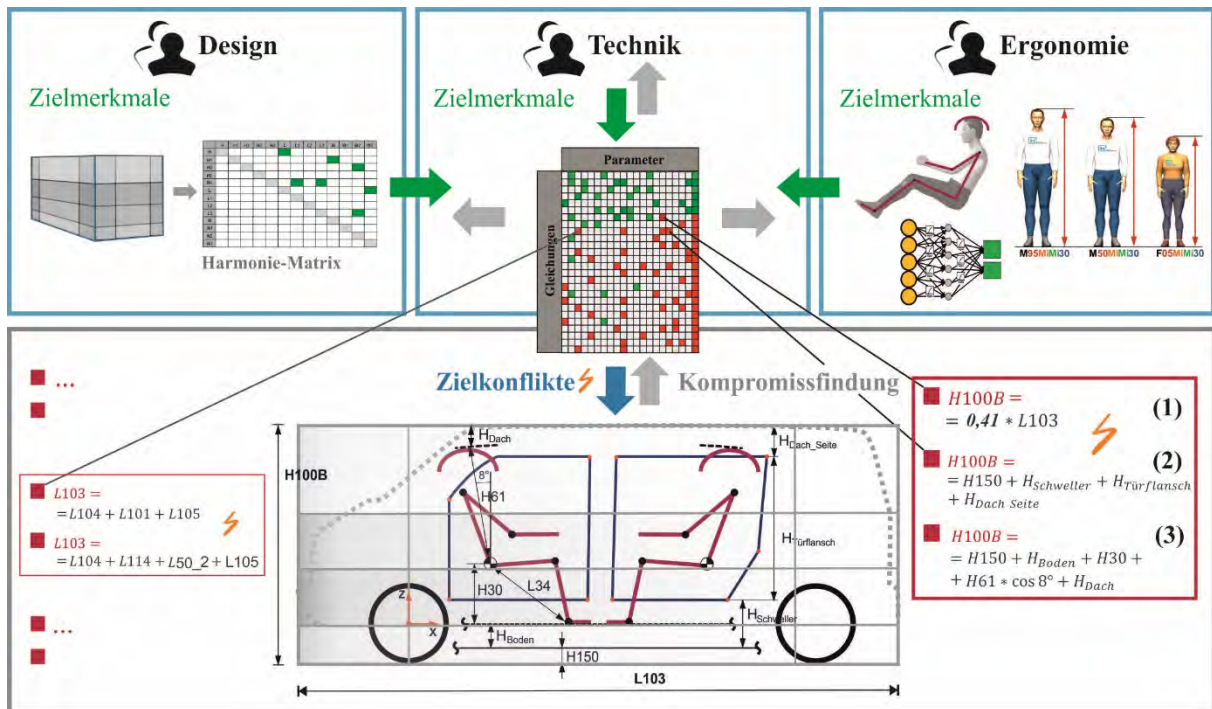


Bild 6: Lösungsansatz zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen ästhetischen, technischen und ergonomischen Zielmerkmalen am Beispiel eines Transporters

Durch diese Erweiterung wird die Berücksichtigung der Design-bestimmenden Proportionen während der technischen Maßkonzeption durchgängig und bidirektional ermöglicht, da der Rechenalgorithmus diese bei der Maßkonzeption mitberücksichtigt. Wesentlich ist die Formulierung der konzeptbestimmenden Zielmerkmale durch die einzelne Entwicklungsdisziplin zu Beginn; bspw. muss die Entwicklungsdisziplin Design entscheiden, welche proportionalen Verhältnisse genau (entweder alle oder nur eine ausgewählte Anzahl) aus der Harmonie-Matrix bei der Gestaltfindung der nächsten Fahrzeuggeneration berücksichtigt werden, um die Fortführung der charakteristischen Harmonie sicherzustellen. Anschließend erfolgt sukzessive die Berechnung des Maßkonzepts, wobei dem Anwender nach Abschluss jedes Rechendurchlaufs die kritischen Gleichungen (Maßketten) aufgezeigt werden, für die anhand der hinterlegten Nebengleichungen und den vordefinierten Zielmerkmalen kein konsistentes Maßkonzept berechnet werden kann. Die identifizierten Zielkonflikte werden sowohl am Beispiel der spezifischen Maßketten, als auch visuell in einem Modell zur Konsistenzüberprüfung dargestellt (siehe Bild 6 unten). Im gezeigten Beispiel lässt sich ein Zielkonflikt bei der Auflösung der Gleichungen (1), (2) und (3) aufgrund einer Inkonsistenz in der Maßkettenberechnung identifizieren, der zwischen Design (harmonischen Aufbaumuster) und Ergonomie (Sitzkomfort) vorliegt. Dabei ist das betroffene Maß die Gesamtfahrzeughöhe ($H100B$). Aus Design-Sicht (Gleichung (1)) soll diese durch die Multiplikation der Gesamtfahrzeughöhe ($L103$) mit dem Faktor der Harmonie definiert werden. Aus Sicht der Ergonomie (Gleichung (2) und (3)) erfolgt die Definition sowohl durch die

äußere Maßkette der Bodenfreiheit (H_{150}), der Schwellerhöhe ($H_{\text{Schweller}}$), der Türflanschhöhe ($H_{\text{Türflansch}}$) und der seitlichen Dachhöhe ($H_{\text{Dach_Seite}}$) als auch durch die innere Maßkette der Bodenfreiheit (H_{150}), der Bodendicke (H_{Boden}), der Sitzhöhe (H_{30}), des effektiven Kopfraums (H_{61}) und der Dachdicke (H_{Dach}). Da die Berechnung nicht konform ist, werden die drei betroffenen Maßketten separat hervorgehoben und Bereiche des Zielkonflikts identifiziert. Die Lösungsfindung fordert in diesem Fall eine Kompromissfindung, die durch die betroffenen Disziplinen hinsichtlich der individuellen Priorisierung der Ziele im Projekt erfolgen muss. Nach Abstimmung und Anpassung der Zielmerkmale läuft die Berechnung erneut und der Prozess wiederholt sich, bis eine konsistente Gesamtlösung für das Gesamtfahrzeugkonzept ermittelt wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein methodischer Ansatz zur Identifikation von Zielkonflikten zwischen den Entwicklungsdisziplinen Design, Technik und Ergonomie (im Speziellen der Insassenhaltung) am Beispiel der PKW-Maßkonzeption vorgestellt. Der Fokus wurde dabei auf die Identifikation und Zusammenführung der Identität-bestimmenden Gestaltmerkmale (Gestaltelemente, individuelle Ordnungsprinzipien und proportionale Gestaltverhältnisse) in einer rudimentären Fahrzeug-Maßkettenberechnung gelegt. Der vorgeschlagene Ansatz unterstützt die fachübergreifende Kommunikation während der frühen Phasen der Konzeptauslegung und ermöglicht die gleichzeitige Berücksichtigung verschiedener ästhetischen, technischen und ergonomischen Zieleigenschaften innerhalb des Zielmodells. Die vorgeschlagene Verknüpfung der Modelle bietet darüber hinaus die Möglichkeit sowohl konventionelle auch unkonventionelle Fahrzeuginnenraumarchitekturen (bspw. mit einer Vis-à-Vis-Insassen-Sitzanordnung) zu betrachten und somit neuartige Zielkonflikte hinsichtlich des Gesamtfahrzeugkonzeptes frühzeitig zu identifizieren.

Aktuelle Beispielanwendungen verdeutlichen, dass der vorgeschlagene Ansatz grundsätzlich anwendbar ist. In zukünftigen Forschungsarbeiten müssen die vorgestellten Vorgehensmodelle (Kapitel 3.1 und 3.2) und die Schnittstelle (Kapitel 3.3) weiter spezifiziert werden. Geplant ist die Bearbeitung weiterer Beispiele, unter anderem von neuartigen Fahrzeugkonzepten, um den beschriebenen Ansatz zu einem praktisch anwendbaren Hilfsmittel weiterzuentwickeln. Auf diese Weise wird es möglich, die Auswirkung neuer Technologien auf das Gesamtfahrzeugkonzept schnell zu analysieren und die neuen konstruktiven Gestaltungsfreiheiten optimal auszunutzen. Des Weiteren sind Arbeiten geplant, bei denen die Verallgemeinerbarkeit des Hilfsmittels untersucht werden soll. Insbesondere die Grenzen des Ansatzes hinsichtlich Aussagegüte der Zielkonfliktidentifikation bei neuen Fahrzeugkonzepten stehen hierbei im Mittelpunkt der Untersuchung. In Fallstudien sollen danach sowohl Anwendbarkeit und die Akzeptanz als auch die Vorteile für den Entwicklungsprozess evaluiert werden.

Literatur

- Bandow und Stahlecker 2001 Bandow, Friedrich; Stahlecker, Hanno: *Ableitung der Hauptabmessungen eines Fahrzeugs*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 10 (2001), 103. Jahrgang, S. 912–921.
- Braess 1992 Braess, Hans-Hermann: *Die Karosserie – ein typisches Beispiel für Zielkonflikte und Zielkonfliktlösungen für Automobile*: In: *Entwicklungen im Karosseriebau. Trends in body engineering*. Düsseldorf: VDI-Verlag (VDI-Berichte, 968), 1992, S. 1–23.
- Braess und Seiffert 2007 Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich (Hg.): *Automobildesign und Technik*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- Eiletz 1999 Eiletz, Richard: *Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte - am Beispiel PKW-Entwicklung*. Technische Universität München, Dissertation, 1999.

- Hammad 2013 Hammad, Farouk 2013: *Dimensionen der Gestaltwerdung. Ein Beitrag zur Systematik der Produktentwicklung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2013.
- Hillebrandt et al. 2012 Hillebrandt, Andreas; Hirz, Mario; Dietrich, Wilhelm: *ConceptCar - Ein Werkzeug für die frühe Konzeptphase zur Konzeptionierung und Bewertung von Fahrzeugen*. In: Jost Bernasch und Bernd Fachbach (Hg.): *5. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug*, 2012.
- Krasteva et al. 2016 Krasteva, Petia; Inkermann, David; Vietor, Thomas: *Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt*. In: Dieter Krause, Sandro Wartzack und Kristin Paetzold (Hg.): *Design for X. DfX - Symposium*. Hamburg: Tutech Verlag 2016, S. 269–282.
- Löblich 1976 Löblich, Bernd: *Industrial Design. Grundlagen der Industrieproduktgestaltung*, Karl Thieme Verlag, München, 1976.
- Müller 2010 Müller, Alexander: *Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exteriorsdesign*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2010.
- Nehuis 2014 Nehuis Frank: *Methodische Unterstützung bei der Ermittlung von Anforderungen in der Produktentwicklung*. Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik, Dissertation, 2014.
- Pischinger und Seiffert 2016 Pischinger, Stefan; Seiffert, Ulrich: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- Raabe 2013 Raabe, Roman: *Ein rechnergestützter Ansatz zur Generierung konsistenter PKW-Maßkonzepte und parametrischer Designvorgaben*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2013.
- Schmidt 1956 Schmidt, Franz: *Ordnungslehre*, E. Reinhardt Verlag, München/Basel, 1956.
- Seidl 1995 Seidl, Andreas: *Das Menschmodell RAMSIS - Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation, 1995.
- Tzivanopoulos und Vietor 2015 Tzivanopoulos, Theodoros; Vietor, Thomas: *Konsistente Fahrzeuginnenraumkonzepte unter dem Aspekt konstruktiver Gestaltungsfreiheiten*. In: Klaus Brökel, Jörg Feldhusen, Karl-Heinz Grote, Norbert Müller, Frank Rieg und Ralph Stelzer (Hg.): *KT 2015 - 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*. 1 Band. Magdeburg: OVGU Magdeburg, S. 187–193.
- Tzivanopoulos et al. 2015 Tzivanopoulos, Theodoros; Watschke, Hagen; Krasteva, Petia; Vietor, Thomas: *Neue Denkansätze in der Fahrzeugkonzeption beim vollautomatischen Fahren*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 09 (2015) 117. Jahrgang, S. 16–21.
- Weber 2017 Weber, Christian: *Modelling Products and Product Development Based on Characteristics and Properties*. In: Amaresh Chakrabarti & Lucienne T. M. Blessing: *An Anthology of Theories and Models of Design*, 2014, S.327-352.

Emotion Recognition in User-Centered Design for Automotive Interior and Automated Driving

Sven Bischoff¹, Christian Ulrich², Manfred Dangelmaier², Harald Widloither², Frederik Diederichs²

¹University Stuttgart, Institute for Human Factors and Technology Management IAT, 70596 Stuttgart, Germany
sven.bischoff@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Human Factors Engineering, 70596 Stuttgart, Germany
manfred.dangelmaier@iao.fraunhofer.de
harald.widloither@iao.fraunhofer.de
frederik.diederichs@iao.fraunhofer.de

Abstract: In this paper an experiment with a sensor platform for measurement of emotions in the automotive context will be presented. Based on state-of-the-art equipment for emotion recognitions, an architecture for an emotion recognition sensor platform was specified and tested for specific use cases and target emotions in the context of automotive Human-Machine-Interaction (HMI) the car interior and automated driving maneuvers. The sensors include facial expression analysis, head and eye tracking, GSR, EEG and heart rate measurement.

Emotional target states are joy, pleasantness, anger, sadness, fear, cognitive workload, visual distraction, boredom, comfort (ergonomic), trust (in automation), interestedness, (dis-)satisfaction (with product features), and surprise. Within a driving simulator study with 30 participants those emotions could be evoked with the designed stimuli at 90% success rate. Many classification results of the different sensors correlate. Results revealed no absolute redundancy in different sensors. With classification rates of the 28 %, Random Forest classification achieved the best results in predicting target emotional states (5% random guess).

Keywords:

Emotion recognition, User Experience, User-centered Design, Affective Computing, Human-machine-Interface, Automated Driving

1 Introduction

1.1 Relevance of Emotions

In recent years, User Experience (UX) was put in the focus when evaluating products. UX is defined in ISO 9241-210:2010 (2010) as „a person's perceptions and responses that result from the use and/or anticipated use of a product, system or service“, and considers users' affects and sensation. UX switches the perspective from purely performance related aspects of a product to a holistic view that stresses also non-utilitarian aspects, whereas the subjective perception, positive experiences, and emotions of the user are emphasized as target states (Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2008; Law, Roto & Hassenzahl, 2009).

The importance of UX for Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) is reflected in the findings of Arndt (2011) and Engelbrecht (2013), who found out that especially the fulfilment of emotional target states serve as best predictors for the buying decision of ADAS. This holds true for safety relevant products like ADAS, where from a product management point of view only safety aspects and functionality and not emotional target states are the predominant key indicators. Thus, for achieving good UX and serving the emotional target states, Arndt (2011) suggests considering emotional states especially in early stages of the product development process. With latest advances in computer-based emotion recognition and affective computing, emotions have become very tangible and measurable during the last two decades resulting in robust sensors and algorithms to measure and recognize emotions in a variety of imaginable contexts and use cases. Further Picard et al. (2001) identified the

potential of understanding emotional reactions to products for optimizing the evaluation of new designs and technologies.

In this paper, an experiment with a sensor platform for measurement of emotions in the automotive context will be presented, which can be utilized in driving simulators or real vehicles for emotion recognition of drivers. The aim of the platform is, on the one hand, to be utilized during the product development process of cars or car related products like Human-Machine-Interface (HMI) features, ADAS concepts, or automated driving functions. On the other hand, the platform can help to get meaningful insight into the end users' emotional states not only in the development process but also at other stages of the product usage. For instance, automated driving functions or driving related parameters can be adapted to the current emotional state of the driver or can be optimized to evoke positive and reduce negative emotional states of the end user.

Thus, the main application use cases for the emotion recognition platform can be summarized as follows:

- a) During product development process: Relevant indicators for market success can be made more tangible and incorporated in the development process.
- b) During usage of a product: Autonomous functions (e.g. parametrization of automated vehicles) or interactive products, systems or services can be continually improved or adapted to users' current states.

In this paper, several emotional target states will be defined and operationalized, which are of relevance for affect-sensitive applications in both use cases. Methods to elicit those target states in a standardized and repeatable way with the focus on the driver's place will be introduced. In a driving simulator experiment then the recognition rate of those states will be analysed.

1.2 Emotional Target States and ways to induce them

First of all, in this subchapter relevant emotions and emotional target states, which are relevant for automotive related products, will be defined. Various concepts, definitions, and operationalizations exist in order to define emotions. This broad variety is reflected by a statement of Fehr and Russel (1984, p. 464): „Everybody knows what an emotion is, until asked to give a definition“. One of the most common concepts of different emotions are the six basic emotions proposed by Ekman (1992), which are anger, disgust, fear, joy, sadness and surprise. However, Calvo and D'Mollo (2010) remark that especially for the purpose of affective computing and technologies that are responsive to affects, the basic emotions could be of little or less relevance for affect-sensitive applications. In the application field of affect-sensitive computer learning environments, Calvo and D'Mollo point out, that to learning-centered emotions and constructs such as frustration, boredom, curiosity, flow, and anxiety have proven to be more relevant.

In this case product-relevant emotions are of special interest, with close focus is on automotive relevant states. In expert workshops with human factors specialists from Fraunhofer IAO and experts from an automotive OEM the following emotional target states were iteratively derived in a discursive process according to their relevance: joy, pleasantness (weaker form of joy), anger, sadness, fear, cognitive workload, visual distraction, boredom, comfort (ergonomic), trust (in automation), interestedness, (dis-)satisfaction (with product features), and surprise. The emotional target states are described in detail in section 2.2., where the operationalization within experimental setup is described.

In order to measure the emotions, the emotions must be induced in a repeatable way to participants in an experimental environment in order to get reliable data. Several ways of eliciting emotions exist, like presenting media (pictures; audio: music or sound files; audio-visual: movie clips), imagination or recall paradigms (participants are supposed to remember or image an emotional event), or preset interactions, where participants experience an emotion by a virtual, simulated, or real task or situation. In this study, basic emotions were induced by presenting standardised media stimuli and automotive relevant emotions by simulation of relevant situation or tasks. The rationale behind this is that actions are highly immersive and obtained results are comparable to applications in real cars.

1.3 Measurement of Emotions with the Sensor Platform

For measurement of emotions in traffic context several methods exist, which can be classified according to Mesken (2002) into three data groups:

- Behavioral: Head and Body Movement, Gesture and Posture analysis, Eye Tracking, Facial Expression and Voice analysis
- Physiological: Cardiovascular system (e.g. Heart Rate Variability, Electrocardiogram [ECG], Photo-plethysmogram [PPG]), Electrodermal Activity (e.g. Galvanic Skin Response [GSR]), Muscle activity (EMG), Brain Activity (e.g. Electroencephalography [EEG])
- Self-Reports: Statements obtained through interviews, diaries, questionnaires, rating scales.

The gold-standard for assessing emotions during product development process has so far been questionnaires. Advantages of self-reports are that it can unveil information that might otherwise not be visible and that it requires less technical and financial effort to obtain plausible data. However, questionnaires and other self-report based approaches have some disadvantages: They are prone to memory effects, social desirability biases, and deliver no real-time data (that could be utilized for affective computing), and are subjective. Furthermore, in some cases, it can be hard for participants in evaluation studies to articulate their emotions and thinking about emotional content may also evoke other emotions and influence results. In contrary to that, physiological reactions depend on reactions of the autonomous nervous system and cannot or can only hardly be manipulated intentionally by humans and thus are considered as objective. However the measurement of such is on the one hand prone to artefacts such as body activity and require in many cases obtrusive sensors on the other hand. Moreover, product experience will result in low emotional intensity and therefore in low, hardly measurable physiological reactions. This leads to limitations in the application of sensors measuring such data in a realistic setting. Analysis of behavioural data requires mostly not intrusive sensors such as cameras or microphones. Disadvantageous is the fact, that the behaviour can be on the one hand manipulated and on the other hand not all necessary behavioural patterns can be shown, when applying emotion recognition in the car interior due to limitations by the driver's place and tasks such as steering, which require the driver to keep his hands at the wheel.

Within this study, several techniques were applied to measure emotions. Self-reports are utilized in order to validate, whether the presumably induced emotion was also actually present. This is in so far necessary, since for many target states no standardised elicitation stimuli (or task) are available. With the sensor platform behavioural and physiological data are measured. Desirable features for an optimal sensor system for simulator or real car usage would be unobtrusiveness, reliability, and possibility for real-time analysis. The core element of the platform is a camera based emotion recognition software package, which analyses facial expression, as well as head and eye movements. Moreover additional sensors are utilized in order to validate the system, namely a mobile eye tracker for head and eye activity, infrared sensors for heart rate, and electrodes for both galvanic skin and brain activity. The longterm goal would be to find the best combination of sensors. A camera based system would hold the potential to fulfil all predefined requirements of an ideal system. With the experimental setup of this study, training data are recorded, that might serve as basis for extraction of facial expression features, which are cross-validated with the reliable physiological data that indicated target emotional states.

2 Method and Procedure

2.1 Technical Setup and Sensor Platform

In order to measure the target emotions, a study was performed in the immersive driving simulator of Fraunhofer IAO (Diederichs et al., 2010, Bischoff, 2015) in order to create an environment, where target state related tasks and situations could be performed in a standardized and repeatable way. The simulator can be seen in Figure 1. On a tablet screen attached above the center console movies or tasks for emotion induction were presented. Inside the simulator two cameras were attached for recording the driver's face, one was optimized for driver's head position when looking at the road and one was

optimized for drivers' head position when looking at the tablet. With a third camera the driving scene was recorded (see Figure 1).

The cameras directed to the driver's face were connected to the sensor platform based on iMotions software on which the Emotient FACET and AFFDEX algorithms were applied for facial expression analysis and head tracking. Furthermore, a Shimmer3 GSR sensor was attached to the fingers of the left hand of the participants in order to measure GSR. For the driving tasks, participants were instructed to drive only with the right hand and to keep their left hand on the lap, since arm movements bias the GSR signal. Via an ear clip, a Shimmer3 PPG sensor for measuring the heart rate with infrared light was attached to the participants left ear. In addition, a low-cost one electrode EEG device (Neurosky Mindwave) was attached to the participants' head and recorded brain activity in the frontal lobe. For the visual distraction, trust and (dis-)comfort stimuli, a mobile Tobii Pro Glasses 2 eye tracker was utilized to record gaze behavior. Eye tracker data was considered as relevant, when the gaze behavior could influence the way, participants could understand or experience the stimuli and thus had to be controlled. For special emotions, where gaze data was not considered relevant, the eye tracker was detached since the glasses could interfere with facial recognition rate.

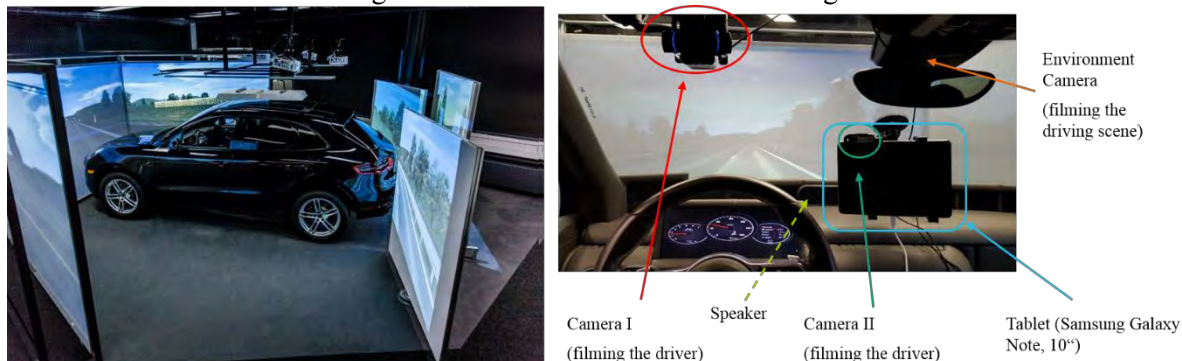


Figure 1: On the left picture the immersive driving simulator in the vehicle interaction lab is depicted. On the right picture the interior of the simulator from driver's point of view is shown.

2.2 Operationalization of Stimuli for Target States in Driving Simulator and Procedure

In the following subchapter the utilized stimuli related to the emotional target states are described. Beside of states that represent the basic emotions, which serve in this study as benchmark for the sensor platform, also target states were defined. They are tailored to constructs relevant for the automotive application use cases. The stimuli were tested in pre-tests with 15 participants.

Basic emotions:

- Joy: video sequence from a joyful youtube video of a laughing baby, which proved to be effective in pre-tests (Youtube, 2016).
- Pleasant: a weaker form of joy (joyful song). The song "don't worry, be happy" was played (McFerrin, 1988).
- Sadness: a movie scene, supposed to be sad. The scene is from the movie "The Lion King" and shows the scene where Simba's father dies (Allers and Minkoff, 1994).
- Fear: a movie scene, supposed to induce fear. The scene is from the horror movie "The Blair Witch Project" (Myrick & Sánchez, 1999). Schaefer et al. (2010) found out that the scene where the group enters the house in the woods is qualified to induce fear.

Automotive emotions:

- (Dis-)satisfaction: pleasant or annoying seatbelt warning.
- (Dis-)satisfaction: different levels of acceleration (fast, normal, and slow acceleration while overtaking).
- Interest: listening to a presumably interesting podcast while driving.
- Cognitive Load: N-back task; a task suggested by Mehler et al. (2009) that is mentally challenging but requires no physical load, nor visually distracts from driving task.
- Boredom: 5-minute monotonous drive.

- Visual distraction: during simple standard driving task, participants have to count red crosses in CID tablet (see Figure 2).
- (Dis-)Comfort: Two different positioning of operating devices (a 3D mouse knob) inside the car. One position is ergonomically well located, the other is bad located (see Figure 2).
- Trust: trust towards the autopilot in a situation, where emergency brake is required. Participants approach to a traffic jam on a highway while driving in autopilot mode. The autopilot is approaching with 130 km/h to the traffic jam and brakes in a safe but abrupt way without communicating the intention to brake to the driver (see Figure 2).
- Surprise: Reaction to highly unexpected events. Participants drive in good weather, when out of the sudden a loud thunder appears. A thunder was chosen, since it cannot be ignored due to the inattention of the driver.



Figure 2: On the left picture, an exemplary screen of the task for visual distraction is depicted. The participants had to count all red “x” on the screen. On the second picture from left, a comfortable hand and operating device positioning is depicted. On the third picture from left, a supposedly uncomfortable hand and operating device positioning is depicted. In the right picture a scene from the simulator environment of the traffic jam is depicted.

While approaching to the traffic jam, the preceding vehicle brakes to a full stop and autopilot performs an emergency brake. Trust was operationalized when participants did not intervene by braking for their selves or evading to the left lane.

All driving tasks were designed so that participants could perform them with one hand. The tasks related to discomfort were performed with the right hand while driving in autopilot. During the interest, cognitive load, visual distraction, and acceleration task, participants drove at a straight 4-line (2 in each direction) highway with constant 80 km/h behind a preceding vehicle on the right lane. They were instructed to follow the preceding vehicle with constant speed and distance. The stimuli related to basic emotion joy, sadness and fear were shown on the tablet, while the car was standing in a parking lot next to the highway.

Requirements for the participant sample were: age between 20 and 60 years, possession of a valid driver license, right-handedness. Furthermore, participants were asked to attend shaved and without make-up or glasses, for improving the facial recognition rate.

After a warm-up drive, the sensors were attached to participants and a baseline was measured for calibrating sensors. The sequence in which the stimuli were presented, was the same for all participants: (Dis-)satisfaction seatbelt warning, (dis-)satisfaction acceleration, interest, pleasant, cognitive load, boredom, visual distraction, (dis-)comfort, trust, surprise, anger, sadness, fear, joy. Possible sequence effects could not be excluded, however by applying the sequence, reasonable cover stories, and trials of the tasks due to ensure comprehensiveness of the respective task could be implemented. After each stimulus, participants were asked to answer an emotion based questionnaire, which included the valence and arousal scale of the self-assessment manikin scale from Bradley & Lang (1993) and a tailored question to each emotion asking the participants to state how clearly they have felt the respective emotion.

3 Results

3.1 Manipulation Check

In total, 30 participants took part at the study and delivered data, which was analysed and processed (Age Mean 28.8 years, Range 21-56, 11 female, 19 male). The questionnaire data were applied to

assess, whether each stimulus evoked the respective target emotion. The results of the validation questions are depicted in Figure 3. For most emotions a 9-point rating scale in the form of “How clear did you feel [emotion X]?” ranging from “not at all” to “very clear” was applied, whereas cut-off of 3 was applied. Those results are of fundamental value for further processing of the data, since it defines, whether the Ground Truth of each stimulus per participant was met or not. Figure 3 shows the percentage of participants, for which the measured Ground Truth matches the stimulus. There is a high match of at least 80 percent for most stimuli. The average for all stimuli was 90.7 percent. Only the Trust situation produced ambivalent results. The last two Stimuli are also in line with the expectation because they are designed to produce low cognitive load in the one case and low comfortable posture situations in the other. It is concluded that, besides the Trust scenario, the Stimuli produced the desired Emotions.



Figure 3: The results of the questions for stimulus validation. *This questions were inversed, “Emotion not present” can be interpreted that respective opposite emotion (Discomfort, normal acceleration or no cognitive load) was present. **This state was rated by asking participants to state with binary question (yes/no).

3.2 Classification Performance

This section reports on attempts to reconstruct emotions based on feature variables derived from the individual sensors. The basic approach is to predict the emotion based on the signal data streams. The analysis takes into account 73 variables of the different sensors (camera, EEG, GSR, Heart Rate, Eye-Tracker).

For each target stimulus the variable streams were re-sampled by computing means for 2 Hz frames in order to reduce noise and disturbances due to other influences. This type of data will be in the following denoted by Momentary Data. In another approach the mean over the whole signal stream of one stimulus per participant is computed. This will be called Aggregated Data.

The preliminary analysis described in this paper is solely based on these two types of data. Other features such as spread measures or frequency analysis will be considered elsewhere.

3.2.1 Aggregated Data Analysis

A first set of analyses was performed on Aggregated Data. The correlations between the variables were computed to get an indication whether the variables are heavily redundant. This could implicate that information of one sensor could be covered by another. But only 12% of the entries of the correlation table displayed absolute values higher than 0.3 ($|r| > 0.3$). Some observations include:

- There are no strong correlations of any variable with the Ground Truth variables, but Binary and Raw Ground Truth correlate in the medium range ($r = 0.45$)
- EEG frequency band signals correlate to medium or high degree ($0.55 < r < 0.88$)
- Several facial expression features correlate. In particular one of the two partly redundant Facial Recognition systems (Affdex or Facet) can be dropped.
- Some facial expression features and basic emotion classifications correlate highly (e. g. Brow Furrow with Anger $r = 0.71$, Brow Furrow with Sadness $r = 0.70$, Smile with Joy $r = 0.99$, Smile with Engagement $r = 0.87$, Smile with Valence $r = 0.80$, Nose Wrinkle with Disgust $r = 0.88$, Mouth Opening with Surprise $r = 0.60$)
- Basic emotion classifications can correlate significantly (e. g. Joy with Valence $r = 0.80$, Joy with Engagement $r = 0.85$, Surprise with Engagement $r = 0.86$, Surprise with Fear $r = 0.70$)
- Sadness correlates with anger ($r = 0.65$), Joy with Engagement ($r = 0.85$), Frustration with Confusion ($r = 0.84$)
- None of the sensor types should be dropped based on correlation analysis as all EEG, GRS and Facial Expression variables do not correlate considerably among the groups.

Because there was no strong indication to exclude specifically any of the variables the following classification experiments were carried out with the full variable set of 73 variables.

Several classification methods using the R framework were applied. They included the Logit-Linear model (R package nnet), Random Forest classification (R package RandomForest), Support Vector Machine Regression (R package e1071), Neural Network classification (R package nnet).

The participant sample was split randomly into two halves. One half was used for training the classification method (Training Data, 14 participants) and the other half was used for testing the classification method (Test Data, 15 participants). The sampling was repeated two times and the percentage of correct classifications was averaged over the three alternative folds. At that stage, data were utilized regardless of the Ground Truth.

All the methods were able to reclassify the training data correctly. This result is expected because 73 variables are used to classify only 270 cases, which causes overfitting.

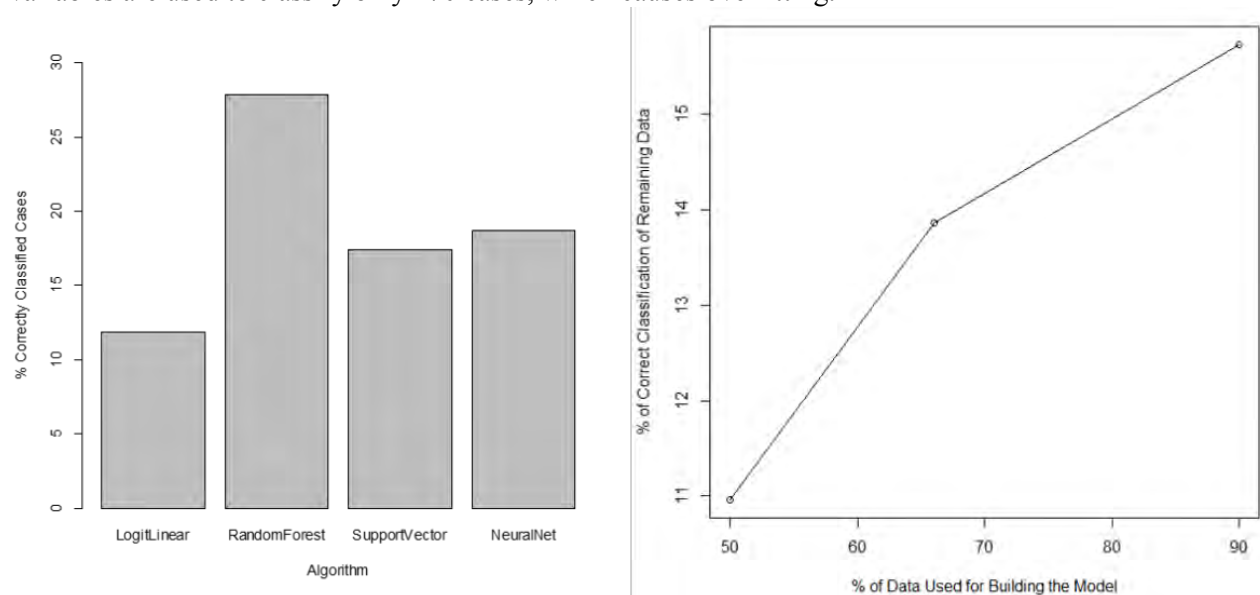


Figure 4: On the left figure the prediction accuracy of different classification methods on Aggregated Data is depicted. The right figure depicts the classification accuracy of Logit-Linear classification depending on percentage of data used for training.

In contrast, low classification quality was expected for the test data with Aggregated Data, because of the comparably low amount of data for training. This was confirmed (Figure 4). For 20 different classes, one could expect 5% correct classifications for noneffective classification methods (random guess). The result shows (Figure 4) that even the highly aggregated data include information to outperform pure guesses. The Logit-Linear regression was the least effective algorithm, while the Random Forest tree classification delivered the best performance (28% correct predictions).

The change in classification accuracy for the Logit-Linear regression was also analysed. The result is presented in the right diagram in Figure 4. The prediction accuracy still increases with the number of participants included in the Training Data. This is an indication that a higher number of participants has potential to improve classification quality.

3.2.2 Momentary Data Analysis

Based on the results of the performance tests with Aggregated Data the Random Forest classification was chosen heuristically to be applied for the evaluation of Momentary Data.

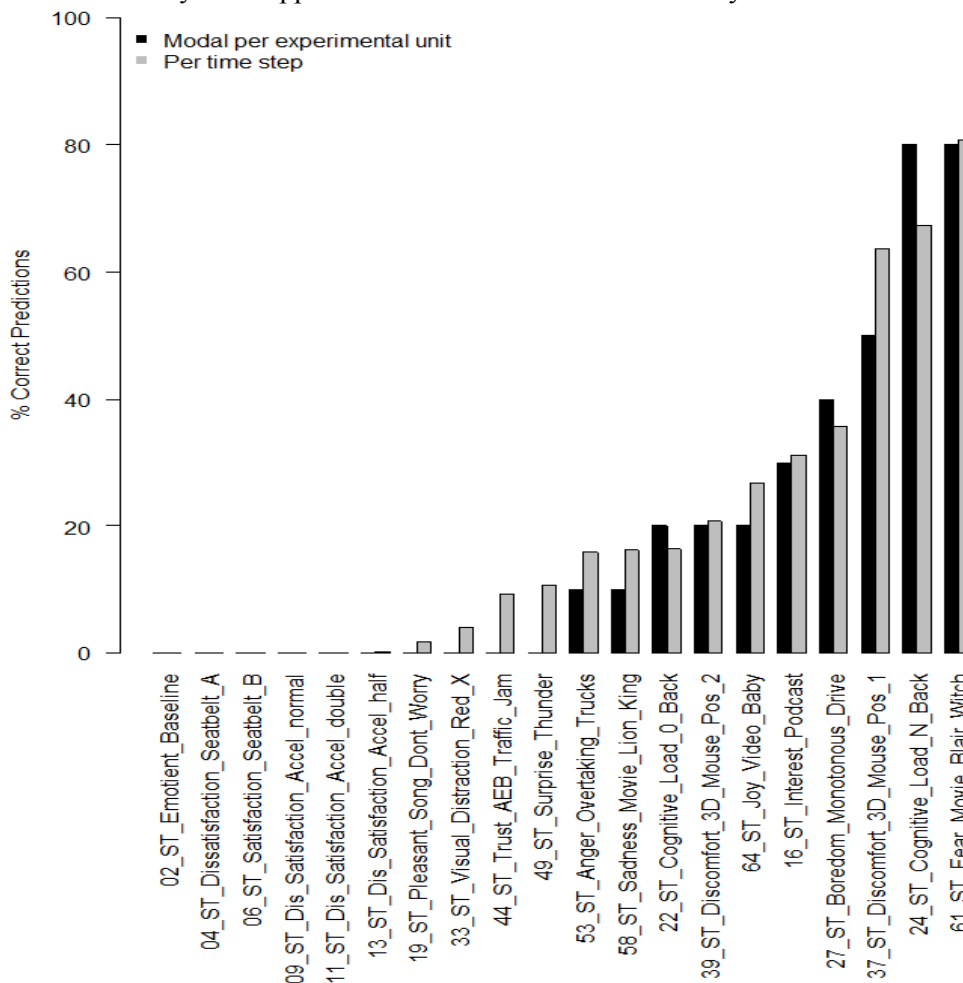


Figure 5: Classification Accuracy of Logit-Linear classification depending on percentage of data used for training.

The overall Momentary Data was reduced to relevant time intervals. Furthermore GSR data was time lag corrected. The overall accuracy was calculated by using Random Forest classifiers. Compared to the Aggregated Data study, the Training Data sample size was increased from half to two-third of the participants in order to reduce accuracy loss due to small training data. Random Forest regression was then applied to the Momentary Data. Figure 5 shows the results of the classification accuracy per stimulus or experimental unit. Two types of classification are presented. One is based on the most frequent momentary attribution (modal per experimental unit) to a class during an experimental unit. The other one is based on the total number of correct classifications per experimental unit (per time

step). Both accuracy measures are comparable. The first approach is more focused and boosts the tendency of the Random Forest method to suppress sparsely populated classes.

4 Conclusions

With overall accuracy of 90 percent, the experimental design and the stimuli for elicitation of emotional target states have proven to be successful for inducing target states in a car, which contribute to end users UX, in a standardized and repeatable way. One exception might be the trust situation, which only was experienced in 46.7 percent of participants. However it cannot be controlled, to which degree the questionnaire results are reliable, and the possibility of social desirable answers cannot be excluded.

The best combination of a subset of the utilized sensor variables, was not found with this experiment. To answer this question a larger sample of reliable data would be required in order to perform more sophisticated machine learning approaches without running danger of over-fitting or less generalizability of the findings. Nevertheless, the experimental setup can be applied to gather more data with further participants, which might serve as training data for better classifiers.

When computing means of the signal stream related to one sensor per stimuli, the overall classification rate, which ranged from 12 to 28 percent for different methods, outperformed random guess level (5 percent).

Analysis of signal streams in real time hold the potential to correctly identify target states with up to 80 percent. Best performance (around 20 percent or more) was shown for Fear, Comfort and Discomfort, Cognitive Load, Boredom, Interest and Joy.

It can be concluded that relevant target states for user experience can be identified to a comparable degree as Basic Emotions. So the methods developed and optimised for classification of Basic Emotions hold also the potential to be utilizable for target states relevant for User Experience. In particular it was found that the methods can be applied in in-vehicle settings. While there is a lot of evidence that the sensors and classifiers work for video-based stimuli we found similar performance for interactive situations in a driving simulator. It is remarkable that even ergonomic issues like postural discomfort can be identified in real-time with emotion-directed measures.

It seems that there is also a potential to correctly identify complex constructs such as trust. However, a more in-depth study is required in particular for this construct as the experimental design with the split Ground Truth resulted in low numbers of samples, insufficient for generalization.

All in all, it can be concluded, that it is still a long way to applications, which correctly classify all or the most relevant states with one sensor such as a camera based system. On the short term, approaches using combination of several sensor data are necessary for correct recognition of emotions.

Literature

- Allers & Minkoff, 1994 ALLERS, Roger, MINKOFF, Rob. *The Lion King*. Directed by Roger Allers, and Rob Minkoff: Buena Vista Pictures, 1994.
- Arndt 2011 ARNDT, Stephanie: *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen Modell zum Kaufverhalten von Endkunden*. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2010.
- Bischoff et al. 2015 BISCHOFF, S., DIEDERICH, F. (2015). User centered HMI development applying the V-ISO model for collaborative car-2-x driver assistance systems. In: Binz, H. (Hrsg.); Bertsche, B. (Hrsg.); Bauer, W. (Hrsg.); Roth, D. (Hrsg.) ; Univ. Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design; Institut für Maschinenelemente; Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement -IAT-; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation -IAO-, Stuttgart: Konferenz

- Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015: Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft; Stuttgart, 19. Juni 2015: Fraunhofer IAO.
- Bradley & Lang 1994
BRADLEY, Margaret M., and LANG, Peter J. "Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential." *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry* 25.1 (1994): 49-59.
- Calvo & D'Mello 2010
CALVO, Rafael A., and D'MELLO, Sidney. "Affect detection: An interdisciplinary review of models, methods, and their applications." *IEEE Transactions on affective computing* 1.1 (2010): 18-37.
- Diederichs et al. 2010
DIEDERICHS, F., MARBERGER, C. & HINDER, V. (2010). Iterative design and assessment of an audio visual warning concept for Car2x communication systems. In: ITS World Congress on Intelligent Transport Systems, 17th ITS World Congress. Ubiquitous Society with ITS.
- Ekman 1992
EKMAN, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & emotion*, 6(3-4), 169-200.
- Engelbrecht 2013
ENGELBRECHT, Anna: *Fahrkomfort und Fahrspaß bei Einsatz von Fahrerassistenzsystemen*. Diplomica Verlag, Dissertation, 2013.
- Fehr & Russell 1984
FEHR, Beverley; RUSSELL, James A. Concept of emotion viewed from a prototype perspective. *Journal of experimental psychology: General*, 1984, 113. Jg., Nr. 3, S. 464.
- Hassenzahl et al. 2008
HASSENZAHL, M., BURMESTER, M., & KOLLER, F. (2008). Der User Experience (UX) auf der Spur: Zum Einsatz von www.attrakdiff.de. In *Brau, H., Diefenbach, S., Hassenzahl, M., Koller, F., Peissner, M. & Röse, K. (Eds.): Usability Professionals 2008* (pp. 78-82). Stuttgart: German Chapter der Usability Professionals Association.
- ISO 9241-210 2010
9241-210 2010. Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centered design for interactive systems.
- Law et al. 2009
LAW, E., ROTO, V., HASSENZAHL, M., VERMEEREN, A. P., & KORT, J. (2009). Understanding, scoping and defining user experience: a survey approach. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 719-728). ACM.
- McFerrin 1988
MCFERRIN, B., Don't Worry Be Happy. In: *Simple Pleasures*: EMI, 1988.
- Mehler et al. 2009
MEHLER, B., REIMER, B., COUGHLIN, J., & DUSEK, J., Impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009. (2138), 6-12.
- Mesken 2002
MESKEN, Jolieke. *Measuring emotions in traffic*. Leidschendam: SWOV Institute for Road Safety Research, 2002.
- Myrick & Sánchez 1999
MYRICK, Daniel, Eduardo SÁNCHEZ *The Blair Witch Project*. Directed by Daniel Myrick, and Eduardo Sánchez: Artisan Entertainment, 1999.
- Schaefer et al. 2010
SCHAEFER, A., NILS, F., SANCHEZ X., PHILIPPOT, P., 2010. Assessing the effectiveness of a large database of emotion-eliciting films [online]. A new tool for emotion researchers. *Cognition & Emotion*, 24(7), 1153-1172. Available from: 10.1080/02699930903274322
- Youtube 2016
Baby Laughing Hysterically at Ripping Paper (Original) [online]. YouTube [last retrieved 18 November 2016]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=RP4abiHdQpc>

Komplexitätsreduktion durch nutzerzentrierte Gestaltung eines Arbeitsplatzes für die Produktentwicklung

Olga Lange¹, Matthias Bues²,

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, 70569 Stuttgart, Deutschland

olga.lange@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, 70569 Stuttgart, Deutschland

matthias.bues@iao.fraunhofer.de

Abstract: Die Anforderungen an den Ingenieur verändern sich stetig, in erster Linie durch steigende Komplexität auf verschiedenen Ebenen des Arbeitsprozesses. Eine nutzerzentrierte Gestaltung der Arbeitsumgebung mit einer gezielten Anwenderunterstützung durch die Software(SW)-Benutzungsschnittstelle kann wesentliche Beiträge zur Reduktion dieser Komplexität leisten. Sie betrifft vor allem die Optimierung der Mensch-Computer-Schnittstelle, sowohl hinsichtlich der Art und Dimension der Informationsdarstellung als auch der nutzbaren Eingabetechniken. In diesem Beitrag werden das Konzept und die Implementierung einer nutzerzentrierten Benutzungsschnittstelle und deren Evaluation an zwei praxisrelevanten Anwendungsfällen aus den Bereichen Konstruktion und Fertigungsplanung beschrieben. Das Konzept der Benutzungsschnittstelle umfasst sowohl deren physischen Aufbau (horizontales/vertikales Display) als auch deren Funktionalität (Steuerung wie Touch/Multitouch). Die Evaluierung erfolgt durch den Vergleich der Geschäftsprozesse am heutigen Arbeitsplatz mit denjenigen am Extended Workdesk, mittels der Methoden Expertengespräch und Probandentest. In dieser Evaluierung konnte eine Komplexitätsreduktion statistisch nachgewiesen werden.

Keywords:

Nutzerzentriertes Design, Interfacedesign, Software-Benutzungsschnittstelle, Komplexitätsreduktion, Ingenieursarbeitsplatz

1 Einführung

Die Anforderungen an den Ingenieursarbeitsplatz sind in einem starken Wandel begriffen. Immer mehr Informationen aus unterschiedlichen Quellen sind gleichzeitig zu verarbeiten, und die Tätigkeiten werden komplexer, vielschichtiger und außerdem zunehmend über verschiedene Informationsquellen verteilt. Hinzu kommen kürzere Entwicklungsphasen und die damit verbundenen häufigeren Änderungen an den Entwicklungs- und Produktionsprozessen. Die relevante IT-Infrastruktur bildet diesen Wandel durch kontinuierliche und hoch dynamische Weiterentwicklung in weitaus stärkerem Maße ab als die Systeme, mit denen die Nutzer letztlich arbeiten. IT-Arbeitsplätze und Software-Benutzungsschnittstellen haben sich in den letzten 30 Jahren nicht grundlegend verändert – noch immer sind ein oder bestenfalls zwei Bildschirme, Tastatur, Maus und für CAD-Anwendungen ein Space Navigator der Standard. Jedoch ermöglicht die aktuelle Entwicklung in der Display- und Interaktionstechnik die Konzeption und Realisierung ganz neuer Mensch-Computer-Schnittstellen, die die Beschränkungen des etablierten WIMP (Windows-Icons-Menus-Pointers)-Modells zu überwinden wissen. Große, hochauflösende Flachbildschirme, in Kombination mit Multitouch-Sensorik, erlauben zu relativ geringen Kosten die Realisierung großer interaktiver Arbeitsflächen. Diese ermöglichen eine neuartige Software-Benutzungsschnittstelle, die den steigenden Anforderungen und der Komplexität am Arbeitsplatz in der Produktentwicklung gerecht werden. In (Bauer et al. 2016) wurde ermittelt, dass 95% der Anwender am häufigsten einen stationären PC oder ThinClient am Arbeitsplatz nutzen. Trotz des zunehmenden Anteils mobiler Arbeit kommt deshalb der Gestaltung und Funktionalität des stationären Arbeitsplatzes sehr hohe Bedeutung zu.

2 Definitionen

Für das nutzerzentrierte Design (menschzentriertes Design nach DIN ISO 9241) sind die Anwender mit deren Erfordernissen und Anforderungen in der Arbeitsumgebung entscheidend.

Die Komplexität der Aufgabe spielt dabei eine wichtige Rolle und muss aus der prozessorientierten Sicht der Nutzer betrachtet werden. Die vorgestellte Ausarbeitung definiert Komplexität als „inhärente Eigenschaft eines Anwendungsbereiches, bedingt durch Umfang, Struktur und Funktionalität der Arbeitsobjekte und Arbeitsaufgaben“ nach Herczeg (Herczeg 2009). Wichtig ist die Unterscheidung zur Kompliziertheit, die durch eine Überladung mit zusätzlichen aber unnötigen Funktionen und Informationen entsteht. Der verbreitete Begriff „komplexe Systeme“ wird vor allem nach den Qualitätsmerkmalen wie Umfang und Bedarf der Informationen unterschieden (Lange 2016). Quantitative Messungen existieren vermehrt, fokussieren sich jedoch auf die technischen Aspekte der Komplexität, wie z.B. Instabilität des Systems (Lenhard et al. 2013). Eine zugängliche Metrik der Komplexität der Tätigkeiten oder Aufgaben stellt ein Prozessablaufdiagramm mit dem maximalen Detaillierungsgrad der funktionalen Prozessschritte dar.

Zur Erfassung der Komplexität werden die Modellierungen von Geschäftsprozessschritten der Aufgaben Konstruktion und Fertigungsplanung vor und nach der nutzerzentrierten Gestaltung der Benutzungsschnittstelle dargestellt und verglichen. Eine Reduktion der zu ausführenden Prozessschritte wird unter der Komplexitätsreduktion einer Aufgabe am Arbeitsplatz verstanden.

Zu beachten ist die Unterteilung des Geschäftsprozesses auf drei Ebenen im Prozessablauf. Eine Aufgabe wird auf der Anwender-, System/Software- und Hardware-Ebene betrachtet. Somit kann die definierte Software-Benutzungsschnittstelle mit „allen Bestandteilen eines interaktiven Systems (Software oder Hardware), die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen“ (DIN ISO 9241), untersucht werden.

Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung der Anwender sind die Anforderungen an die Software-Benutzungsschnittstelle aus der Usability-Sicht (DIN ISO 9241). Unter Effektivität wird die Vollständigkeit der Zielerreichung, unter Effizienz - der Einsatz von verfügbaren Ressourcen und unter der Zufriedenstellung - die positive Nutzung eines Systems verstanden. Im Probandentest Fertigungsplanung konnte die Effektivität der SW-Benutzungsschnittstelle mit der Erfassung der Aufgabenergebnisse validiert werden. Die Zeitmessung bei der Aufgabenerledigung der Teilnehmenden wurde zur Messung der Effizienz eingesetzt. Die Benutzerfreundlichkeit der evaluierten Arbeitsplätze wurde anhand des Systems Usability Scale ermittelt. Diese wurde zur Bewertung der Zufriedenstellung der Anwender eingesetzt. Eine Optimierung dieser Faktoren macht die Komplexität am Arbeitsplatz beherrschbar und reduziert diese zudem indirekt.

3 Technologien für eine neue digitale Arbeitsumgebung

Die Analyse typischer Arbeitsprozesse und Arbeitsweisen von Ingenieuren in der Produktentwicklung lieferte folgende, für die Weiterentwicklung des Ingenieursarbeitsplatzes besonders relevante Faktoren und Anforderungen:

- Vermeidung technisch bedingter Kontextwechsel (z.B. Umschalten zwischen Applikationen in Vollbilddarstellung),
- Abbildung des individuellen mentalen Modells, das jeder Nutzer von seinen Arbeitsabläufen hat und
- Erweiterung und Flexibilisierung der Interaktionsmöglichkeiten.

Zur Umsetzung dieser Anforderungen wurde ein nutzer- und prozesszentrierter Ansatz verfolgt, der in der Interaktionssoftware *Virtual Desktop One* (VD1) resultiert. *VD1* bildet die Basis für die Realisierung von Rechnerarbeitsplätzen, die die freie Anordnung digitaler Dokumente und Softwareapplikationen auf fast beliebigen digitalen Arbeitsflächen ermöglichen. Dadurch wird nicht nur der begrenzte Platz auf den Bildschirmen des herkömmlichen Rechnerarbeitsplatzes vergrößert, sondern die Nutzer können vor allem die Objekte ihres jeweiligen Arbeitsablaufes ähnlich wie Papier entsprechend ihrem mentalen Modell anordnen, also positionieren und frei drehen, und darüber hinaus auch skalieren. Dieser Ansatz

geht über bisherige Arbeiten, etwa von Pirchheim et al. (Pirchheim 2009), insofern hinaus, als dass diese keine multimodale Interaktion (insbesondere Touch) vorsehen und auch keine verallgemeinerte Transformierbarkeit von Fenstern zulassen.



Bild 1: Konzept des Virtual Desktop One

An einem solchen Arbeitsplatz kann beispielsweise der Konstrukteur PLM, Tabellenkalkulation und Webbrowser gleichzeitig auf dem Tisch haben und am vertikalen Bildschirm am CAD-System arbeiten. Auch die verschiedenen Kommunikationskanäle (Mail, Scan, Social Media, Voice, Videokonferenz) lassen sich nahtlos in diese Arbeitsumgebung integrieren. Die softwareseitige Realisierung von *VD1* als Middleware zwischen Applikationen und Darstellung/Eingabe ermöglicht es, bestehende Softwareapplikationen ohne Modifikation weiter nutzen zu können. Dies ist eine zwingende Voraussetzung für eine problemlose Integrierbarkeit solcher Arbeitsplätze in die IT-Landschaft und damit in die produktiven Prozesse des Unternehmens. Mindestens genauso wichtig ist es aber, dass die Anwender zunächst mit den vertrauten Applikationen weiterarbeiten können, dabei aber in deren Nutzung wesentlich größere Freiheitsgrade haben.

4 Prototyp Extended Workdesk

Eine Ausprägung eines solchen Arbeitsplatzes ist der am Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) entwickelte Arbeitsplatzprototyp *Extended Workdesk*. Dieser besteht im Kern aus einem hochauflösenden Multitouch-Displaytisch, der in der Tischfläche ein 55-Zoll-OLED-Display mit 3840x2160 Pixel Auflösung nutzt, das von einem vertikal angeordneten 30-Zoll-Bildschirm mit 2560x1440 Pixel ergänzt wird. Bild 2 veranschaulicht das Konzept des *Extended Workdesk*.

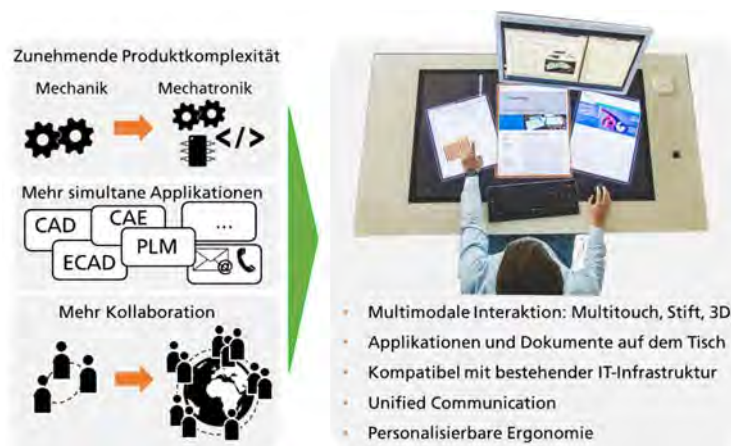


Bild 2: Konzept des Extended Workdesk

5 Evaluierung

Die Evaluierung der vorgestellten nutzerzentrierten Gestaltung fand auf Basis praktischer Beispiele aus Konstruktion und Fertigungsplanung statt. Ein Vergleich wurde zwischen einem verbreiteten Ingenieursarbeitsplatz mit einem Bürobildschirm und dem Prototyp Extended Workdesk mit erweitertem horizontalem Großbildschirm und intuitiver Bedienung gezogen.

In der ersten Untersuchung Konstruktion fand die Validierung der Geschäftsprozessoptimierung und der wahrgenommenen Komplexitätsreduktion durch 22 Experten statt.

Die zweite Untersuchung Fertigungsplanung überprüfte, zusätzlich zur Optimierung des Geschäftsprozesses, die Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung der Anwender als die messbare Usability-Parameter der Komplexitätsreduktion. Die Usability Evaluierungen wurden mit einem statistischen Test in einem Probandenkollektiv von 42 Testpersonen durchgeführt.

5.1 Anwendungsfall Konstruktion

Bei der ersten Bewertung des Prototypen Extended Workdesk wurde eine Konstruktionsaufgabe zur Überprüfung der chromhaltigen Oberschicht im Filtereinsatz untersucht. Die Durchführung der Aufgabe beinhaltete einen Abgleich der Konstruktionszeichnung des Bauteils Filtereinsatz mit zwei Normenverordnungen zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (EG und EU) und einer Stückliste mit der Zusammenstellung der Filterbauteile.

5.1.1 Untersuchungsdesign Konstruktion

Die Konstruktionssoftware lag geöffnet am Desktop des heutigen und prototypischen Ingenieursarbeitsplatzes in Großsichtformat vor. Die aufgabenrelevanten Eingaben wurden von Probanden aus den zur Verfügung stehenden Dokumenten 1 bis 5 entnommen. Die Aufgabe wurde mit der Konstruktion-Änderungsmeldung (Dokument 1) ausgelöst. Die betroffenen Modifikationen aus den Normenverordnungen wurden mit der Zeichnung und Stückliste überprüft. Ergänzende Informationen wurden in der Stückliste dokumentiert. Diese Aufgabe wurde mit der Bestätigung, Weiterleitung und Archivierung der unterschriebenen Konstruktion-Änderungsmeldung abgeschlossen. Die Konstruktion-Änderungsmeldung lag in Papierform an den untersuchten Arbeitsplätzen vor. Die digitalen Hilfsunterlagen (Dokument 2 bis 5) lagen am heutigen Ingenieursarbeitsplatz minimiert am Bildschirm und am Prototyp Extended Workdesk in Originalgröße am vertikalen Bildschirm (geöffnet) vor:

- Dokument 2/.pdf beinhaltete 3D-Zeichnung des Filters ,
- Dokument 3/.pdf stellte die EU-Verordnung Nr. 301/2014 DER KOMMISSION vom 25. März 2014 mit den Änderungsinformationen zum Chromtrioxid (Chrom IV) dar,
- Dokument 4/.pdf bot die EG-Verordnung Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES mit weiteren Informationen zur chemischen Stoffen und
- Dokument 5/.xls präsentierte die Stückliste mit zusätzlichen Daten (Sachnummer/Kurzbezeichnung) zum Filtereinsatz.

Am heutigen Arbeitsplatz standen als Arbeitsmittel ein 24-Zoll Bildschirm mit 1920x1200 Pixel Auflösung , eine Tastatur, eine Maus, eine Konstruktions-Änderungsmeldung in Papierform und Stift. Der zum Vergleich herangezogene Prototyp des Extended Workdesk bestand aus einem horizontalen Multitouch-Display mit einer Auflösung von 4320x2560 Pixel und einer Diagonale von ca. 55 Zoll, einem vertikalen 30-Zoll Bildschirm mit 2560x1440 Pixel Auflösung, einer über der Tischfläche integrierten, hochauflösenden Dokumentenkamera, einer Tastatur, einer Maus, einer Konstruktions-Änderungsmeldung und einem Stift. Bild 3 zeigt den Aufbau der Untersuchung Konstruktion mit dem heutigen Arbeitsplatz und dem Prototyp des *Extended Workdesk*.



Bild 3: Untersuchung Konstruktion - heutiger Ingenieursarbeitsplatz und Prototyp Extended Workdesk

Die Evaluierung der Konstruktionsaufgabe zielte auf die prozess- und nutzerorientierte Bewertung der Komplexitätsreduktion ab.

5.1.2 Geschäftsprozess heutiger Arbeitsplatz/ Extended Workdesk

Eine Analyse von Geschäftsprozessabläufen wurde mit der beschriebenen Konstruktionsaufgabe am heutigen Ingenieursarbeitsplatz mit dem Vorher-Stand und am Extended Workdesk mit dem Nachher-Stand modelliert und durchgeführt. Die elementaren Prozessschritte wurden nach Regeln der Unterteilung von Geschäftsprozessen (Gadatsch 2012) erfasst und ausgewertet. Darunter wird die Reihenfolge der Aufgabendurchführung mit maximalem Detailierungsgrad der funktionalen Schritte verstanden. Eine Aufteilung der Prozessschritte in Benutzer-, Software- und Hardware-Ebene ermöglicht eine genaue Betrachtung aller Schritte an der Benutzungsschnittstelle. Die modellierten Vorher- und Nachher- Prozessabläufe wurden erfasst und in Tab. 1 zusammengeführt.

Tabelle 1: Prozessablaufdiagramm der Aufgabe in Untersuchung Konstruktion

Nr.	Prozessschritt	Ebene		
		Anwender	Software	Hardware
1	Die Aufgabe wird mit der Ankunft einer Konstruktion-Änderungsmeldung (KÄM/Dok. 1 unterschrieben in Papierform) ausgelöst.	START		
2	Die Änderungen werden von dem Mitarbeiter überprüft/unterschrieben			
3	Die betroffene Konstruktionszeichnung (Filtereinsatz/Dok. 2) wird geöffnet			
4	EU-Verordnung/Dok.3 zur Überprüfung öffnen			
5	Änderung zum Chromtrioxid, EU-Verordnung/Dok.3, wird gelesen			
6	EG-Verordnung/Dok. 4 für weitere Hinweise öffnen			
7	EU-Verordnung/Dok.3 zum Nachschlagen aktivieren			
8	Zeichnung/Dok.2 aktivieren			
9	Material der Hartverchromung in der Zeichnung überprüfen/ändern			
10	Stückliste/Dok.5 öffnen und Daten zum Filtereinsatz prüfen			
11	Zeichnung aktivieren			
12	Daten aus der Stückliste in Zeichnung einzutragen			

13	Stückliste aktivieren		
14	Änderungen zum geänderten Filtereinsatz in die Stückliste eingeben		
15	Die eingearbeitete Änderungen (KÄM) werden unterschrieben		
16	Gerät zur Digitalisierung (Scanner) aufsuchen		
17	Dokument 1 (KÄM) einscannen		
18	Dokument 1 (KÄM) weitersenden		
19	Dokument 1 (KÄM) archivieren		
■ Geschäftsprozessschritt		● Vorher-Prozessablauf	→ Nachher-Prozessablauf

Die Anzahl der Schritte des Vorher-Prozessablaufs beläuft sich auf insgesamt 19 und des Nachher-Prozessablaufs auf insgesamt 14 Prozessschritte, also eine Verringerung um 26%. Die entfallenen Schritte (Nr. 7, 8, 11, 13) sind auf die großflächige Übersicht über die parallel genutzten Applikationen zur Bearbeitung der Dokumente 2 bis 5 zurückzuführen. Eine weitere Optimierung des Prozesses durch den Wegfall des Schrittes Nr. 16 wurde durch die Integration eines Dokumentenscanners in den Extended Workdesk und in dessen Benutzungsoberfläche erreicht.

5.1.3 Evaluierung mittels Expertengespräch

Nach einer detaillierten Vorstellung des *Extended Workdesk* mit individueller Testphase haben 22 Experten mit einer Ingenieurausbildung die wahrgenommene Komplexitätsreduktion durch die Neuentwicklung beurteilt. Der vorbereitete Fragebogen umfasste vier Aussagen mit jeweils vierstufiger verbalisierter Antwortskala: "trifft zu", "trifft eher zu", "trifft eher nicht zu" und "trifft nicht zu". Diese Form wurde gegenüber der fünfstufigen Antwortskala bevorzugt, weil bei letzterer unentschlossene Probanden häufig die Mitte der Auswahlmöglichkeiten als neutrale Alternative (Fluchtkategorie) wählen. Die Aussagen waren im Einzelnen:

Reduktion der Komplexität durch...

- Bessere Übersicht über die gleichzeitig eingesetzten Programme und Dokumente,
- Digitale Nachbildung des mentalen Modells "Schreibtisch",
- Intuitive Benutzungsschnittstellen (Touch, freie Fensteranordnung incl. Rotation, Zoom) und
- Vermeidung von Medienbrüchen (digital->Papier).

Die Antworten wurden ausgewertet und zusammengeführt. Nach dieser Auswertung priorisieren über 86% der Gesamtgruppe der Experten die Komplexitätsreduktion durch eine bessere Übersicht (Aussage 1). Die zweitwichtigste Reduzierung der Komplexität wird durch die intuitive Benutzungsschnittstelle (Aussage 2) zu 80% von den Teilnehmenden erwartet. An dritter Stelle, mit 72% der Befürwortung, wurde die Vermeidung von Medienbrüchen beurteilt. Durch die digitale Nachbildung des mentalen "Schreibtisches" sehen die befragten Experten eine Komplexitätslimitierung zu 66 % der Antworten. Der errechnete Mittelwert der Beurteilungen in Höhe von über 75 % sagt aus, dass eine nutzerzentrierte Gestaltung in der vorgestellten oder in einer abgewandelten Form bei der Beherrschung der zunehmenden Komplexität der Ingenieursarbeit helfen kann.

Zusammenfassend weisen die Ergebnisse der Untersuchung der Konstruktionsaufgabe eine objektive Komplexitätsreduktion in der prozessorientierten Evaluierung nach. In der subjektiven nutzerorientierten Evaluierung des *Extended Workdesk* bestätigten die Probanden die wesentlichen Hypothesen, die der Konzeption der VD1-Oberfläche und des *Extended Workdesk* zugrunde lagen. In der zweiten Untersuchung einer Aufgabe aus der Fertigungsplanung sollten Parameter wie Usability, Effektivität, Effizienz und Anwenderzufriedenheit quantifiziert werden.

5.2 Anwendungsfall Fertigungsplanung

Die zweite Bewertung befasste sich mit einer Simulationsaufgabe zur Vorbereitung einer Produktionsplanung. Eine Web-Applikation als zentrale Softwareanwendung und vier Office-

Dokumente lagen für Probanden bei der Aufgabendurchführung vor. Im Probandentest wurden die Zeit zur Erfüllung der Aufgabe, die subjektiv wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit der SW-Benutzungsschnittstelle und die Qualität der erfüllten Aufgabe gemessen.

5.2.1 Untersuchungsdesign Fertigungsplanung

Die Testumgebung basierte auf einer Webapplikation, die im europäischen Forschungsprojekt DREAM (Simulation based application Decision support in Real-time for Efficient Agile Manufacturing) entwickelt wurde. Diese Simulationssoftware ermöglicht es, die Fertigungsprozesse anhand von Parametern zu planen. Die Parameter umfassen die zu modifizierenden Eingaben zum Fertigungsauftrag, wie Produktionsumfang oder Arbeitszeiten der Mitarbeiter. Die zentrale Softwareanwendung DREAM stand am Anfang in Vollbildarstellung am (vertikalen) Bildschirm zur Verfügung. Die von Probanden ausgeführte Aufgabe bestand in einer typischen Parametervariation für einen Simulationsvorgang, die über verschiedene Reiter/Schaltflächen in der Web-Applikation vorgenommen wurde. Die vier Parameter waren im Einzelnen: Qualifikation der Mitarbeiter, tägliche Arbeitszeit, Maschinenbelegungszeit und die Stückzahl der zu fertigenden Einheiten. Die zu modifizierenden Parameter wurden von den Probanden aus den zur Verfügung stehenden Dokumenten 1 bis 4 entnommen. Diese Hilfsunterlagen lagen am herkömmlichen Ingenieursarbeitsplatz minimiert (Icons) am Bildschirm und am *Extended Workdesk* in Originalgröße auf dem horizontalen Bildschirm geöffnet vor:

- Dokument 1/.pdf beinhaltete die Qualifikationsänderung der Mitarbeiter (Product Builder Skills),
- Dokument 2/.xlsx stellte die Arbeitszeit der Mitarbeiter (Product Builder) vor,
- Dokument 3/.docx bildete die Maschinenbelegungszeit (Machine Shifts Spreadsheet) ab und
- Dokument 4/.pptx präsentierte den laufenden Umfang der Teileproduktion (Work in Progress (WIP) Spreadsheet) mit den Angaben zur Stückzahl (Number of Units).

Die Fertigungsplanungsaufgabe wurde mit der schriftlichen Erfassung des Ergebnisses der durchgeführten Simulation abgeschlossen. Die Aufgabe entsprach der betrieblichen Situation aus der Praxis, mit einer verteilten Informationsstruktur und einer Datenversorgung in unterschiedlichen Dokumentformaten.

Am heutigen Arbeitsplatz standen folgende Arbeitsmittel zur Verfügung: ein 24-Zoll Bildschirm mit 1920x1200 Pixel Auflösung, eine Tastatur, eine Maus, ein Aufgabenblatt und ein Stift. Der weiterentwickelte Prototyp *Extended Workdesk* verfügte über ein 55-Zoll-OLED-Multitouch-Display mit 3840x2160 Pixel Auflösung, einen vertikal angeordneten 30-Zoll-Bildschirm mit 2560x1440 Pixel, eine Tastatur, eine Maus, ein Aufgabenblatt und ein Stift. Bild 4 zeigt den Aufbau der Untersuchung zur Fertigungsplanung mit dem heutigen Arbeitsplatz und dem weiterentwickelten *Extended Workdesk*.

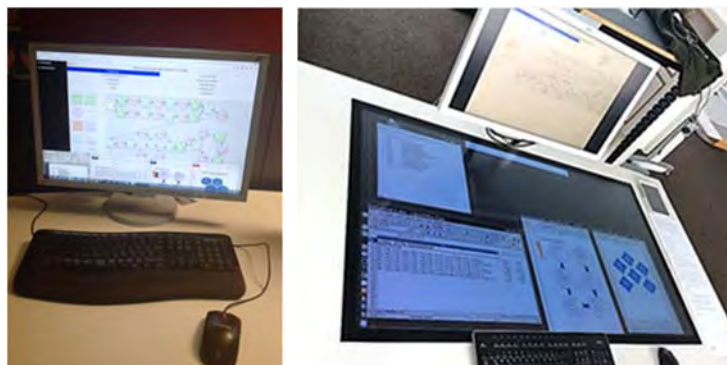
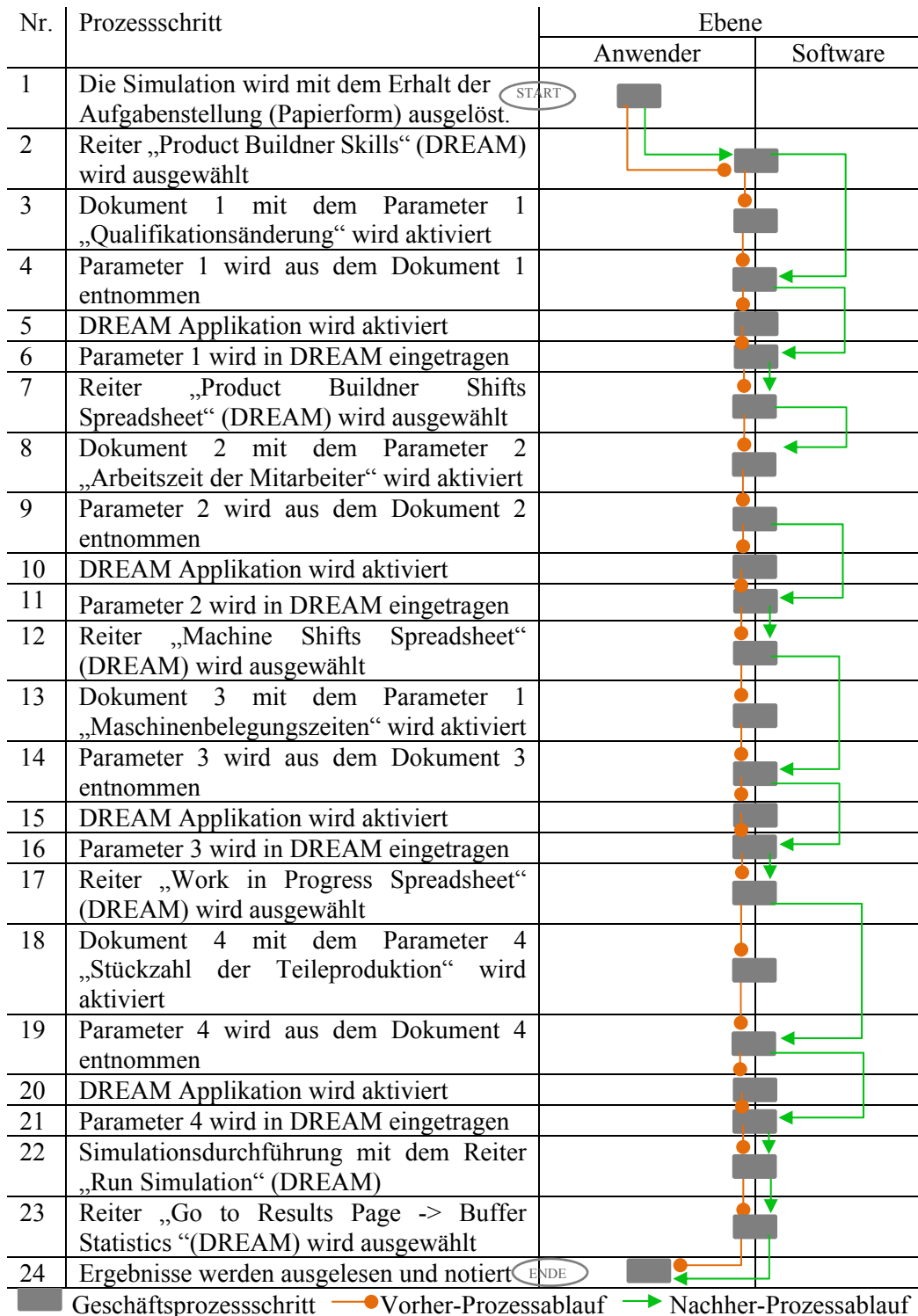


Bild 4: Untersuchung Fertigungsplanung - heutiger Ingenieursarbeitsplatz und Prototyp *Extended Workdesk*

5.2.2 Geschäftsprozess heutiger Arbeitsplatz/ Extended Workdesk

Analog zur Vorgehensweise bei der Konstruktionsaufgabe wurde zur Evaluierung der Fertigungsplanungsaufgabe zunächst die Komplexitätsreduktion anhand der Geschäftsprozessmodellierung untersucht. Eine Aufteilung der Prozessschritte fand hier in Benutzer- und Software-Ebene statt. Die Durchführung der Aufgabe Fertigungsplanung erforderte keine weiteren Hardware-Geräte außer der untersuchten SW-Benutzungsschnittstelle. Die Modellierungen der Prozessablaufschritte am heutigen Arbeitsplatz („vorher“) und am Extended Workdesk („nachher“) wurden erfasst und in Tab.2 zusammengeführt.

Tabelle 2: Prozessablaufdiagramm der Aufgabe in Untersuchung Fertigungsplanung



Die Anzahl der Schritte im Vorher-Prozessablauf beläuft sich auf 24 und im Nachher-Prozessablauf auf 16 Geschäftsprozessschritte. Bedeutet also eine Reduktion von 8 Prozessschritten (33 %) bei der Ausführung der Aufgabe am *Extended Workdesk*. Die entfallenen Prozessschritte (Nr. 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20) konnten durch die Nutzung des großflächigen horizontalen Bildschirms zur parallelen Bearbeitung der genutzten Applikationen (Dokumente 1-4) reduziert werden.

5.2.3 Evaluierung mittels Probandentest

Ergänzend zur Auswertung der Geschäftsprozessschritte wurde ein Probandentest zur Erhebung statistisch auswertbarer Daten zur Evaluierung der eingangs genannten Messkriterien durchgeführt. Das Probandenkollektiv bestand aus zwei Gruppen jeweils mit 21 Teilnehmer.

Als Parameter für die Effizienz wurde die vom Probanden benötigte Zeit zur Aufgabendurchführung gemessen. Die Anwenderzufriedenheit wurde mit der System Usability Scale (SUS) (Brooke 1996) erhoben. Zur statistischen Auswertung wurde der parameterfreie Wilcoxon-Mann-Whitney-Test (Bortz 2005) in den zwei evaluierten Gruppen "Büroarbeitsplatz" (Vorher-Prozess) und "Extended Workdesk" (Nachher-Prozess) angewandt. Die ermittelten Werte in den zwei Gruppen sind signifikant verschieden. Eine detaillierte Auswertung der statistischen Parameter stellt Tab. 3 vor.

Tabelle 3: Statistische Auswertungen

	Mittelwert		Standardabweichung		Effektstärke nach Cohen
	Büroarbeitsplatz	Extended Workdesk	Büroarbeitsplatz	Extended Workdesk	
Zeit zur Aufgabendurchführung, Sek.	234	211	63	49	0,42
Anwenderzufriedenheit nach SUS, %	58,5	73,0	17	18	0,85

Die Effizienz-Effektstärke nach Cohen ($d=0,42$) resultiert aus den berechneten Mittelwerten (234 und 211 Sek.) und der Standardabweichungen (63 und 49) der Zeit zur Aufgabendurchführung und tendiert somit zu einem mittleren Effekt. Bei der Evaluierung der Anwenderzufriedenheit wurden die Mittelwerte (58,5 und 73%) und Standardabweichungen (17 und 18) der mittels SUS erhobenen Daten eingesetzt, diese führten zu einer großen Effektstärke nach Cohen ($d=0,85$). Beide Effektstärken zeigen ein starkes Unterscheidungsmerkmal der zwei evaluierten Gruppen und bestätigen einen deutlichen Vorteil der nutzerzentrierten Gestaltung der SW-Benutzungsschnittstelle der Anwendergruppe *Extended Workdesk*.

Zur Bewertung der Effektivität wurde die Qualität der Aufgabendurchführung erfasst. Die Qualität ist bei der vorliegenden Aufgabe durch die Korrektheit der dokumentierten Simulationsergebnisse zu bewerten. Der prozentuale Anteil korrekter Simulationsergebnisse bildet das Maß für die Effektivität.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Auswertung von Usability Messgrößen

Usability Messgrößen	Büroarbeitsplatz	Extended Workdesk	Optimierung
Effektivität	76,2%	85,7%	9,5%
Effizienz	234 Sek.	211 Sek.	9,8%
Zufriedenstellung	58,5%	73%	14,5%

Tab. 4 repräsentiert die Ergebnisse der Evaluierung von Usability-Messgrößen. Mit einer Steigerung der Effektivität um 9,5%, der Effizienz um 9,8% und der Zufriedenstellung um 14,5% konnten deutliche Verbesserungen durch die nutzerzentrierte SW-Benutzungsschnittstelle am *Extended Workdesk* nachgewiesen werden. Diese Verbesserung der Usability-Messgrößen zeigt, neben der Komplexitätsreduktion von 33% im Prozessablaufdiagramm der Fertigungsplanungsaufgabe, dass der höhere Aufwand bei der Realisierung von nutzerzentrierten Ingenieursarbeitsplätzen zu messbaren Verbesserungen führt.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein innovatives Konzept der Mensch-Computer-Schnittstelle für Arbeitsplätze in Produktentwicklung und Produktionsplanung sowie dessen Evaluation vorgestellt.

Auf der Geschäftsprozessebene wurde die Komplexität um 26% (Konstruktion) und um 33% (Fertigungsplanung) reduziert. Die Experten-Beurteilung mit 75% der Zustimmung zur Vereinfachung des Arbeitsablaufs (Konstruktion) durch Nutzung des Extended Workdesk wurde in einem statistischen Test (Fertigungsplanung) zu den Usability-Messwerten Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit mit einer Optimierung über 10% im Durchschnitt nachgewiesen.

Es wird deutlich, dass bei dessen Konzeption und Realisierung ein nutzerzentrierter Ansatz unabdingbar ist. In der prozessorientierten Betrachtung stellte sich die Frage der Zuordnung von Prozessschritten zur Anwender-, Software- und Hardware-Ebene. Im Zuge der fortschreitenden Entwicklung in Richtung Engineering 4.0 könnte in dem Anwendungsfall Konstruktion beispielsweise der Prozessschritt 3 "Betroffene Konstruktionszeichnung öffnen" automatisiert auf der Software-Ebene ablaufen und dadurch mit der Zeit auch aus dem mentalen Modell der Anwender "verschwinden".

Die weitere Entwicklung des *VDI*-Konzeptes zielt unter anderem auf die nahtlose Integration von 3D-Informationen in die Benutzungsoberfläche. Ein Beispiel ist die maßstäbliche 3D-Darstellung von CAD-Konstruktionsdaten gemeinsam mit allen Desktop-Applikationen auf dem Extended Workdesk.

Es ist zu erwarten, dass das *VDI*-Konzept auf die meisten Anwendungsbereiche mit hohem Informationsaufkommen und der Notwendigkeit zu möglichst großformatiger Datenabbildung übertragbar ist. Ein Beispiel ist der Bereich Planung, Architektur und Bau.

Literatur

- | | |
|----------------------------|--|
| Bauer et al. 2016 | BAUER, Wilhelm; JURECIC, Mitja; RIEF, Stefan; SCHULLERUS, Maren: <i>Digitales Arbeiten. Motive und Wirkung papierarmer Arbeitsweisen</i> . Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2016. |
| Bortz 2005 | BORTZ, Juergen: <i>Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler</i> . 6. Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2005. |
| Bues und Wingert 2016 | BUES, Matthias; WINGERT, Benjamin: <i>VDI - a hybrid 2D/3D environment</i> , In: Proceedings of EuroVR Conference, Athens, 22.-24. Nov. 2016. |
| Brooke 1996 | BROOK, John: <i>SUS - A quick and dirty usability scale</i> . In: Usability evaluation in industry 189 (194), S. 4-7, 1996. |
| DIN ISO 9241 Teil 11 2015 | Norm DIN ISO 9241 Teil 11 Dezember 2015. <i>Ergonomie der Mensch-System-Interaktion- Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte</i> . |
| DIN ISO 9241 Teil 110 2008 | Norm DIN ISO 9241 Teil 110 September 2008. <i>Ergonomie der Mensch-System-Interaktion- Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung</i> . |
| Gadatsch 2012 | GADATSCH, Andreas: <i>Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis</i> . 7.Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. |
| Lange 2016 | LANGE, Olga: <i>User Software Assistants: just "a nice to have" or a real necessity? State-of-the-Art</i> . In: Procedia CIRP 50, S. 583-588, 2016. |
| Lenhard et al. 2013 | LENHARD, Jörg; HARRER, Simon; WIRTZ, Guido: <i>Measuring the Installability of Service Orchestrations Using the Square Method</i> . In: Service-Oriented Computing and Applications (SOCA) 6 (IEEE), S. 118-125, 2013. |
| Pirchheim et al. 2009 | PIRCHHEIM, Christian; WALDNER, Manuela; SCHMALSTIEG, Dieter: <i>Deskothèque: Improved spatial awareness in multi-display environments</i> . In Proceedings of IEEE Virtual Reality (VR 2009), S. 123-126, 2009. |

Future Personas als Werkzeug zum Entwurf von Produkten und Dienstleistungen für den Kunden der Zukunft

Harriet Kasper¹, Maximilien Kintz¹, Monika Kochanowski¹, Anette Weisbecker¹

¹Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart, Deutschland

harriet.kasper@iao.fraunhofer.de
maximilien.kintz@iao.fraunhofer.de
monika.kochanowski@iao.fraunhofer.de
anette.weisbecker@iao.fraunhofer.de

Abstract: Future Personas kombinieren den Ansatz der Persona, als konkrete Darstellung von Kunden durch Archetypen, mit Megatrends – langfristigen zukünftigen Entwicklungen, die viele Lebensbereiche betreffen. Sie sind damit ein Werkzeug, um Produkte und Dienstleistungen sowohl kunden- als auch zukunftsorientiert zu entwickeln. Diese Arbeit beschreibt sowohl das Vorgehen zur Erstellung von Future Personas als auch Anwendungsmöglichkeiten und Ansätze zur Erweiterung des Konzeptes. Die konkrete Validierung im Rahmen eines Workshops sowie die Auswertung mittels Fragebogen deuten auf eine hohe Relevanz und Akzeptanz bei den Anwendern hin.

Keywords:

Persona, Zukunft, Megatrends, Produktentwicklung, Innovation

1 Einleitung

Das nutzerzentrierte Design unterstützt Entwickler bereits seit Jahren erfolgreich dabei, Produkte und Dienstleistungen auf den Kunden zuzuschneiden. Dafür ist das Werkzeug der Personas – also der präzisen Darstellung von Nutzern durch Archetypen – eine geeignete und bewährte Methode, deren Einsatz auch im Ingenieursbereich sinnvoll ist (Krueger et al. 2015). Personas werden genutzt, um die Empathie für den Kunden und die Kundenerfahrung (User Experience) für bestimmte Aspekte besser herauszuarbeiten und im Entwicklungsteam zu kommunizieren.

Aktuelle Trends sind die Digitalisierung von ganzen Branchen und eine häufig miteinhergehende Disruption durch neue Markteintritte. Dies hat einen immensen Wandel in verschiedenen Bereichen durch Marktumbrüche zur Folge (Hammermann und Klös 2016). Während viele Unternehmen mit den Herausforderungen kämpfen, die solche Marktumbrüche mit sich bringen, verändern sich die Kundenerwartungen ebenfalls mit dem steigenden Marktangebot. Um den immer neuen resultierenden Anforderungen der Kunden gerecht zu werden, müssen in immer kürzeren Zyklen neue Produkte und Dienstleistungen entwickelt werden.

In der Produktion ist jedoch die Einrichtung von Produktionsanlagen ein hemmender Faktor für dynamische Änderungen. Der Umbau und die Konzeption von Fertigungsanlagen kann durch Flexibilisierung immer besser auf sich ändernde Erwartungen angepasst werden (Spath et al. 2013, p. 6). Dennoch wird durch die Begrenzung der Flexibilisierungsmöglichkeiten der Maschinen nach wie vor ein gewisser Vorlauf notwendig sein, oder anders formuliert, die benötigten Flexibilitätsgrade müssen bereits im Vorfeld eingeplant werden.

Auch in der Software-intensiven Finanzbranche existieren IT-Altsysteme, die teilweise nur langsam angepasst werden können. Es wird heute auch von der „Two-Speed-IT“ gesprochen: während agile kleine Satelliten neue Trends wie Apps nachverfolgen, bewegt sich der tragende Pfeiler der Finanzsysteme nur sehr langsam voran. Hinzu kommt, dass manche Geschäftsmodelle in dieser und anderen Branchen auch explizit auf einer möglichst langen Laufzeit basieren. Beispiele sind Wartungsverträge, Altersrückstellungen oder Versicherungsverträge.

Daraus ergibt sich der Bedarf, Produkte, Dienstleistungen und darauf basierende Geschäftsmodelle bereits für die Kundenbedürfnisse der Zukunft zu entwickeln. Nach aktuellem Kenntnisstand gibt es keine Methode, um zukünftige Personas (Future Personas) aus aktuell vorliegenden Personas der

Gegenwart (Gegenwartspersonas) abzuleiten. Daher werden in dieser Arbeit Future Personas durch Transposition von Gegenwartspersonas anhand von Zukunftstrends generiert und für den Entwurf von Produkten und Dienstleistungen für den Kunden der Zukunft angewendet.

Dieser Artikel ist wie folgt aufgebaut: Zunächst werden in Abschnitt 2 verwandte Arbeiten in zwei Bereichen beschrieben. Der erste Baustein sind Personas und Forschung, die auf der Nutzung und Erweiterung von Personas beruhen. Der zweite wichtige Baustein ist die Zukunftsforschung. Verschiedene Institutionen haben es sich zur Aufgabe gemacht, sogenannte Megatrends zu recherchieren und zu publizieren, wie beispielsweise das Zukunftsinstitut (2015), die Universität St. Gallen (Maas et al. 2015) und TrendOne (2017). In Abschnitt 3 wird das Konzept der Future Persona beschrieben. Hierzu wird eine Übersicht gegeben, bevor das Vorgehen zur Transposition der Future Persona auf Basis einer existierenden Persona im Detail beschrieben wird. Die Darstellung der Future Persona, sowie die Nutzung der Future Persona für die Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen werden beschrieben. In Abschnitt 4 folgt die Umsetzung anhand eines konkreten Beispiels. Dieses wird durch verschiedene Methoden validiert. Schließlich folgen eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten.

2 Verwandte Arbeiten

2.1 Personas

Personas wurden ursprünglich von Alan Cooper (Cooper 1999) eingeführt. Diese Archetypen von Nutzern eines Systems oder Produkts bestehen üblicherweise aus einem realistischen Namen, einem Foto und einem Steckbrief mit wenigen demographischen Angaben. Hinzu kommen Ziele, Motivationen und Verhaltensweisen, welche typischerweise als Text formuliert werden (Cooper 1999). Nach Marshall et al. (2015) eignet sich das Prinzip für viele Einsatzzwecke und hat sich aufgrund zahlreicher Vorteile etabliert (Rönkkö et al. 2004 und Pruit 2003). Zum Beispiel helfen Personas Produktdesignern sich auf Endanwender (Kunden) und deren Bedürfnisse zu fokussieren, in dem sie Endanwender greifbarer machen als statistische Darstellungen. Ferner machen Personas Kommunikation über Endanwender im Entwicklungsteam leichter und deswegen auch häufiger.

Jedoch wurden bei der Verwendung von Personas unter anderem folgende Defizite erkannt: So können Benutzerprofile, die sich über eine längere Zeitperiode ändern, nicht einfach abgebildet werden (Miller und Williams, 2006). Aktuell fehlen passende Methoden, um Zukunftsszenarien und zukünftige Nutzer darstellen zu können. Um die von uns entwickelten Future Personas von den weithin verwendeten Personas abzugrenzen werden diese in den anderen Abschnitten als Gegenwartspersonas bezeichnet.

2.2 Trend- und Zukunftsforschung

Kreibich (2009) unterscheidet bei aktuellen Methoden der Zukunftsforschung vier grundlegende Vorgehensweisen: erstens ein *exploratives empirisch-analytisches Vorgehen*, welches Zukunftswissen nach genauen Regeln zu wahrscheinlichen und möglichen Entwicklungen zusammenführt; zweitens ein *normativ-prospektives Vorgehen*, welches Phantasie und Kreativität nutzt, um Zukunftsbilder zu erstellen; drittens ein *kommunikativ-projektierendes Vorgehen* bei dem Zukunftswissen so aufbereitet wird, dass es Zukunftsziele und -strategien unterstützt und viertens ein *partizipativ-gestaltendes Vorgehen* welches relevante Akteure miteinbezieht und damit den Gehalt an Zukunftswissen, sowie die Phantasie und Kreativität bei der Gestaltung von Zukunftsbildern erhöht. In der Praxis kommt oft ein Methodenmix zum Einsatz. Das Spektrum der weltweiten Zukunftsforschung ist sehr breit und befasst sich mit globalen, gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in unterschiedlichen Zeithorizonten und Themenfeldern. Die Wissenschaftlichkeit der „feuilletonistischen Trend- und Zukunftsforschung“ wird unter anderem von Rust (2008) diskutiert. Laut Pillkahn (2012) decken schon Trends im Wissensspektrum verschiedene Stufen von „Wissen“ über „fundierten Meinungen“ bis hin zu „Vermutungen“ ab. Das „wirklich Neue“ (heute Unbekannte) liegt im Bereich der Spekulation und bleibt deshalb oft gänzlich unberücksichtigt, obwohl es zusammen mit Unsicherheiten und sogenannten Wildcards einen wesentlichen Teil der Zukunft ausmacht. In der

Szenariobildung verdeutlicht dies der Szenario-Trichter (Gausemaier et al. 1998). Dort werden positive, negative und neutrale Entwicklungen von Trends modelliert, um dieser Unsicherheit, die der Zukunftsforschung innewohnt, gerecht zu werden.

Als Basis für diese Arbeit dienen kompakt aufbereitete Megatrends (Spalte Eigene), welche, die durch andere Institute identifizierten Trends zusammenfassen (siehe Tabelle 1). Diese eher langfristigen Entwicklungen bilden die Grundlage für die Zukunftsbilder, welche durch Future Personas gestaltet werden. Auch Megatrends aus der Wissenschaft, wie sie Kreibich (2012) beschreibt, lassen sich hier einordnen, ebenso wie die „Geschichten aus der Zukunft“, welche im BMBF Foresight-Zyklus II erstellt wurden (Zweck 2015).

Tabelle 1: Megatrends bzw. Zukunftstrends

Eigene	Zukunftsinstitut (Zukunftsinstitut 2015)	St. Gallen (Maas et al. 2015)	TrendOne (TrendOne 2017)
KNOWing	Wissenskultur	Wissensgesellschaft	Skill Society Data Era
LIVing	Gesundheit Silver Society Neo-Ökologie	Demographischer Wandel Knappheit	Healthstyle Aging Society Sustainability
MOVing	Urbanisierung Mobilität Globalisierung	Cocooning	Urbanization Continental Shift Outernet
BEing	Individualisierung Gender Shift	Identitätsjagd	Individualization Transhumanism Attention Economy
WEing	Konnektivität New Work	Selbstverwaltung Zentralisierung Vernetzung	Connected World Seamless Commerce Shy tech Autonomous Systems
SECURing	Sicherheit	Sicherheit	Distrust Society

Das verwendete explorativ empirische-analytische Vorgehen umfasst neben der Auseinandersetzung mit Megatrends, Literaturrecherche und Analyse von Technologietrends, Publikationen von ThinkTanks wie beispielsweise 2bAHEAD auch den Besuch und die Auswertung von Technologie-Konferenzen wie beispielsweise der TNW 2016. Hinzu kommt ein partizipativ-gestaltender Ansatz durch Experteninterviews und Diskussionen innerhalb eines Industriearbeitskreises (mehr als 50 Personen).

Ein weiterer Bestandteil von Future Personas sind Microtrends, wie sie zum Beispiel TrendOne (TrendExplorer) und Future Management Group (FutureNet) für ihre Kunden aufbereiten. Es handelt sich dabei um kurze Gegenwarts-Impulse über neue Technologien, Prototypen, Produkte, Services, Startups oder auch neue Geschäftsmodelle, Marketing- und Medieninnovationen. Solche Microtrends sind im Gegensatz zu Megatrends sehr konkret und greifbar und eine wichtige Ergänzung für Future Personas, die im nächsten Abschnitt genauer in einem kreativen und redaktionellen Prozess (normativ-prospektives Vorgehen) erstellt und visualisiert werden. Die Darstellung spielt für die spätere Nutzung von Future Personas als Impuls für Innovation eine entscheidende Rolle (Pillkahn 2012).

3 Konzept der Future Persona

3.1 Anforderungen und Überblick

Future Personas wurden im Rahmen eines unternehmensübergreifenden Netzwerkes (Industriearbeitskreis) aus folgenden Anforderungen heraus entwickelt: Erstens soll die Future Persona weiterhin die gleichen Kriterien erfüllen, wie herkömmliche Personas (Gegenwartspersonas); zweitens soll die Future Persona mehrere relevante Aspekte aus zukünftigen Trends verdichten; und drittens soll die Glaubwürdigkeit der Future Persona ebenso hoch sein wie von Gegenwartspersonas.

Das Konzept der Future Persona nutzt Gegenwartspersonas, die mit Hilfe von Zukunftstrends transponiert werden, um Produkte und Dienstleistungen für den Kunden der Zukunft zu gestalten. Der Grundgedanke dabei ist, dass für die Entwicklung zukünftiger Produkte und Dienstleistungen auch zukünftige Personas herangezogen werden müssen.

Eine Gegenwartspersona wird in die Zukunft transponiert, indem individuell betrachtet wird, ob und wie ein Zukunftstrend Einfluss auf die Persona haben wird. Diese Transposition wird anhand von konkreten Fragen bezüglich der Reaktion der Persona auf den Zukunftstrend ausgestaltet. Dies erleichtert die Erstellung der Persona und führt zu Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit im Erstellungsprozess.

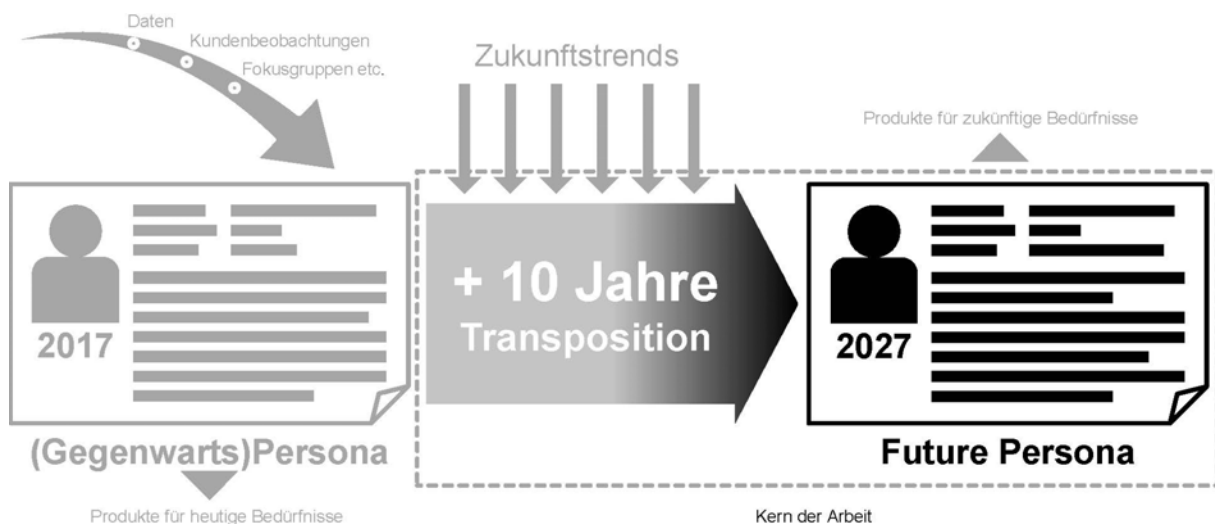


Bild 1: Konzept der Transposition einer Gegenwartspersona anhand von Zukunftstrends zur Future Persona

3.2 Vorgehen zur Transposition von (Gegenwarts)Personas anhand von Trends

Megatrends sind ganze Themenkomplexe, die z. B. in der Megatrend-Dokumentation des Zukunftsinstitutes (2015) auf jeweils 20 redaktionell aufbereiteten Seiten in Form von Daten und kurzen Essays beschrieben werden. Zu dieser Themenvielfalt kommt, dass jeder Mensch von allen Megatrends betroffen ist. Dabei ist jeder Mensch für manche Megatrends stärker, für andere weniger empfänglich und steht manchen sogar entgegen (Gegentrends). Um die Megatrends und die Gegenwartspersona zu verknüpfen wird eine Fragen-Lebenswelt-Matrix verwendet. Die verwendeten Lebenswelten Arbeit, Familie, Freizeit, Geld, Konsum, Medien und Mobilität lehnen sich an die aus den Sinus-Milieus bekannten Kategorien an (Sinus Institut 2017). Es gibt die gleiche Anzahl Fragen zu jedem Megatrend. Jede Frage kann gar nicht, für eine oder für mehrere Lebenswelten beantwortet werden.

Fragen können zumeist auch mehreren Megatrends zugeordnet werden. Zur Erstellung und Auswahl der Fragen pro Megatrend wurde ein mehrstufiger kollaborativer Prozess verwendet, bei dem die Beteiligten auch über die Megatrends hinausgehende Quellen wie Technologiestudien und Experteninterviews berücksichtigten. Beispielhaft wird in Tabelle 2 die Fragen-Lebenswelt-Matrix für den Megatrend KNOWing auszugsweise dargestellt.

Neben der Fragen-Lebenswelt-Matrix als einfaches Instrument, um die Inhalte der Future Persona zu generieren, wird eine Sammlung von Microtrends genutzt, die den Megatrends zugeordnet wurde. Diese Microtrends sind von den Teilnehmern des Industriearbeitskreises hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet worden, so dass die besonders relevanten für die Konkretisierung der Future Personas ausgewählt werden können.

Ausgehend von der textuellen und visuellen Beschreibung (Geschichte) der Gegenwartspersona werden die Fragen für die zu erstellende Future Persona beantwortet und drei oder mehr Microtrends für sie ausgewählt. Diese Informationen werden in einem redaktionellen Prozess zur Geschichte der Future Persona. Da es sich um ein empathisches Instrument handelt, steht die Glaubwürdigkeit des

Ergebnisses im Vordergrund. Durch mindestens zwei Reviewer wird die Glaubwürdigkeit der Future Persona gesichert.

Tabelle 2: Auszug aus der Fragen-Lebenswelt-Matrix zur Transposition von Personas

#	Fragestellungen aus dem Megatrend KNOWing	Arbeit	Familie	Freizeit	Geld	Konsum	Medien	Mobilität	Sonstiges
1	Welche digitalen Assistenten und KI-Systeme nutzt die Persona in der Zukunft?								
2	Welche (neuen) Daten stehen der Persona in Zukunft in den verschiedenen Lebenswelten zur Verfügung?								
3	Welche Daten gibt die Persona in den verschiedenen Lebenswelten von sich preis?								
4	Welche Formate der Wissensvermittlung nutzt die Persona in Zukunft? (Video-Tutorials, Online-Trainings, etc.)								
5	Welche kollaborativen Formen der Wissensgenerierung nutzt die Persona?								
..									

3.3 Arbeiten mit Future Personas

Das Erstellen von (Gegenwarts-)Personas ist heute häufig Teil von nutzerzentrierten Innovationsmethoden, wie beispielsweise dem Design Thinking (Plattner et al. 2009). Diese Personas beruhen zumeist nicht auf harten Fakten, sondern sind stark von Wissen, Erfahrung und Empathie der Teilnehmer abhängig. Future Personas werden im Gegensatz dazu nicht in, sondern als Vorbereitung für solche Workshops generiert und den Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Sie dienen wie Personas als Kommunikationsinstrument innerhalb von (Entwicklungs)Teams und finden vor allem in Innovations- und Szenarioworkshops Verwendung. Trotz der strukturierten Art und Weise der Erstellung ist es nicht Zweck von Future Personas, repräsentative Zukunftsmenschen darzustellen oder Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten von Technologien oder sonstigen Entwicklungen zu treffen. Sie sind als Werkzeug und Impulsgeber für Innovationen zu betrachten.

Vor allem, wenn Produkte und Dienstleistungen für eine weiter entfernte Zukunft erstellt werden müssen, reduzieren Future Personas für den Entwickler die Komplexität an den Nutzer, den Bedarf, die zukünftige Entwicklung und sich manifestierende Trends gleichzeitig zu denken. Future Personas sind inspirierend, umfassend und sparen Zeit.

4 Umsetzung und Validierung

4.1 Beispiel

Bild 2 zeigt beispielhaft die Gegenwartspersona Erkan Bilgin. Grundlage für die Persona war ein Workshop mit 15-jährigen Schülern. Es wurden dabei mehrere fiktive Personas erstellt und diskutiert. Die Gegenwartspersona besteht aus zwei Seiten, welche beide eindeutig mit der gegenwärtigen Jahreszahl – hier 2017 – markiert sind. Der Titel auf der ersten Seite enthält neben Name und Alter auch die Beschäftigung der Persona – in diesem Fall „Schüler (Realschule, 9. Klasse)“. Ein Foto und ein kleiner Steckbrief stehen direkt darunter. Der Steckbrief enthält Hobbies, Familienstand, Quelle der Persona und Sinus-Milieu (Sinus-Insitut 2017). Sinus-Milieus sind eine für die Produktentwicklung und Kommunikation häufig genutzte Zielgruppensegmentierung. Sie sind nicht so konkret wie Personas, stellen aber neben der hier verwendeten Fokusgruppenbeobachtung und -diskussion eine gute datenbasierte Grundlage für Personas dar.

Kern der Beschreibung der Gegenwartspersona sind mehrere Textabsätze, die verschiedene Aspekte der Gegenwartspersona im Zusammenhang erzählen (Storytelling). Mögliche Themenfelder sind die

Lebenswelt-Dimensionen der Matrix also Arbeit, Familie, Freizeit, Geld, Konsum, Medien und Mobilität.

2017
2017

Erkan Bilgin, 15 Schüler (Realschule, 9. Klasse)



Hobbies: Computer spielen, Fußball, Rappen
Familienstand: ledig
Sinuzumfeld: 6 Bürgerliche Mitte / Hedonistisches Milieu
Quelle: schülerworkshop 10/16

Die Ikonköpfige Familie Bilgin lebt in einer kleinen Doppelhaushälfte im Stadtteil Feuerbach in Stuttgart. Erkan ist gerade 15 Jahre alt und sein Bruder Kaan (Ka-Ann ausgesprochen) ist 20. Tochterchen Isabella ist mit 5 Jahren die jüngste im Hause - bis jetzt - denn Mutter Bettina ist derzeit zum vierten Mal schwanger. Erkans Vater ist vor 25 Jahren nach Deutschland ausgewandert und hat dort Erkans heutige Mutter Bettina kennengelernt und geheiratet. Heute arbeitet der 49-jährige als Elektriker bei Bosch. Bettina hält als moderne Hausfrau und Mutter die Familie zusammen.

Hier in Deutschland haben sie sich ein weltoffenes, aber traditionell beissames Leben aufgebaut. Seit seine Schwester Isabella auf der Welt ist, teilen sich Erkan und sein Bruder Kaan ein Zimmer. Mit dem Alter werden entstand zwischen den Brüdern eine kleine Rivalität, die sich durch häufige Meinungsverschiedenheiten und Streitereien äußert. Eigentlich wünscht sich Erkan ein besseres Verhältnis zu seinem Bruder. Seine Familie steht bei ihm an erster Stelle. Dem geplanten Umzug wegen dem erneuten Zweuchs in eine größere Wohnung sieht er positiv entgegen. Ein eigenes Zimmer würde die Stimmung zwischen Erkan und Kaan erheblich verbessern.

Im Sportverein Feuerbach ist Erkan sehr engagiert. Mit sechs Jahren wuchs in ihm eine immer größer werdende Begeisterung für Fußball heran. Inzwischen spielt der 15-jährige erfolgreich in der B-Jugend als Stürmer - den Traum, Profi-Fußballer zu werden dabei im Hinterkopf. Auch in seiner Freizeit verbringt Erkan viel Zeit mit Fußball und spielt mit seinen Freunden oder seinem Bruder. Die Motivation, die er für seine Hobbies aufbringt, fällt ihm leider in der Schule. Wo er beim Fußball vorne mit dabei ist, spielt er dort nur im hinteren Mittelfeld mit.

Auch mit seinen Freunden unterhält er sich gerne über seine Lieblingsvereine FC Barcelona und Galatasaray Istanbul. Entweder über soziale Netzwerke oder bei einem Shisha-Abend. Per Snapchat und Instagram verfolgt er das Treiben seiner Lieblingspieler oder -musiker. Am liebsten hört er Rap oder Hip Hop. Selbst rappt er auch und schreibt sogar eigene Texte. Er hält sich mit Darbietungen allerdings meist zurück, da er sich nicht dem Urteil seiner Freunde oder Familie stellen will. Stärke und Respekt sind für ihn wichtige Attribute. Wenn es also um Emotionen geht, die ihn soft wirken lassen, behält er seine Gedanken lieber für sich. Und so ist er unter seinen Freunden eher als rauher Mensch bekannt, der sich gerne widersetzt.

Erkans Eltern stehen komplett hinter ihrem Sohn und lassen ihm seine Freiheit. Wenn nötig, investieren sie auf materielle Art in ihren Sohn und kaufen ihm das Smartphone seiner Wahl. Wenn Erkan sich zurückziehen möchte, spielt er dagegen gerne Zuhause am Computer. Neben Titeln wie Fifa zockt er auch Rennspiele oder Shooter.

Seine Freizeitaktivitäten muss Erkan allerdings meist selber zahlen. Hierfür arbeitet er seit einigen Monaten einmal wöchentlich als Zusteller für Werbeprospekte. Ihm ist es wichtig, früh selbst Geld zu verdienen, um später auch für ein eigenes Familienleben vorbereitet zu sein. Um bei seinen Freunden beliebt zu bleiben, gibt er auch manchmal einen aus.

**„Nur außerhalb der
Schule lernt man
fürs Leben“**



1 | EB, 15
2 | EB, 15

Bild 2: Darstellung Gegenwartspersona: Erkan Bilgin, 15

Abschluss der Beschreibung der Gegenwartspersona bildet eine für sie typische Aussage, sowie auf der zweiten Seite eine Bildcollage, welche Leben und Stimmung der Gegenwartspersona repräsentiert. Diese visuellen Elemente sind besonders wichtig, weil durch sie nonverbal, schnell und gut erinnerbar weitere Perspektiven für den Nutzer der Gegenwartspersona angeboten werden. Die Persona wird dadurch noch konkreter und „dichter“.

Pendant zu der Bildcollage der Gegenwartspersona bildet in der in Bild 3 dargestellten Future Persona eine Grafik, die die Ausprägung der Megatrends (vergl. Tabelle 1) darstellt. Jeder Megatrend wird durch ein Symbol dargestellt, dessen Größe für die Bedeutung des Megatrends für die Persona steht. Stichworte konkretisieren die Megatrend-Aspekte, welche die Future Persona verkörpert. Die sich in der Future Persona manifestierenden Trends und ihr Weg dahin finden sich ausformuliert im beschreibenden Text wieder. Zudem ist die Gewichtung der einzelnen Megatrends im Abschnitt unter Hobbies angegeben. Auch der Future Persona ist ein Portrait zugeordnet, welches die Glaubwürdigkeit erhöht. Außerdem werden der Future Persona jeweils drei konkrete neuartige Technologien, Produkte oder Services zugeordnet. Es handelt sich dabei um gegenwärtige Microtrends, die durch einen knappen Titel und ein Bild dargestellt werden. Außerdem kann über einen Kurzlink eine genauere Beschreibung des Microtrends abgerufen werden.

2027
2027

Erkan Bilgin, 25 Mechatroniker



Hobbies: Fußball, Autos, Soziale Netzwerke

- Future Way # BE-ing: 1/8
- Future Way # MOV-ing: 3/8
- Future Way # WE-ing: 4/8
- Future Way # SECUR-ing: 2/8
- Future Way # LIV-ing: 4/8

Erkan Bilgin wohnt mit seiner Familie inzwischen einen Ort weiter in Weilimdorf. In ihrem neuen Zuhause ist genug Platz für Erkan, Isabella (18) und Sefira (9). Kaan (30) ist schon länger ausgezogen, ist aber regelmäßig zu Besuch.

Erkan hat direkt nach dem Schulabschluss eine Lehre zum Mechatroniker in einer Werkstatt begonnen. Damit wollte er zum einen in die Fußstapfen seines Vaters treten und zum anderen sein neu gewonnenes Interessensfeld - Autos - einbinden. Der 25-jährige wurde nach seiner Ausbildung übernommen und arbeitet seither dort.

Auch seinem Verein ist Erkan bis heute treu geblieben. Als Stammspieler im Kader stehen neben mehrmaligem Training die Woche auch häufig Spiele am Wochenende an. Um die Fitness der Spieler zu kontrollieren und deren Vitaldaten zu erfassen, werden im Training leitende Klebe-Fatigos angewendet, welche unter anderem den Blutsauerstoffgehalt anzeigen. Allzu starkes Feiern am Vorabend oder gesundheitlich bedingte Schwäche fällt damit schnell auf und das Training kann angepasst oder beendet werden.

Mit seinen Freunden verabredet er sich meist über soziale Netzwerke. Über diese informiert er sich auch gerne über Technik-Trends. Mit einer kleinen handlichen Drohne verbringt er sich seine Freizeit oder fliegt damit Rennen gegen seine Kumpels in Kombination mit einer Virtual-Reality-Brille. Seinen Alltag präsentiert er gerne im Internet.

Er posiert mit seinem Auto – einem alten E-Golf, den von seinem ersten Gehälter gekauft hat – und dokumentiert seine Arbeit daran. Regelmäßige Updates halten seine Follower bei Laune.

Erkans nächstes Ziel wäre ein Job bei Porsche. Dafür wäre er auch bereit, Weiterbildungskurse in Kauf zu nehmen. Fasziniert ist er von autonomen Automobilen. Vor allem die künstliche Intelligenz des Fahrzeugs beeindruckt ihn. Die Beteiligung beim Zusammenbau selbstfahrender Autos steht bei ihm weit oben auf der Wunschliste.

Um sein eigenes Auto aufzurüsten, hat Erkan ein smartes Display mit seinem Auto verknüpft, welches zusätzlich noch, bei geplanten Autofahrten kann er dann über das Smartphone die passende Route herausfinden und Verkehrsbehinderungen umfahren.

Mit seinem Bruder Kaan pflegt Erkan heute ein besseres Verhältnis. Seit Kaans Auszug hat sich das Kraftmessen gelegt, nicht zuletzt auch deshalb, da sein Bruder mittlerweile selbst Vater geworden ist.

„Ich nutze Technik, die meinen Alltag erleichtert“



Virtual Reality: Kamera für das Smartphone
<http://a1hg.de/529>



Future Drone mit „Follow Me“ Funktion
<http://a1hg.de/452>



LED Bicolors auf der Haut
<http://a1hg.de/768>

8 | EB_25
4 | EB_25

Bild 3: Darstellung Future Persona: Erkan Bilgin, 25

4.2 Validierung

Das Werkzeug der Future Personas wurde begleitend zu einem Industriearbeitskreis entwickelt und dabei durch die Teilnehmer aus fünf beteiligten Unternehmen hinsichtlich der im Konzept vorgesehenen Anforderungen validiert. Zusätzlich wurden Future Personas in einem Workshop konkret angewendet und mit den Workshop-Teilnehmern diskutiert. Schließlich wurde mittels eines Fragebogens die Meinung der Workshop-Teilnehmer erhoben.

„Sehr hilfreich für die Überlegung zu neuen Produkten“, „der Mensch/Kunde wird in den Fokus gerückt“ sind Zitate, die zeigen, dass Future Personas den ursprünglichen Zweck von Personas weiterhin erfüllen. Auch der Kommunikationsaspekt der Future Personas wurde gemeinsam mit dem Aspekt der Trendkommunikation explizit herausgehoben: „Gut zur Kommunikation dessen was in Zukunft eventuell relevant ist“. Ein Kritikpunkt ist, dass die modellierten Personas nicht den Normalbürger zeigen und nicht repräsentativ sind – das gilt jedoch für Personas im Allgemeinen. Gleichzeitig wurde der Wunsch nach extremeren, überraschenden, innovativeren und zukunftsweisenderen Future Personas geäußert. Interessant ist der Vorschlag, die Reaktion auf einzelne Technologien als Element von Future Personas zu berücksichtigen. Diskutiert wurden vor allem die Megatrends als Grundlage der Future Personas. Die Qualität der verwendeten Zukunftstrends im Sinne der Unterscheidung von Trend und Hype ist wichtig. Die Anpassung der Megatrend-Darstellung ist erforderlich, um die Ausprägung einer Persona bezüglich eines Megatrends noch verständlicher zu gestalten.

Fünf Future Personas kamen in einem halbtägigen Workshop mit ca. 30 Personen zum Einsatz. Ziel des Workshops war es, zukünftige Szenarien für verschiedene Lebenswelten (Arbeit, Familie, Freizeit, Geld und Konsum) zu erstellen. Neben den Future Personas kam Scenes (Scenes 2017) – ein Visual Storytelling Werkzeug – zum Einsatz. In dem Workshop entstanden sehr konkrete Szenarien in sehr kurzer Zeit. Beide Effekte sind auch durch den Einsatz von Scenes alleine zu beobachten, jedoch ermöglichen Future Personas eine erhebliche Zeitersparnis. Darüber hinaus stellt die Verwendung von Future Personas sicher, dass darin gesetzte Trendthemen in den Szenarien berücksichtigt werden.

Das Lesen der bereitgestellten Future Personas hat während des Workshops etwas individuelle Zeit erfordert. Um das zu optimieren könnte man die Future Personas entweder zur Vorbereitung vorab verschicken, als gemeinsam zu betrachtendes Video bereitstellen oder durch den Moderator vorstellen lassen. Auffällig in dem Workshop war, dass andere Dokumente zu Technologien und Trends, die den Workshopteilnehmern bekannt waren und zur Verfügung standen, im Gegensatz zu den Future Personas bei den Teilnehmern kaum Beachtung fanden. Wir vermuten, dass der Umfang und allgemeine Charakter dieser Dokumente die Teilnehmer weniger angesprochen hat bzw. dass die Technologien und Trends, welche die Future Persona selbst enthielt, als ausreichende Inspiration betrachtet wurden.

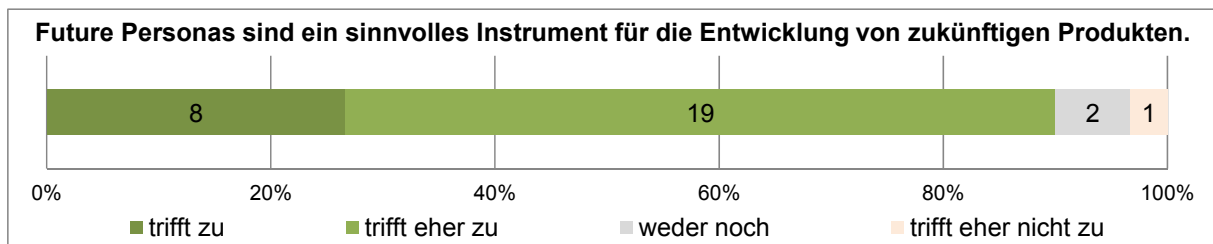


Bild 4: Befragung nach Verwendung von Future Personas (n=30)

Der Workshop wurde anhand eines Fragebogens ausgewertet. Bild 4 zeigt, dass fast alle Workshop-Teilnehmer (90%) Future Personas als sinnvolles oder eher sinnvolles Instrument zur Entwicklung von zukünftigen Produkten betrachten. Lediglich einer von dreißig Teilnehmern stimmte der Aussage eher nicht zu.

Die hier kurz dargelegte erste Validierung von Future Personas bestätigt das Konzept sowie eine hohe Relevanz für und Akzeptanz bei den Anwendern.

5 Ausblick

Aktuell wird die Frage untersucht, wie das Zusammenspiel von Future Personas mit Zukunftsszenarien zu gestalten ist. Weiterhin wird geklärt, ob ein bisher nicht vorhandener Branchenfokus sinnvoll ist. Neue Hinweise gibt eine laufende Zukunftsstudie basierend auf „einfachen“ Zukunftsthesen, die von einer breit angelegten öffentlichen Befragung bewertet werden. Future Personas machen die Information der Megatrends konkret und zugänglich. Es gilt im weiteren Verlauf des Industriearbeitskreises, sowie durch Anwendung in anderem Kontext, weiter zu zeigen, wie das Heranziehen von Future Personas den Prozess zur Entwicklung von Ideen für zukünftige Produkte und Dienstleistungen verbessert, sowie Möglichkeiten aufdeckt, die ohne den Einsatz von Future Personas nicht betrachtet werden würden.

Die Arbeit mit Future Personas und deren Evaluation und soll zunächst in folgenden Bereichen weiter vertieft werden: Elemente von Future Personas, Vorgehen zur Erstellung von Future Personas (Transposition), Anwendungsfelder von Future Personas und Einbettung in eine umfassende Innovationsmethodik.

Die aktuelle Darstellung von Future Personas schließt Gegenwartspersonas als Teil der Story mit ein. Geprüft werden muss z. B. durch A/B Tests, inwiefern die Gegenwartspersona für das Verständnis und die Glaubwürdigkeit der Future Persona notwendig ist und auch wenn sie das für den Anwender nicht ist, welche Rolle eine ausformulierte Gegenwartspersona für die Transposition spielt. Da Megatrends wenig greifbar sind muss erwogen werden in der Darstellung darauf zu verzichten und stattdessen viel mehr konkrete Microtrends zu verwenden. Für das Vorgehen zur Erstellung der Future Persona bedeutet das, dass möglicherweise nach der Trendauswahl ein ausführlicher Microtrend-Matching Schritt hinzugefügt wird. Die zusätzlich verfügbaren visuellen Elemente beeinflussen die Future Persona positiv indem sie sie zusätzlich verdichten. Hinsichtlich der Transposition im allgemeinen muss überprüft werden was die ideale Fragen-Anzahl ist und welche Dichte an (textuellen) Zukunftsaspekten sinnvollerweise in einer Future Persona integriert werden kann. Wird über einen längeren Zeitraum mit einer Future Persona gearbeitet stellt sich die Frage nach der

Haltbarkeit derselben, dies gilt auch für die Trends bzw. Fragen, welche zur Transposition herangezogen werden.

Um die Vielfalt der Menschen abzubilden, wäre eine (Future)Persona Datenbank sinnvoll, welche verschiedene Milieus, Altersklassen etc. aber auch z. B. verschiedene Technologien, Trends oder Zeithorizonte abdeckt. Durch ein solches durchsuchbares Angebot könnte man sowohl die Anforderung nach „normalen“ Future Personas, als auch nach extremen, sogenannten Wildcards erfüllen.

Danksagung

Wir bedanken uns ganz herzlich bei den Teilnehmern des Innovationsnetzwerkes Digitalisierung für Versicherungen für Ihre Mitwirkung bei der Evaluation des Future Persona Konzeptes und Karen Detken, der Entwicklerin von Scenes, für die Unterstützung bei der Vorbereitung des Workshops.

Literatur

- Cooper 1999 COOPER, Alan: *The Inmates Are Running the Asylum*. Indianapolis: Macmillan, 1999
- Gausemeier et al. 1998 GAUSEMEIER, Jürgen; FINK, Alexander; SCHLAKE, Oliver: *Scenario Management: an approach to develop future potentials*. In: *Technological Forecasting & Social Change*, Oct, 1998, Vol. 59 Issue 2, S. 111- 130
- Hammermann und Klös 2016 HAMMERMANN, Andrea; KLÖS, Hans-Peter: *Digitalisierung und Arbeitsmarkt - Stellungnahme für die Enquetekommission „Zukunft von Handwerk und Mittelstand in NRW“ des Landtages NRW*. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 2016
- Kreibich 2009 KREIBICH, Rolf: *Die Zukunft der Zukunftsforschung Ossip K. Flechtheim – 100 Jahre*. Arbeitsbericht Nr. 32/2009. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT, Berlin, 2009
- Krueger et al. 2015 KRUEGER, Anne-Elisabeth; FRONEMANN, Nora; PEISSNER, Matthias: *Das creative Potenzial der Ingenieure – menschenzentrierte Ingenieurskunst*. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2015.
- Maas et al. 2015 MAAS, Peter; BÜHLER, Pascal; CACHELIN, Joel Luc: *2050 Megatrends: Alltagswelten und Zukunftsmärkte*. Universität St. Gallen Institut für Versicherungswirtschaft, 2015
- Marshall et al. 2015 MARSHALL, Russel; COOK, Sharon; MITCHELL, Val; SUMMERSKILL, Steve; HAINES, Victoria; MAGUIRE, Martin; SIMS, Ruth; GYI, Diane; CASE, Keith: *Design and Evaluation: End users, user datasets and personas*. In: *Applied Ergonomics* 46 (2015), S. 311-317.
- Miller und Williams 2006 MILLER, Granville; WILLIAMS, Laurie: *Personas: Moving Beyond Role-Based Requirements Engineering*. Microsoft und North Carolina State University, 2006. <http://agile.csc.ncsu.edu/SEMaterials/Personas.pdf>
Zugriffsdatum: 17.10.2016
- Pillkahn 2012 PILLKAHN, Ulf: *Pictures of the Future*. In: FOCUS-Jahrbuch 2012, Wolfgang J. Koschnick (Hrsg.), Prognosen, Trend und Zukunftsforschung. Focus Magazin, München, 2006, S. 393-434
- Plattner et al. 2009 PLATTNER, Hasso; MEINEL, Christoph; WEINBERG, Ulrich: *Design Thinking, Innovation lernen – Ideenwelten öffnen*. Mi-Wirtschaftsbuch, Münchner Verlagsgruppe GmbH, München, 2009

- Pruit 2003 PRUITT, John und GRUDIN, Jonathan: *Personas: Practice and Theory*. In: *Proceedings of the 2003 Conference on Designing for User Experiences*, San Francisco, 2003.
- Rönkkö et al. 2004 RÖNKKÄ, Kari; HELLMAN, Mats; KILANDER, Britta und DITTRICH, Yvonne: *Personas is not Applicable: Local Remedies Interpreted in a Wider Context*. Toronto: Participatory Design Conference, 2004.
- Rust 2008 RUST, Holger: *Zukunftsillusionen: Kritik der Trendforschung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2008
- Scenes 2017 Scenes – SAP User Experience Design Services <https://experience.sap.com/designservices/approach/scenes> Zugriffsdatum: 16.02.2017
- Sinus Institut 2017 Sinus-Milieus® Deutschland <http://www.sinus-institut.de/sinus-loesungen/sinus-milieus-deutschland/> Zugriffsdatum: 15.02.2017
- Spath et al. 2013 SPATH, Dieter; GANSCHAR, Oliver; GERLACH, Stefan; HÄMMERLE, Moritz; KRAUSE, Tobias; SCHLUND, Sebastian: *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013
- TrendOne 2017 TRENDONE: *Mega-Trends*
<http://www.trendone.com/trenduniversum/mega-trends.html> Zugriffsdatum: 24.01.2017
- Zukunftsinstitut 2015 ZUKUNFTSINSTITUT (Hrsg.); BRAND, Nick; RAUCH, Christian [Projektmanager]: *Megatrend-Dokumentation – die Wegweiser des Wandels*. Frankfurt am Main: Zukunftsinstitut, 2015.
- Zweck 2015 ZWECK, Axel; HOLTMANNSPÖTTER, Dirk; BRAUN, Matthias; ERDMANN, Lorenz; HIRT, Michael; KIMPELER, Simone: *Geschichten aus der Zukunft 2030. Ergebnisband 3 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II*. Innovationsbegleitung und Innovationsberatung der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2015.

Ansatz zur objektiven und effizienten Erfassung der empfundenen Anwendungseignung von Power-Tool

Sven Matthiesen¹, René Germann¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland
sven.matthiesen@kit.edu
rene.germann@kit.edu

Abstract: Um Kundenbedürfnissen gerecht zu werden, müssen diese bereits bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Damit dies gelingt, müssen die Bedürfnisse erfasst und in konkrete Konstruktionszielgrößen überführt werden. Aktuelle Ansätze berücksichtigen zwar den Bedarf nach anwendungsorientierten Zielgrößen geben aber keine konkreten Handlungsempfehlungen zur effizienten Erfassung der Anwendungseignung. Der vorliegende Beitrag stellt eine methodische Herangehensweise zur Erfassung der empfundenen Anwendungseignung von Power-Tools (z.B. Bohrhämmer, Winkelschleifer, etc.) vor, durch welche eine objektive und effiziente Erfassung erfolgen kann. Diese Herangehensweise wurde dabei iterativ aus den Erkenntnissen aufgebaut, welche innerhalb von Handversuchen, in über 2000 Stunden mit Testpersonen generiert wurden. Die Erkenntnisse haben gezeigt, dass eine Unterteilung der Power-Tool Benutzung in die Phasen des Kaufentscheids, der Disposition und der Markenbindung sinnvoll ist. Des Weiteren wurden geeignete Erfassungsmethoden der Anwendungseignung von Power-Tools entwickelt und vorgestellt.

Keywords:

Nutzerzentrierte Entwicklung, Power-Tools, Anwendungseignung, Fragebogen

1 Einleitung

Die Integration der Kundenbedürfnisse in den Produktentwicklungsprozess nimmt in unterschiedlichsten Management- und Produktentwicklungsstrategien eine zentrale Rolle ein und steht immer mehr im Fokus der modernen Produktentwicklung (Reinicke, et al. 2007). Wie diese Bedürfnisse erfüllt werden, hängt dabei stark vom gewählten Ansatz ab, hat jedoch stets das gleiche Ziel des maximalen Produkterfolgs (Kett, et al. 2014). Als zunehmend populärer werdender Trend sticht die nutzerzentrierte Entwicklung (User-Centered Design) hervor. Hierbei ist der Grundgedanke, den Anwender möglichst früh in die Entwicklung einzubeziehen, um so ein tieferes Verständnis über dessen Anwendungsanforderungen zu erlangen (Mao, et al. 2005). Dies wird durch die bemerkbare Tendenz unterstützt, dass sich in der Produktentwicklung zunehmend von der Idee eines Einheitsprodukts für alle Anwender entfernt wird und sich eher zu dem anwender- und anwendungsspezifischen Produkt („Mass Customization“) hinbewegt wird (Piller, et al. 2009, Glende 2010, Matthiesen, et al. 2013). Dabei muss der Einfluss des Anwenders umso mehr berücksichtigt werden muss, je größer sein direkter Einfluss auf das Anwendungsergebnis bzw. das Ergebnis der Arbeit ist. So spielt der Einfluss des Anwenders hinsichtlich des Arbeitsergebnisses beispielweise bei der Bedienung einer Kaffeemaschine eine deutlich geringere Rolle als bei der Bedienung einer Stichsäge. Gleichzeitig hat aber ein Maurer unter Umständen grundsätzlich andere Anforderungen an eine Stichsäge als ein Tischler (Matthiesen, et al. 2016b). Das Produkt muss also zu den jeweiligen Anforderungen des Anwenders passen, bzw. in der Lage sein, diese in geeignetem Umfang zu erfüllen (Matthiesen, et al. 2016a, Hofbauer 2013). Die Herangehensweise der nutzerzentrierten Entwicklung führt erwiesener Maßen bei Produkten mit starken Anwenderwechselwirkungen, wie es beispielsweise bei Power-Tools der Fall ist, zu einer signifikanten Verbesserung der Produkte (Mao, et al. 2005). Dennoch werden vor allem aus Kosten- und Zeitgründen die zur Verfügung stehenden Maßnahmen und Methoden oft nur sehr begrenzt eingesetzt und nur unzureichend in der Produktentwicklung berücksichtigt (Mao, et al. 2005). Es fehlt also an einer durchgängigen Herangehensweise, welche es ermöglicht Anwendungsanforderungen quantitativ und

effizient zu erfassen und dadurch konkrete Zielgrößen für die Produktentwicklung abzuleiten (Mussgnug, et al. 2015). Hierbei werden reproduzierbare Größen benötigt, anhand derer eine objektive Validierung der Produkte durchgeführt werden kann. Dies gelingt wiederum nur, wenn die Anwendung unter kontrollierten Bedingungen erfasst werden kann und daraus definierte Referenzversuche abgeleitet werden können. Ziel dieses Beitrags ist es daher, eine methodische Vorgehensweise aufzuzeigen, durch welche, unter definierten Versuchsbedingungen, Testpersonen in die Lage versetzt werden, Power-Tools objektiv in unterschiedlichen Benutzungsphasen hinsichtlich der Anwendungseignung zu bewerten.

2 Stand der Forschung

2.1 Ansätze der nutzerzentrierten Produktentwicklung

Ausgehend von klassischen Prozessmodellen der Produktentwicklung wie dem Entwicklungs- und Konstruktionsansatz nach Pahl & Beitz (Pahl/Beitz 2012) oder dem Vorgehen der VDI 2221 verändert sich die moderne Produktentwicklung zunehmend in Richtung nutzerzentrierter Ansätze, welche den Nutzer aktiv in den Produktentwicklungsprozess einbinden (Reinicke, et al. 2007). Gründe für die Einbindung des Nutzers variieren dabei stark und reichen von der Erfassung des Wettbewerbsvergleichs, über die allgemeine Ermittlung von Meinungen, Denkweisen und Bedürfnissen bis hin zur Identifikation von Fehlern und Handhabungsproblemen (Glende 2010). Eine mögliche Auswahl an Methoden zur Erfassung der Nutzerbedürfnisse, welche in der Produktentwicklung eingesetzt werden können, stellt Tabelle 1 vor (Glende 2010). Glende unterscheidet dabei nach Analysemethoden zur Beobachtung und Beschreibung der Benutzung von Produkten und nach Testmethoden zur Analyse von Stärken und Schwächen von Produkten im Einsatz. Es wird dabei deutlich, dass dem Entwickler zunächst eine Vielzahl an möglichen Vorgehensweisen zur Verfügung steht. Die Durchführung der Methoden ist hierbei oftmals durch nicht unerhebliche monetäre Aufwände sowie durch Ressourcenknappheit, bedingt durch fehlendes Testpersonal sowie fehlendem Anwendungswissen, erschwert und wird nicht immer angemessen durchgeführt (Reinicke 2004, (Kett, et al. 2014)). Weiterhin findet eine Auswertung dieser Methoden hinsichtlich des potentiellen Nutzerbedürfnisses zwar statt, eine konkrete Überführung in für die Produktentwicklung nutzbare Ziele wird aber nicht unterstützt. Dieses Bild spiegelt sich ebenso bei der Betrachtung diverser Methoden und Vorgehensweisen zur Gestaltung nutzergerechter Produkte wider (VDI 2221, DIN ISO 20282). In den teilweise recht umfangreichen Ansätzen, wird der Entwickler dazu motiviert, möglichst umfangreich das Nutzerverhalten und die Bedürfnisse bzw. Erwartungen des Nutzers hinsichtlich des Produkts zu erfassen und diese bei der Entwicklung des Produkts zu berücksichtigen. Dabei werden weder konkrete Handlungsanweisungen zur Verfügung gestellt, noch Unterstützung bei der Umsetzung angeboten (Kett, et al. 2014). Insgesamt mangelt es also an einer ganzheitlichen Herangehensweise, welche den Produktentwicklungsprozess (inklusive Validierung) so unterstützt, dass dieser auf die Erfassung und Überführung der Nutzeranforderungen in konkrete Entwicklungszielgrößen angepasst werden kann. Für eine durchgängige nutzerorientierte Produktentwicklung fehlt es zudem an einer unterstützenden Vorauswahl geeigneter Erfassungsmethoden für unterschiedliche Anwendungsfälle sowie an einer Methode zur Überführung der subjektiven Nutzeranforderungen in messbare Konstruktionszielgrößen, welche direkt in der Produktentwicklung umgesetzt werden können.

Analysemethoden	Fokusgruppendifkussion	Moderierte Diskussion mit potenziellen oder tatsächlichen Produktnutzern oder Experten.
	Beobachtung	Beobachtung im natürlichen Lebensumfeld bei geringer Beeinflussung der Beobachteten.
	Befragung (fragebogenbasiert)	Erfassung von Nutzermeinungen anhand von Fragebögen, meist mit großer Teilnehmerzahl.
	Befragung (interviewbasiert)	Erfassung von Nutzermeinungen durch persönliche Befragung zu bestimmten Sachverhalten, meist unter Verwendung eines Leitfadens mit groben Themen bzw. Fragenvorgaben.

	Critical-Incident-Technique	Befragung von Nutzern zu auffällig guten oder schlechten Ereignissen beim Umgang mit Produkten oder im Alltag.
	Thinking Aloud / Lautes Denken	Lautsprachliche Beschreibung von Tätigkeiten und Gedankengängen durch den Nutzer während der Durchführung von Aufgaben.
Testmethoden	User Experience Test	Nutzer erhalten eine konkrete Aufgabenstellung, die sie mit einem Produkt bearbeiten müssen. Dokumentation und Bewertung von Nutzungsprozess und Nutzungsergebnis.
	Feldtest	Test weit entwickelter Produkte durch viele Anwender in realer Anwendungsumgebung über längere Zeiträume.
	Customer Feedback Methoden	Sammlung und Nutzung von Kundenbeschwerden oder -ideen, die während der Produktnutzung entstehen.
	Out of the Box Test	Ganzheitliche Bewertung der Produktnutzung, inklusive der Anlieferung, Verpackungsöffnung, der Installation und der ersten Nutzung.
	Multiple User Simultaneous Testing (MUST)	Gleichzeitige Durchführung eines User-Experience-Test mit mehreren Teilnehmern.

Tabelle 1: Auswahl an Methoden zur Erfassung der Anwendungseignung (Glende 2010)

2.2 Rahmenbedingungen zur Erfassung der empfundenen Anwendungseignung

Die Validierung von Produkten verfolgt das Ziel, festzustellen, ob ein entwickeltes Produkt zu den Erwartungen des Kunden passt und ob es diesen hinsichtlich der Eignung des Produkts überzeugen kann (Albers, et al. 2016). In Anlehnung an die E.N. ISO 9241-11 ist die Anwendungseignung als das Ausmaß definiert, wie effektiv, effizient und zufriedenstellend ein technisches System von einem definierten Anwender in seinen relevanten Anwendungen genutzt werden kann. Eine hohe Anwendungseignung führt dabei zu einer hohen Anwenderakzeptanz gegenüber dem Produkt. Zur Erfassung der empfundenen Anwendungseignung werden im Stand der Forschung klare Rahmenbedingungen gegeben, unter welchen die Erfassung stattfinden sollte. Dabei ist ein wesentlicher Bestandteil, dass eine objektive Erfassung nur stattfinden kann, wenn sie unter definierten Versuchsbedingungen stattfindet und jeder Proband nach Möglichkeit die gleichen Rahmenbedingungen vorfindet (Berekoven, et al. 2009). Berekoven et al. spricht dabei von der Versuchsobjektivität, welche sich in die Durchführungsobjektivität, die Auswertungsobjektivität und die Interpretationsobjektivität unterteilt. Ziel der Ansätze ist es dabei, objektive Messdaten durch eine möglichst geringe Beeinflussung des Versuchsleiters, eine standardisierte Auswertung der Messdaten und einen möglichst kleinen Interpretationsfreiheitsgrad der Ergebnisse zu generieren (Berekoven, et al. 2009). Weiterhin spielen die Art wie Produkte dem Probanden präsentiert werden, sowie die Formulierung der jeweiligen Aufgabenstellung eine entscheidende Rolle bei der Qualität der Ergebnisse (Bojko 2013, S. 70–84). Bei der Präsentation der Produkte wird dabei zwischen der Between-Subject- Design-, bei welcher jeder Proband ein Produkt präsentiert und der Within-Subject-Design-Vorgehensweise, bei welcher jeder Proband mehrere Produkte präsentiert bekommt, unterschieden. Dabei werden bei der zweiten Vorgehensweise Carryover-Effekte erwartet, durch welche eine Beeinflussung des Probanden durch die vorherigen Produkte stattfindet (Bojko 2013, S. 81–84). Durch diesen Effekt ist es Probanden möglich, eine Gegenüberstellung von Produkten vorzunehmen und diese gegeneinander zu vergleichen. Ein weiterer Vorteil der Within-Subject-Design-Vorgehensweise gegenüber der Between-Subject-Design-Vorgehensweise ist der geringere benötigte Stichprobenumfang. Bei der Formulierung der Aufgabenstellung muss darauf geachtet werden, dass der Proband durch die Aufgabe in ein möglichst realistisches Szenario eingebunden wird und dort realitätsnahe Ziele verfolgen muss. Bei der Bearbeitung der Aufgabe sollten konkrete Versuchszeiten und Pausenzeiten vorgegeben werden. Dabei muss beachtet werden, dass es zu starken Bewertungsschwankungen kommen kann, wenn die Probanden über unterschiedliche Erfahrungen mit dem zu bewertenden Produkt verfügen (Bojko 2013, S. 84–86).

2.3 Aufbau von fragenbogenbasierten Befragungen

Bei der Erfassung der empfundenen Anwendungseignung mit den bestehenden Ansätzen (vgl. Tabelle 1) erfolgt in den meisten Fällen eine rein qualitative Erfassung. Dabei können aus den qualitativen Daten nur schwer messbare, quantitative Ziele für die Produktentwicklung abgeleitet werden, weshalb Skalen eingesetzt werden, um eine Übertragbarkeit zu Referenzversuche zu realisieren (Kittl 2009, S. 90). Bei der Verwendung von Fragebögen können Skalen eingesetzt werden, um dem Bewertenden die Möglichkeit zu geben, seine subjektive Einstellung hinsichtlich unterschiedlicher Bewertungsakronyme oder Statements einzuordnen. Ein verbreiteter Ansatz hierzu ist die Verwendung der Likert-Skala, bei welcher der Grad der Zustimmung, hinsichtlich unterschiedlicher Statements auf einer fünfstufigen Ratingskala angegeben wird. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt dabei auf Ordinalniveau, kann aber begrenzt als Intervallskala behandelt werden, da der Abstand der Skalenwerte als konstant angenommen wird (Berekoven, et al. 2009). Zur Bewertung einzelner Produktmerkmale, im Sinne einer mehrdimensionalen Einstellungsmessung, bietet sich die Verwendung des semantischen Differentials an, da dieser Ansatz die Möglichkeit bietet, einzelne Aspekte eines Produkts mit Hilfe einer siebenstufigen, bipolaren Ratingskala zu bewerten. Die Bipolarität zeichnet sich dabei durch zwei gegensätzliche Adjektive an den Skalenendpunkten aus. Eine weitere Möglichkeit zur mehrdimensionalen Einstellungsmessung bietet sich durch die Verwendung von Multiattributmodellen. Der Unterschied dieses Ansatzes im Vergleich zum Modell des semantischen Differentials ist die produktspezifische Bewertung, welche von den Produkteigenschaften des Einzelprodukts abhängt (Berekoven, et al. 2009). Die Verwendung aller angesprochenen Modelle findet überwiegend in der allgemeinen Marktforschung statt und liefert meist rein qualitative Ergebnisse oder vergleichende Ergebnisse. Die Überführung der Ergebnisse in quantitativ messbare Werte wird zwar von einzelnen Autoren diskutiert (Tamm, et al. 2009), findet aber nur in sehr geringem Umfang statt. Wird eine Quantifizierung gewünscht, empfehlen Tamm et al. lediglich die Verwendung von Referenzprodukten, wodurch die Ergebnisse zueinander in Bezug gesetzt werden können. Konkrete Handlungsempfehlungen, welche in der Produktentwicklung direkt umgesetzt werden können, können aus diesen Ergebnissen nur schwer abgeleitet werden.

3 Forschungsansatz

Bei der Entwicklung von Power-Tools ist es wichtig, dass das fertige Produkt optimal zum Anwender und dessen Anwendungen passt. Dies zu beurteilen ist schwierig, da die empfundene Anwendungseignung von einer Vielzahl von Einflüssen abhängt. Ausgehend von dem in Abbildung 1 dargestellten Forschungsdesign wurde daher am IPEK – Institut für Produktentwicklung eine Versuchs-

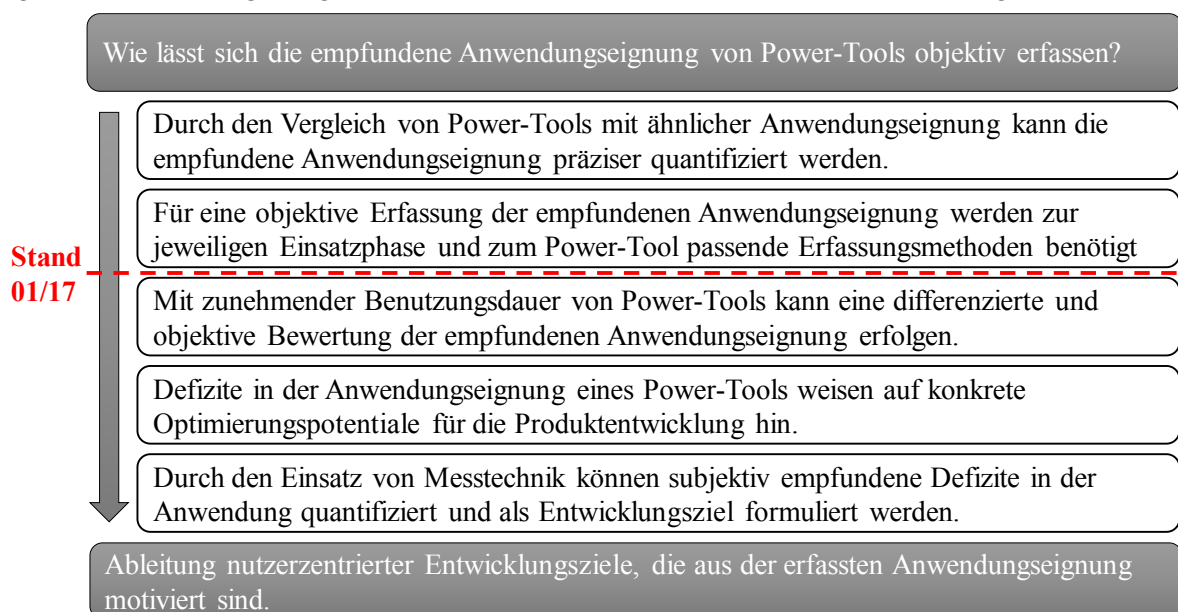


Abbildung 1: Forschungsansatz und einzelne nötige Forschungsaktivitäten

umgebung aufgebaut, in welchem Power-Tools in unterschiedlichen, realitätsnahen Anwendungen von Testpersonen getestet und von diesen hinsichtlich der Anwendungseignung bewertet werden können. Daher wird in diesem Beitrag das methodische Vorgehen zur Erfassung der Anwendungseignung vorgestellt und die dafür benötigte Versuchsumgebung definiert. Ferner werden Ergebnisse zu Benutzungsphasen und geeigneten Methoden zur Erfassung der Anwendungseignung vorgestellt.

4 Methode zur objektiven Erfassung der Anwendungseignung von Power-Tools

Ausgehend von dem von Matthiesen et. al (2016b) vorgestellten Prozessmodell wird im Folgenden der methodische Aufbau zur Durchführung definierter Vorversuche vorgestellt, durch welche neben einer Priorisierung relevanter Probandengruppen und der Auswahl geeigneter Messtechnik für Feldstudien, erste Entwicklungsziele abgeleitet werden können. Hierzu wird innerhalb der Vorversuche die Durchführung von Screening-Versuchen mit Testpersonen empfohlen, durch welche eine Bewertung der Power-Tools hinsichtlich der potentiellen Anwendungseignung stattfinden kann. Die im Beitrag dargestellte Methode stellt dabei die Ergebnisse zum Aufbau der Versuchsumgebung vor, in welcher die Anwendungseignung von Power Tools objektiv erfasst werden kann. Die Versuchsdurchführung gliedert sich dabei in unterschiedliche Benutzungsphasen, innerhalb welcher die Anwendungseignung von Power-Tools unter kontrollierten Bedingungen effizient erfasst und bewertet werden kann, auf. Dazu wird zunächst der allgemeine Versuchsaufbau, die Phasen der Benutzung von Power-Tools und

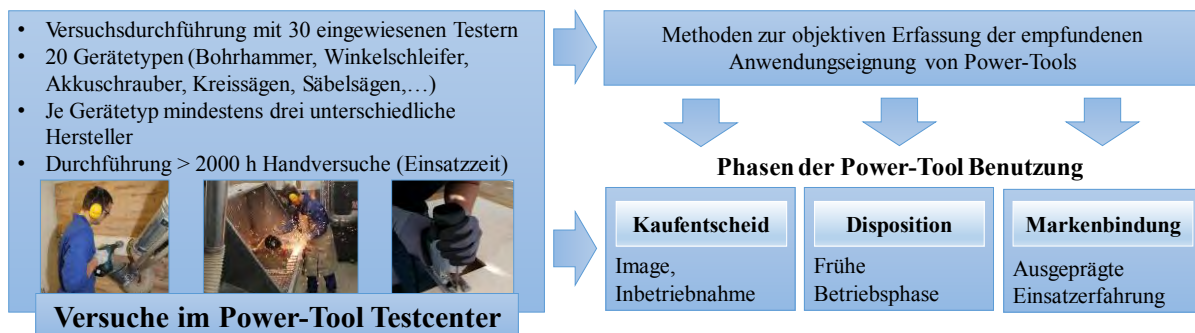


Abbildung 2: Methodischer Aufbau zur Erfassung der empfundenen Anwendungseignung von Power-Tools

im Weiteren geeignete Methoden zur Erfassung der empfundenen Anwendungseignung in den jeweiligen Phasen vorgestellt. Der Aufbau der Forschungsmethode basiert auf den Erkenntnissen aus innerhalb von zwei Jahren durchgeführten Anwendungsversuchen mit über 30 in den unterschiedlichen Anwendungen geschulten Testpersonen. Dabei wurden in insgesamt über 2000 Stunden reiner Betriebszeit, Handversuche an über 20 Power-Tool Typen wie beispielsweise Bohrhammer, Winkelschleifer, Bohrmaschinen, Akkuschrauber, Kreissägen, Säbelsägen, etc. mit jeweils mindestens drei verschiedenen Herstellerprodukten durchgeführt und analysiert. Abbildung 2 gibt hierzu einen Überblick über den Aufbau der Forschungsmethode und die Unterteilung der Benutzungsphasen (Kaufentscheid, Disposition, Markenbindung) und wird im Folgenden separat vorgestellt.

4.1 Versuchsaufbau

Bei der Benutzung von Power-Tools hat der Anwender einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionserfüllung sowie auf das Arbeitsergebnis (Matthiesen, et al. 2014). Zur Beurteilung der Anwendungseignung ist es daher wichtig, die Erfassung unter kontrollierbaren und definierten Bedingungen durchzuführen, um so eine möglichst hohe Versuchsobjektivität sicherzustellen (Berekoven, et al. 2009). Dabei ist es wichtig, dass die für den Anwender relevanten Anwendungen durchgeführt werden, um entsprechend zu den Bedürfnissen des Anwenders passende Entwicklungsziele bzw. Untersuchungspotentiale zu identifizieren. Aus den beiden genannten Gründen werden daher typische Anwendungsfälle des jeweiligen Power-Tools mit Methoden zur Anwendungsfallbeschreibung identifiziert und als Screening-Versuch unter Laborbedingungen durchgeführt (Matthiesen, et al. 2016b). Solch ein Screening-Versuch beinhaltet konkrete Angaben zu

Versuchsdauer, Arbeitsintervallen, Körperhaltung der Probanden, Pausenzeiten, Wahl der Werkzeuge, Wahl der Untergründe, Abkühlzeiten und weitere. Jeder Proband wird aufgefordert neben dem eigentlich zu prüfenden Power-Tool nach dem vorgegebenen Versuchsschema mehrere Referenz-Power-Tools, welche über eine grundsätzlich vergleichbare Anwendungseignung verfügen (beispielsweise Power-Tools für den gewerblichen Anwender) zu testen. Die Präsentation der Power-Tools erfolgt dabei nach dem Between-Subject-Verfahren, wodurch die Voraussetzung gegeben sind, eine vergleichende Bewertung zwischen dem zu untersuchenden und den Referenz-Power-Tools durchzuführen (Bojko 2013, S. 81–84). Durch bestehende Erfahrungen entstehende Carryover Effekte (vgl. Kap. 2.3), werden gezielt durch eine längere Benutzung des Power-Tools minimiert. Dabei hat sich auf Basis von durchgeführten Interviews und bestehenden Bewertungen gezeigt, dass eine phasenweise Benutzung jedes Power-Tools von drei Stunden dazu führt, dass der Einfluss früherer Erfahrungen deutlich an Einfluss verliert und differenzierte Unterschiede festgestellt werden.

4.2 Phasen der Benutzung von Power-Tools

Bei der Benutzung von Power-Tools können drei Phasen beobachtet werden, innerhalb welcher der Anwender aus unterschiedlichen Perspektiven und Schärfegraden ein Produkt hinsichtlich seiner Anwendungseignung wahrnimmt (vgl. Abbildung 2). Die Unterteilung der Phasen basiert dabei auf den innerhalb von zwei Jahren durchgeführten Versuchserkenntnissen und der Auswertung von über 2000 Stunden Handversuchen mit Power-Tools. Die empfundene Anwendungseignung spielt dabei schon bei der Entscheidung ein Produkt zu kaufen eine wesentliche Rolle. Ausschlaggebend für den Kauf sind im wesentlichen bestehende Erfahrungen sowie die ersten Eindrücke bei der initialen Inbetriebnahme und das Image, das dem potentiellen Kunden durch die Präsentation des Power-Tools vermittelt wird. Diese erste Phase wird daher unter dem Begriff des **(1) Kaufentscheids** zusammengefasst und beschreibt alle Erkenntnisse und Eindrücke bis zur ersten Benutzung (reale Anwendung, kein Leerlauf etc.) des Power-Tools. Sobald das Power-Tool die ersten Male in unterschiedlichen Anwendungen im Einsatz war, fängt der Anwender unterbewusst damit an, sich ein Bild von den Eigenschaften und der Anwendungseignung des Power-Tools zu bilden. Zu Beginn spielen während der Benutzung zunächst noch sehr stark persönliche Vorlieben, Markenbewusstsein und bereits gesammelte Erfahrungen bei der Bewertung der Anwendungseignung eine Rolle. Innerhalb dieser frühen Betriebsphase wird dabei auf einer allgemeinen Ebene entschieden, welches Produkt als besonders geeignet empfunden wird, weshalb diese Phase mit dem Begriff der **(2) Disposition** zusammengefasst wird. Nachdem das Power-Tool umfangreich in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt wurde und sich der Anwender auf das System eingelassen hat, können beim Vergleich mehrerer ähnlicher Produkte zunehmend feinere Unterschiede in der Anwendungseignung festgestellt werden. Dabei findet die Beurteilung der Anwendungseignung nicht mehr auf einer allgemeinen Ebene statt, sondern erfolgt deutlich differenzierter. Dabei werden Unterschiede beispielsweise im Handling oder dem Arbeitsergebnis bewusst wahrgenommen und können durch den Anwender beschrieben werden. Power-Tools, welche durch den Anwender nach dieser ausgeprägten Einsatzerfahrung als besonders geeignet für die Anwendung wahrgenommen werden, werden als besonders wertig empfunden, was zum Wiederholungskauf und so zur **(3) Markenbindung** führt. Besonders die dritte Phase ist für Hersteller von Power-Tools relevant, da sie zum nachhaltigen Markterfolg beiträgt und daher möglichst positiv belegt werden soll. In jeder der drei Phasen wird die empfundene Anwendungseignung durch andere Aspekte beeinflusst, weshalb für die Erfassung und Beurteilung phasenabhängige Erfassungsmethoden zum Einsatz kommen müssen.

4.3 Erfassung der empfundenen Anwendungseignung

Ausgehend von den in Tabelle 1 vorgestellten Methoden zur Erfassung der Anwendungseignung sind je nach Benutzungsphase des Power-Tools unterschiedliche Methoden geeignet, die für den Anwender entscheidenden Einflüsse zur Beurteilung der Anwendungseignung zu erfassen und zu interpretieren.

(1) Kaufentscheid: Zur Erfassung der Anwendungseignung innerhalb der Phase des Kaufentscheids müssen Methoden zum Einsatz kommen, welche eine Bewertung der Usability, bestehender Erfahrungen und eventueller Vorurteile, wie beispielsweise gegenüber einer anderen Herstellermarke

und die Beurteilung der initialen Inbetriebnahme des Power-Tools ermöglichen. Die Erfassung muss entsprechend vor Benutzung des Power-Tools stattfinden. Jeder Proband führt zu diesem Zweck einen „Out of the Box Test“ durch und bekommt neben dem zu prüfenden Power-Tool zwei weitere Referenzgeräte in Originalverpackung vorgelegt. Durch den Versuchsleiter erhält der Proband die Vorgabe, jedes der Geräte in Betrieb zu nehmen und hinsichtlich qualitätsrelevanter Merkmale zu untersuchen. Als zusätzliche Erfassungsmethode wird eine fragebogenbasierte Befragung des Probanden durchgeführt. Diese basiert auf einer zustimmungsabhängigen, fünfstufigen Likert-Skala (Ich stimme voll zu – Ich stimme gar nicht zu) hinsichtlich unterschiedlicher Statements (Berekoven, et al. 2009). Der Aufbau orientiert sich dabei an dem Aufbau der System-Usability-Scale-Untersuchung (Brooke 1986), durch welche die Usability von (Software-) Produkten ermöglicht wird. Basierend auf den Erkenntnissen der durchgeführten Handversuche und umfangreichen Interviews mit Probanden, wurden die Statements von Brooke erweitert und auf die Bewertung von Power-Tools optimiert. Die Bewertung teilt sich dabei in allgemeine Statements bezüglich bestehender (Hersteller-) Erfahrungen und in Power-Tool spezifische Statements auf (vgl. Tabelle 2). Die gerätespezifischen Statements variieren leicht in Abhängigkeit des Power-Tool-Typs und sind entsprechend funktionsrelevanter Merkmale formuliert. Zusätzlich zur Bewertung des Zustimmungsgrades hat der Proband die Möglichkeit zu jedem der Statements einen Kommentar abzugeben, mit welchem er seine Entscheidung begründet.

Erfahrungen	• Ich finde, dass das Power-Tool hochwertig verarbeitet wirkt.
	• Ich traue dem Hersteller nicht zu, ein qualitativ hochwertiges Power-Tool zu entwickeln.
	• Ich habe bisher gute Erfahrungen mit dem Hersteller gemacht.
	• Ich denke, dass das Power-Tool im Test schlechter abschneidet als die Referenz-Power-Tools.
Power-Tool spezifisch	• Ich finde, dass das Power-Tool im Vergleich zu wenige Funktionalitäten bietet.
	• Ich finde, dass das Power-Tool eine hohe Sicherheit vermittelt.
	• Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.
	• Ich finde, dass das Gerät gut in der Hand liegt.
	• Ich kann den Trigger bei der Benutzung gut erreichen und seine Verarbeitung wirkt hochwertig.
	• Ich empfinde den Zusatzgriff und dessen Funktionalität als unvorteilhaft.
	• Ich konnte die Werkzeugaufnahme gut einstellen und den Werkzeugwechsel ohne Probleme durchführen.
	• Ich denke, dass das Kabel nicht lang genug ist.
	• Ich empfinde die Kabelqualität als hochwertig.
	• Ich denke, dass das Arbeiten durch eine schlechte Gewichtsverteilung erschwert wird.
	• Ich konnte die Inbetriebnahme reibungslos durchführen.

Tabelle 2: Statements zur Erfassung der Phase des Kaufentscheids am Beispiel Bohrhammer

(2) Disposition: Zur Analyse der Dispositionsphase werden die Testpersonen in der Benutzung des jeweiligen Power-Tool-Typs umfangreich bezüglich typischer Anwendungsfälle geschult. Ziel dabei ist es, den Probanden die Möglichkeit zu geben, erste Erfahrungen in der Benutzung des zu prüfenden Power-Tools im Vergleich zu Referenz-Power-Tools zu sammeln. Die Probanden werden vom Versuchsleiter motiviert, die sich durch dieses Vorgehen einstellenden Eindrücke zu formulieren und laut auszusprechen. Dabei erfolgt eine Erfassung der Anwendung durch Videokameras, wodurch die Aussagen besser zugeordnet werden können (vgl. Thinking Aloud Methode). Vor allem vergleichende Aussagen sind dabei vorteilhaft, da durch diese eine bessere Quantifizierung der Aussagen stattfinden kann.

(3) Markenbindung: Nach vollständiger Bewertung der ersten beiden Phasen führt jeder Proband einen entsprechend definierten Screening Versuch mit dem zu prüfenden sowie den beiden Referenz-Power-Tools durch. Während der Versuchsdurchführung werden phasenweise Interviews mit den Probanden

durchgeführt, durch welche erste Erkenntnisse zu der Anwendungseignung gewonnen werden. Eine fragebogenbasierte Erfassung der Anwendungseignung findet nach vollständiger Bearbeitung der Screening-Versuche statt. Dazu erfolgt eine Befragung des Anwenders mittels vom jeweiligen Power-Tool abhängigen Items, welche auf einer siebenstufigen, bipolaren Skala von „sehr schlecht“ bis „sehr gut“ eingeordnet werden können. Jedes Power-Tool wird hinsichtlich 30 unterschiedlicher Items, welche in den fünf Hauptgruppen „Ergonomie“, „Vibration“, „Geräusch“, „Handhabung“ und „Arbeitsergebnis“ eingeordnet werden, untersucht. Zusätzlich zu der siebenstufigen Skala erhält der Proband die Möglichkeit einer Enthaltung. Durch diese Möglichkeit wird dem Phänomen der „Flucht in die Mitte“ entgegengewirkt (Porst 2014), bei welchem der Bewertende aus der Auswahlnot heraus seine Bewertung mittig in der Skala einordnet. Die vollständige Erfassung findet in einem eigens für diese Untersuchung entwickeltem Softwaretool statt, wobei standardmäßig personenspezifische Daten sowie Daten zum Power-Tool und Zeitpunkt der Bewertung erhoben werden. Weiterhin erhält der Bewertende zusätzliche Informationen zu den Bewertungsitems durch integrierte „Mouseover“-Effekte. Durch die Bereitstellung von Kommentarfeldern zu jedem Item können Gründe für die Bewertungsauswahl und weiterführende Gedanken durch den Probanden im Freitext formuliert werden. Sämtliche erfasste Daten werden standardisiert in Auswertungstabellen abgelegt. Die Versuchszuordnung der Items, also beispielsweise des Power-Tools, der jeweiligen Probanden, etc., erfolgt durch eine zentral gesteuerte ID-Verwaltung. Durch dieses Vorgehen kann eine stets vollständige und vergleichbare Erfassung der empfundenen Anwendungseignung stattfinden, wodurch eine hohe Auswertungsobjektivität erzielt wird.

5 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Der vorgestellte Beitrag stellt eine methodische Vorgehensweise zur objektiven Erfassung der empfundenen Anwendungseignung von Power-Tools zu unterschiedlichen Phasen der Benutzung vor. Dabei werden basierend auf umfangreichen Versuchen mit 20 unterschiedlichen Power-Tool-Typen, jeweils mindestens drei verschiedenen Herstellerprodukten, über 30 Testpersonen und aus den Ergebnissen von über 2000 Stunden ausgewerteter Einsatzzeiten die drei Phasen des *Kaufentscheids*, der *Disposition* und der *Markenbindung* definiert. Zu jeder der Phasen werden Vorgehensweisen und Methoden zur Verfügung gestellt, durch welche die Erfassung der empfundenen Anwendungseignung durchgeführt werden kann. Durch die klar definierte Versuchsstruktur und die optimierten Erfassungsmethoden erfolgt eine weitestgehend objektive Beurteilung der Anwendungseignung. Eine der wichtigsten Erfassungsmethoden stellen dabei entwickelte Fragebögen dar, welche in einem Softwaretool implementiert hoch effizient ausgewertet werden können. Die Befragung erfolgt dabei abhängig von Power-Tool-Typ und Benutzungsphasen, wodurch explizite Ergebnisse zu dem jeweiligen Power-Tool erfasst werden können und sich die bewertenden Probanden besser mit den Fragen auseinandersetzen können.

Der methodische Aufbau der Versuche und die vorgestellten Erfassungsmethoden wurden in über 200 durchgeführten Power-Tool-Bewertungsversuchen iterativ aufgebaut und durch kontinuierliche Probandeninterviews verifiziert. Hierbei wurden die Benutzungsphasen immer weiter konkretisiert und die eingesetzten Erfassungsmethoden stets so optimiert, dass sowohl eine optimale Erfassung der Anwendungseignung als auch eine möglichst geringe Beeinflussung des Anwenders durch die Erfassung stattfindet. Insbesondere bei der Fragebogenentwicklung wurden die einzelnen Statements und Items immer weiter für den Untersuchungszweck optimiert. Ferner findet die Validierung der Fragebögen hinsichtlich der Objektivität und der Aussagequalität in aktuell stattfindenden Studien statt. Bei der Bewertung der Markenbindungsphase konnte durch Befragungen festgestellt werden, dass eine differenzierte Bewertung der Anwendungseignung erst nach mehrstündiger Tätigkeit mit mehreren Power-Tools ermöglicht wird. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen hat sich dabei eine Versuchsdauer von drei stündigen Anwendungsversuchen bewährt. Ferner stellt sich im Weiteren die Frage nach einer optimalen, bzw. notwendigen Versuchsdauer der Probanden, durch welche sie in die Lage versetzt werden können, die Anwendungseignung von Power-Tools differenziert zu bewerten. Durch den großen Einfluss der gesammelten Erfahrungen auf die Bewertung der empfundenen Anwendungseignung besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Erfassung und Beschreibung relevanter Anwendungen unter realen Anwendungsbedingungen. Ziel dabei ist es, die in der realen

Anwendung erfassten Einflussgrößen unter Laborbedingungen so abzubilden, dass entsprechende Testpersonen relevante Anwendungsmängel identifizieren und bewerten können. Durch diesen Ansatz können ohne die Durchführung von aufwändigen Feldstudien erste Entwicklungspotentiale aufgedeckt werden. Die Quantifizierung der erfassten Defizite in der empfundenen Anwendungseignung erfolgt durch den Einsatz von Messtechnik. Hierbei wird im Weiteren eine Auswahl an geeigneter Messtechnik zur Verfügung gestellt, mit welcher typische Defizite in der Anwendungseignung (beispielsweise zu hohe Vibrationen, geringe Fortschrittsgeschwindigkeit) abgebildet werden können und daraus mögliche Entwicklungspotentiale für eine nutzerzentrierte Produktentwicklung gewonnen werden. So sollen dem Produktentwickler, aus der Analyse der objektiv erfassten Anwendungseignung, messbare und nutzerzentrierte Entwicklungsziele für die Entwicklung von Power-Tools bereitgestellt werden.

Literatur

- Albers, et al. 2016 ALBERS, Albert, et al.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: LINDEMANN, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2016, S. 541–569
- Berekoven, et al. 2009 BEREKOVEN, Ludwig, et al.: *Marktforschung : Methodische Grundlagen und praktische Anwendung*. 12., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009 (SpringerLink : Bücher)
- Bojko 2013 BOJKO, Aga: *Eye tracking the user experience : A practical guide to research*. Brooklyn, New York : Rosenfeld Media, 2013
- Brooke 1986 BROOKE, John: *SUS: A 'quick and dirty' usability scale*. In: P.W. (1986)
- DIN ISO 20282. DIN ISO 20282. 2008-10. *Einfachheit der Handhabung von Produkten des täglichen Gebrauchs - Teil 1: Gestaltungsanforderungen im Kontext von Anwendungs- und Benutzermerkmalen*
- Glende 2010 GLENDE, Sebastian: *Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung - mit Fokus auf die "Generation Plus": Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung - mit Fokus auf die "Generation Plus"*. 2010. URL https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/2664/1/Dokument_29.pdf
- Hofbauer 2013 HOFBAUER, Günter: *Customer Integration: Prinzipien der Kundenintegration zur Entwicklung neuer Produkte: Customer Integration: Prinzipien der Kundenintegration zur Entwicklung neuer Produkte*. 2013. URL https://opus4.kobv.de/documents/549/ABWP_26.pdf
- Kett, et al. 2014 KETT, Susan, et al.: Nutzerzentrierte Produktentwicklung durch systematische Integration von Marketingaspekten – ein erster Ansatz. In: KRAUSE, Dieter (Hrsg.): *Design for X : Beiträge zum 25. DfX-Symposium, Oktober 2014*. Hamburg : TuTech-Verl., 2014, S. 249–260
- Kittl 2009 KITTL, Christian: *Kundenakzeptanz und Geschäftsrelevanz : Erfolgsfaktoren für Geschäftsmodelle in der digitalen Wirtschaft*. Wiesbaden : Gabler, 2009 (Gabler Edition Wissenschaft. Mobile computing)
- E. N. ISO 9241-11 EUROPÄISCHE NORM, E. N. ISO 9241-11: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten; Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit-Leitsätze*. DIN Deutsches Institut für Normung eV., 1999
- Mao, et al. 2005 MAO, Ji-Ye, et al.: *The state of user-centered design practice*. In: *Communications of the ACM* 48 (2005), Nr. 3, S. 105–109

- Matthiesen, et al. 2013 MATTHIESEN, Sven, et al.: *X-in-the-Loop in der Gerätebranche - Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung* (2013), Nr. 2
- Matthiesen, et al. 2014 MATTHIESEN, Sven, et al.: *Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle*. In: *DFX 2014: Proceedings of the 24th Symposium Design for X: Bamberg, Germany 1-2 Oktober 2014* (2014), S. 193–204
- Matthiesen, et al. 2016a MATTHIESEN, Sven, et al.: *Geräteoptimierung durch Untersuchung von Funktionsqualität und Anwenderempfinden*. In: *WiGeP News* (2016), Nr. 1, S. 3–4
- Matthiesen, et al. 2016b MATTHIESEN, Sven, et al.: *Prozessmodell zur anwendungsorientierten Entwicklung von Power-Tools : Messtechnisch gestützt vom realen Nutzungsverhalten zu fundierten Entwicklungszielgrößen*. In: WEIDNER, Robert (Hrsg.): *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen : Zweite transdisziplinäre Konferenz*. Hamburg : Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr Laboratorium Fertigungstechnik, 2016, S. 223–232
- Mussnug, et al. 2015 MUSSGNUM, Moritz, et al.: *MOBILE EYE TRACKING IN USABILITY TESTING: DESIGNERS ANALYSING THE USER-PRODUCT INTERACTION*. In: *DS 80-2 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 2: Design Theory and Research Methodology Design Processes, Milan, Italy, 27-30.07.15, 2015*
- Pahl/Beitz 2012 PAHL/BEITZ: *Konstruktionslehre : Methoden und anwendung erfolgreicher* : Springer, 2012
- Piller, et al. 2009 PILLER, Frank T., et al.: *Interaktive Wertschöpfung und Open Innovation: Interaktive Wertschöpfung und Open Innovation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- Porst 2014 PORST, Rolf: *Fragebogen : Ein Arbeitsbuch*. 4., erweiterte Aufl. 2014. Korr. Nachdruck 2013. Wiesbaden : Imprint: Springer VS, 2014 (Studienskripten zur Soziologie)
- Reinicke 2004 REINICKE, Tamara; Technische Universität Berlin (Mitarb.); BLESSING, Luciënne T.M. (Mitarb.) : *Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung*. 2004
- Reinicke, et al. 2007 REINICKE, Tamara, et al.: *Produktentwicklung mit Senioren: Produktentwicklung mit Senioren*. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- Tamm, et al. 2009 TAMM, Nina, et al.: *Subjektive Benutzerzufriedenheit quantitativ erfassen: Erfahrungen mit dem User Experience Questionnaire UEQ B*. Laugwitz, U. Schubert, W. Ilmberger: *Subjektive Benutzerzufriedenheit quantitativ erfassen: Erfahrungen mit dem User Experience Questionnaire UEQ B*. Laugwitz, U. Schubert, W. Ilmberger. Fraunhofer Verlag, 2009
- VDI 2221. VDI 2221. *VDI 2221/Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*

Positive, bedürfniszentrierte Gestaltungsprozesse am Beispiel eines virtuellen Begleiters für Senioren

Kathrin Pollmann¹, Nora Fronemann², Anne E. Krüger², Matthias Peissner²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Stuttgart, Deutschland

kathrin.pollmann@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Stuttgart, Deutschland

nora.fronemann@iao.fraunhofer.de

Abstract: Um eine positive User Experience zu ermöglichen, werden in der menschenzentrierten Gestaltung Nutzerbedürfnisse herangezogen. Deren Erfassung und Übertragung ins Produktdesign gestalten sich in der praktischen Anwendung jedoch häufig schwierig. Im vorliegenden Beitrag werden Methoden vorgestellt, die es Produktgestaltern erleichtern sollen, Zugang zu den Bedürfnissen der Nutzer zu erlangen und diese in den Gestaltungsprozess zu integrieren. Am Beispiel der Gestaltung eines virtuellen Begleiters für Senioren werden die Vorgehensweise erläutert, Ergebnisbeispiele gezeigt und die Vor- und Nachteile diskutiert.

Wir verwenden die Methode der Erlebnisinterviews, um konkrete positive Alltagserlebnisse der Nutzer zu erfassen und daraus die zu Grunde liegenden Bedürfnisse abzuleiten. Die Interviewergebnisse dienen als Ausgangspunkt für einen Ideenworkshop, in dem basierend auf Methoden des Ansatzes Building Ideas erste Produktkonzepte entwickelt werden, die sich an den Bedürfnissen der Nutzer orientieren.

Keywords: User Experience, menschenzentrierte Gestaltung, Positive Design; Bedürfnisse

1 Bedürfniszentrierte Gestaltung für ein positives Nutzungserleben

Die Entwicklung von Produkten ist häufig getrieben von neuen technologischen Entwicklungen oder ökonomischen Faktoren. Der Mensch als Nutzer eines Produkts wird dabei meist nur am Rande betrachtet. Dies führt dazu, dass Produkte nicht passgenau auf die Zielgruppe abgestimmt sind. Dieses Defizit adressiert der menschenzentrierte Entwicklungsprozess nach ISO 9241-210 (2010), der den Nutzer in den Mittelpunkt aller Phasen des Prozesses stellt. Dieser beinhaltet ein klar gegliedertes Vorgehen, um eine Einbindung der Nutzer in den vier Produktentwicklungsphasen Analyse, Interpretation, Produktgestaltung und Produktevaluation zu gewährleisten (siehe Bild 1)

Im Kontext der menschenzentrierten Gestaltung gewinnen weichere, subjektive und emotionale Nutzeranforderungen immer mehr Bedeutung. Dies wird unter dem Begriff User Experience (UX) zusammengefasst, der ein positives emotionales Erleben des Produkts und seiner Nutzung beschreibt. Demzufolge wird ein technisches Produkt, das viele positive Nutzungserlebnisse erzeugt, häufiger und bevorzugt genutzt (Kahneman 1999; Spath, Peissner, Sproll 2010). Verschiedene Ansätze gehen hierbei davon aus, dass ein positives Nutzungserleben auf der Erfüllung bestimmter menschlicher Grundbedürfnisse basiert (Hassenzahl, Diefenbach, Göritz 2010; Reiss 2004; Sheldon u. a. 2001). Eine zusammenfassende Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Bedürfnissen, Nutzungserlebnissen und Produktnutzung bietet das UXellence[®]-Framework (Fronemann, Peissner 2014): Durch Bedürfniserfüllung kann eine positive UX gezielt gefördert und dadurch eine langfristige Produktnutzung und -bindung erzielt werden. Zu den Bedürfnissen gehören beispielsweise *Verbundenheit*, d.h. sich Menschen, die einem wichtig sind, nahe zu fühlen, und *Kompetenz* - sich Herausforderungen zu stellen und diese gut zu meistern. Weitere Bedürfnisse sind in Bild 7 dargestellt.

Um ein Produkt so zu gestalten, dass es die Nutzer emotional anspricht, ist es wichtig zu identifizieren, welche Ereignisse der Zielgruppe ein positives Erlebnis beschere. Daraus können im Anschluss Bedürfnisse abgeleitet werden, die dann wiederum in Produkteigenschaften übersetzt

werden können. In der praktischen Anwendung gestalten sich die Erfassung der Nutzerbedürfnisse und ihre anschließende Übertragung in Produkteigenschaften jedoch häufig schwierig. Klassische Methoden zur Untersuchung von Nutzergruppen (User Research) und ihren Anforderungen an die UX eines Produktes, z.B. Fokusgruppen, Cultural Probes oder Site Visits, sind meist sehr umfangreich und zeitaufwändig in der Vor- und Nachbereitung sowie der Durchführung. Hinzu kommt, dass erfahrene Moderatoren für die Ausführung der Methoden benötigt werden. Selbst bei ausreichend verfügbaren Zeit- und Personalressourcen stellt die Ermittlung der relevanten Bedürfnisse noch oft eine Hürde dar, da das Konzept der Bedürfnisse für Befragte häufig sehr abstrakt und schwer zu verbalisieren ist.

Die genannten Herausforderungen bei der Bedürfnisermittlung führen dazu, dass der Ansatz einer *bedürfniszentrierten Gestaltung für eine positive UX* in der Praxis kaum Berücksichtigung findet. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich deshalb mit der Frage, wie die Ermittlung von Nutzerbedürfnissen in frühen Produktgestaltungsphasen methodisch unterstützt werden kann. Insbesondere soll gezeigt werden, wie die Methode der *Erlebnisinterviews* (Zeiner u. a. 2016) in der *Analysephase* eingesetzt werden kann, um aus positiven Alltagserlebnissen der Nutzer auch ihre Bedürfnisse abzuleiten. Erlebnisinterviews stellen ein leichtgewichtiges Forschungstool dar, das sowohl persönlich als auch in einer Online-Variante durchgeführt werden kann. Darüber hinaus erfordern Erlebnisinterviews keine explizite Auseinandersetzung des Nutzers mit dem Bedürfnisbegriff, sondern zielen vielmehr auf eine implizite Ermittlung der Nutzerbedürfnisse ab. Wir gehen davon aus, dass die Ermittlung der relevanten Bedürfnisse der zentrale Faktor für eine bedürfniszentrierte Produktgestaltung ist. Jedoch muss sichergestellt werden, dass die ermittelten Bedürfnisse in die Konzeptentwicklung einfließen. Der vorliegende Artikel zeigt deshalb auch ein Vorgehen auf, wie die Ergebnisse der Erlebnisinterviews in der *Interpretationsphase* weiter analysiert und in der *Produktgestaltungsphase* in Produktkonzepte überführt werden können.

2 Praxisbeispiel: bedürfniszentrierte Entwicklung eines virtuellen Begleiters für Senioren

Der auf Erlebnisinterviews basierende Ansatz der bedürfniszentrierten Gestaltung wurde beispielhaft in den ersten drei Gestaltungsphasen eines Projekts zur Entwicklung eines virtuellen Begleiters für ältere Menschen umgesetzt. Bild 1 gibt einen Überblick über das Vorgehen (menschzentrierter Entwicklungsprozess, Zeile 1), die verwendeten Methoden (Zeile 2) und die erarbeiteten Ergebnisse (Zeile 3), die in den folgenden Abschnitten im Detail beschrieben werden. Der Fokus des aktuellen Beitrags liegt hierbei auf der Bedürfnisermittlung anhand der Erlebnisinterviews. Alle weiteren verwendeten Methoden werden daher weniger ausführlich beschrieben.



Bild 1. Bedürfniszentriertes Vorgehen zur Gestaltung eines positiven Nutzungserlebens.

Im Rahmen der *Analysephase* wurden 63 Senioren im Alter von mindestens 60 Jahren zu ihren positiven Erlebnissen im Alltag befragt. Im Interview wurden Sie gebeten von einem oder mehreren positiven Erlebnissen aus den letzten zwei Wochen zu berichten, ihre Gefühlslage während des Erlebnisses zu beschreiben und anzugeben, ob andere Personen und bestimmte technische Geräte beteiligt waren. Es wurden insgesamt 81 Alltagserlebnisse gesammelt und in übergeordneten Erlebniskategorien zusammengefasst. Für das Verständnis der Bedürfnisse nutzen wir das UXellence®-Framework als theoretische Basis.

In der *Interpretationsphase* wurden die relevanten Bedürfnisse aus den Ergebnissen der Erlebnisinterviews abgeleitet. Darüber hinaus wurde ein gemeinsames, umfassendes Verständnis der Nutzergruppen und der Bedürfnisse entwickelt, um eine fundierte Grundlage für die im Anschluss entwickelten Produktkonzepte zu schaffen. Hierzu wurden Methoden aus dem *Building Ideas* Ansatz (Krüger, Fronemann, Peissner 2015; Krüger u. a. 2016) herangezogen. Dieser unterstützt das

Entwicklungsteam u.a. methodisch dabei, die Bedürfnisse der Nutzer besser zu verstehen und Empathie für sie aufzubringen, z.B. durch die Personifizierung der Bedürfnisse in Form von Bedürfnispersonas. Mit ihrer Hilfe können die Anforderungen an den virtuellen Begleiter abgeleitet und in die Ideenfindungsphase eingebracht werden.

In der anschließenden Gestaltungsphase wurde auf Basis der gesammelten Ideen und dem gemeinsamen Verständnis der Nutzergruppe und ihrer Bedürfnisse ein Konzept für einen virtuellen Begleiter für ältere Menschen entwickelt. Eine Evaluation der entwickelten Konzepte ist nicht Teil der vorliegenden Artikels.

2.1 Analyse: Erlebnisinterviews

2.1.1 Teilnehmer und Ablauf

Insgesamt nahmen 63 Seniorinnen und Senioren (25 Frauen) entweder persönlich ($n = 34$) oder online ($n = 29$) an den Erlebnisinterviews teil. Die Teilnehmer wurden gemäß der Definition der Weltgesundheitsorganisation als *Senioren* bezeichnet, wenn sie ein Mindestalter von 60 Jahren erreicht hatten (WHO 2015). Dies entspricht dem Renteneintrittsalter in den meisten europäischen Ländern. Das Alter der Probanden lag zwischen 60 und 95 Jahren ($M = 70.88$, $SD = 9.14$). 74,6% ($n = 47$) der Probanden waren pensioniert, 12,7% ($n = 8$) vollzeitbeschäftigt, 11,1% ($n = 7$) teilzeitbeschäftigt und 1,6% ($n = 1$) arbeitslos. Die Probanden hatten unterschiedliche Bildungs- und Berufshintergründe (z.B. Ingenieure, Lehrer, Therapeuten oder Verkaufsleiter).

Die Interviewteilnehmer wurden ausführlich über die Studie informiert und erklärten danach ihre Bereitschaft zur Teilnahme. Das semi-strukturierte Interview bestand aus drei verschiedenen Teilen (Bild 2), wobei der dritte Teil ‚*Erlebnisbericht*‘ den Hauptteil des Interviews darstellt: Die Teilnehmer wurden gebeten ein positives Erlebnis aus den letzten zwei Wochen so zu beschreiben als würden sie es einem Freund oder einer Freundin erzählen. Zusätzlich sollten sie ihre Gefühlslage während des Erlebnisses spezifizieren und angeben, ob Technologien oder andere Personen involviert waren.

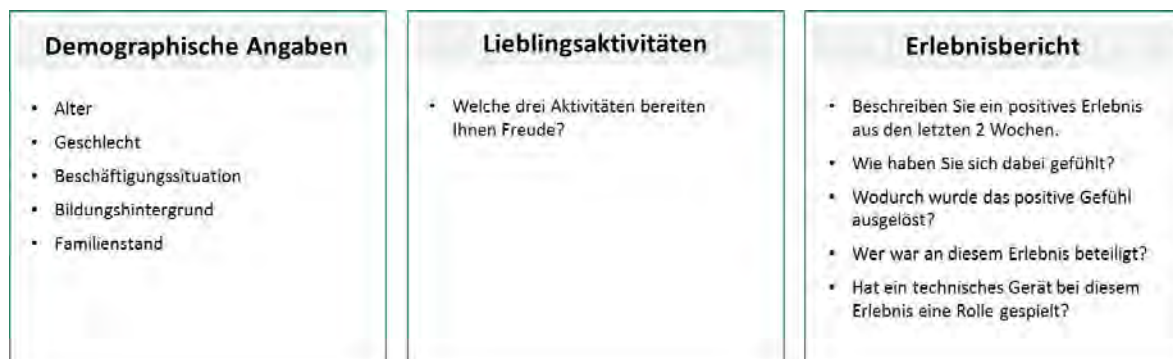


Bild 2: Ablauf des Erlebnisinterviews.




 <p>Krankenschwester im Ruhestand, 79</p> <p>„Ich hatte vor einigen Wochen einen Unfall an der Grenze zu Österreich. Deshalb musste ich dort im Krankenhaus bleiben. Letzte Woche kam dann die ganze Familie angereist, um mich zu besuchen, obwohl sie echt weit fahren mussten. Sie haben mir Süßigkeiten mitgebracht und meine Enkel haben mir ein Bild gemalt und sie haben mir viele Geschichten erzählt.“</p>	 <p>Lehrer im Ruhestand, 67</p> <p>„Jemand hat sich dafür entschieden, bei mir die französische Sprache zu erlernen. Das ist immer eine Form von Anerkennung. Darüber hinaus freut es mich sehr, wenn sich in Zeiten des sprachlichen Einheitsbreis jemand für eine Sprache entscheidet, die nicht so sexy erscheint.“</p>	 <p>Journalist im Ruhestand, 71</p> <p>„Ich habe eine einwöchige Donaukreuzfahrt erlebt, traumhaftes Wetter, gutes Essen an Bord, vernünftige Kabine, tolle Ausflüge in den Städten. Die gesamte Reise, einschließlich Hin- und Rückfahrt nach Hause mit dem Auto mit zwischenzeitlich überraschenden Stopps entlang der BAB, war phantastisch. Positive Erlebnisse en masse aufgeschnürt wie an einer Perlenkette.“</p>
---	--	---

Bild 3: Beispiele für Erlebnisberichte.

2.1.2 Ergebnisse

Die persönlich geführten Interviews wurden wörtlich transkribiert und zusammen mit den Online-Daten analysiert. Einige der Probanden berichteten mehr als ein Erlebnis, wodurch insgesamt 81 Erlebnisse erhoben wurden. Alle Erlebnisberichte wurden von jedem Mitglied des Entwicklungsteams gelesen und gemeinsam diskutiert. Im Anschluss wurden über alle Erlebnisse hinweg Erlebniskategorien gebildet, die verschiedene Arten positiver Alltagserlebnisse von Senioren zusammenfassen.

Die Teilnehmer beschrieben sehr unterschiedliche Erlebnisse aus vielfältigen Situationen und Bereichen. Die Vielfältigkeit der Erlebnisse ist in Bild 3 exemplarisch anhand von drei Erlebnisberichten dargestellt. Nach der Kategorisierung aller 81 Erlebnisse wurden 18 übergeordnete Erlebniskategorien gebildet. In einigen Fällen beinhalteten die Erlebnisse unterschiedliche Aspekte und konnten nicht eindeutig einer einzigen Kategorie zugeordnet werden. In diesen Fällen wurden die Erlebnisse in kleinere Segmente unterteilt und die Kategorisierung wurde auf Basis des hervorstechendsten Aspekts vorgenommen. Zum Schluss wurden die Erlebniskategorien in drei Themenbereiche aufgeteilt: *Menschen-orientierte* Erlebnisse, *Selbst-orientierte* Erlebnisse und *Ziel-orientierte* Erlebnisse (siehe Bild 4).

Insgesamt waren an 88% aller Erlebnisse auch andere Menschen beteiligt. Von diesen waren 62% Familienmitglieder, 15% Freunde und die übrigen 23% andere Menschen, wie z.B. frühere Studenten oder Kollegen. Nur eine kleine Anzahl an Erlebnissen (12%) wurde von den Befragten alleine erfahren. In 44% der Erlebnisse wurden andere Menschen als Grund der positiven Emotionen in der beschriebenen Situation genannt. Diese Erkenntnisse sind vor dem Hintergrund der evolutionären Entwicklung des Menschen als soziales Wesen (McAdams 2009) nicht überraschend und zeigen zudem große Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Studie zu positiven Erlebnissen im Arbeitskontext von Zeiner und Kollegen (2016), die ebenfalls feststellten, dass positive Erlebnisse zumeist (in knapp 80% der Fälle) gemeinsam mit anderen Menschen stattfinden.

Die Auswertung ergab weiterhin, dass 28% der Erlebnisberichte technische Produkte oder Internetdienste beinhalteten, v.a. Handys, Computer oder das Internet. Die Mehrheit aller Erlebnisse (72%) umfasste jedoch keine Nutzung von Technologien. Diese Ergebnisse sind nicht überraschend, da Senioren allgemein als wenig technikaffin gelten (DIVSI 2016). Allerdings lassen sich auch hier Parallelen zu den Erlebnisinterviews im Arbeitskontext finden, in denen technische Produkte trotz grundsätzlich hoher Verfügbarkeit am Arbeitsplatz nur in 36% der Erlebnisberichte Erwähnung fanden. Dies legt den Schluss nahe, dass technische Geräte generell nur schwach mit der Empfindung positiver Emotionen assoziiert sind. Eine bedürfniszentrierte Produktgestaltung sollte also auch zum Ziel haben, den notwendigen Umgang mit Technik im Alltag für Senioren möglichst angenehm zu gestalten und positive Erlebnisse mit technischen Produkten gezielt zu fördern.

Menschen-orientiert	Selbst-orientiert	Ziel-orientiert
<ul style="list-style-type: none"> • Wertschätzung erfahren • Jemandem Wertschätzung entgegenbringen • Vertrautheit und Nähe erleben • Am Leben anderer teilhaben • Gemeinsam Zeit verbringen • Gemeinsam feiern • Hilfe oder Zuwendung bekommen • Helfen 	<ul style="list-style-type: none"> • Etwas Neues erleben • Das Leben genießen • Sich an der Natur erfreuen • Sich aktiv betätigen • Seiner Passion nachgehen • Sich etwas gönnen • Unerwartet etwas Positives erleben • Positives Feedback zur Gesundheit bekommen 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Herausforderung meistern • Gemeinsam etwas schaffen • Eine gute Leistung erbringen

Bild 4: Erlebnisthemen (fett gedruckte Überschriften) und Erlebniskategorien.

Tabelle 1: Übersicht über die Lieblingsaktivitäten der Studienteilnehmer.

Aktivität	%
Freunde/Bekannte treffen	47,6
Sich körperlich betätigen	44,4
Familienaktivitäten	31,7
Kulturelle Aktivitäten	25,4
Handwerkliches Arbeiten	23,8
Lesen	22,2
Gartenarbeit	17,5
Ausflüge	17,5
Soziales Engagement	14,3
Kochen	7,9
Fernsehen	7,9
Job/Nebenjob	6,3
Weiterbildung	6,3
Kinderbetreuung	4,8
Handarbeit	4,8

Um den Alltag der Teilnehmer besser zu verstehen, baten wir die Teilnehmer bis zu drei Lieblingsaktivitäten anzugeben. Hierbei war die meistgenannte Aktivität *Freunde treffen* (47,6%), gefolgt von *sich körperlich betätigen* (44,4%), *Familienaktivitäten* (31,7%), *kulturellen Aktivitäten* (25,4%) und *handwerkliches Arbeiten* (23,8%). Eine komplette Auflistung der Aktivitäten ist in Tabelle 1 dargestellt.

2.2 Interpretation: Bedürfnisermittlung und Nutzerverständnis

Die Interpretation der Ergebnisse der Analysephase erfolgte in drei Schritten:

Im ersten Schritt wurden die Erlebnisberichte auf die ihnen zugrunde liegenden Bedürfnisse hin untersucht. Hierbei wurden neben der eigentlichen Erlebnisbeschreibung vor allem die Charakterisierung der empfundenen positiven Emotion sowie deren Begründung herangezogen. Für den Großteil der Erlebnisse wurden zwei bis drei Bedürfnisse ermittelt. Nur wenige Erlebnisse ließen sich eindeutig einem einzigen Bedürfnis zuordnen.

Im zweiten Schritt wurden im Projektteam ein gemeinsames Verständnis der drei am stärksten vertretenen Bedürfnisse und der Nutzergruppen entwickelt. Dazu wurden Methoden des Ansatzes Building Ideas herangezogen, die entwickelt wurden, um die Bedürfnisse greifbar, dadurch besser verständlich und kommunizierbar zu machen.

Darauf folgte in Schritt drei eine Ideenfindungsphase, in der im Brainstorming Anforderungen und Charakteristika gesammelt wurden, die die Gestaltung des virtuellen Begleiters berücksichtigen sollte, um die Bedürfnisse gezielt zu adressieren.

Tabelle 2: Bedürfnisse, die in den Erlebnisberichten identifiziert wurden.

Bedürfnis	Summe	Erlebnisthema
Verbundenheit	44	Menschen
Stimulation	20	Selbst
Kompetenz	18	Ziel
Selbstverwirklichung	7	Selbst
Körperliches Wohlbefinden	9	Selbst
Popularität	2	Menschen
Einfluss	3	Menschen
Sicherheit	1	Selbst

2.2.1 Bedürfnisermittlung auf Basis der Erlebnisinterviews

Die Erlebnisberichte konnten insgesamt mit acht der zehn in Bild 7 genannten Bedürfnisse in Verbindung gebracht werden. Eine Auflistung aller identifizierten Bedürfnisse ist in Tabelle 2 aufgeführt. Die Bedürfnisse *Sammeln von Bedeutungsvollem* und *Wettbewerb* konnten nicht mit den Erlebnisberichten in Zusammenhang gebracht werden. Als häufigstes zugrunde liegendes Bedürfnis wurde *Verbundenheit* identifiziert (44 Erlebnisse), gefolgt von *Stimulation* (20 Erlebnisse) und *Kompetenz* (18 Erlebnisse).

Menschen mit einem stark ausgeprägten Bedürfnis nach *Verbundenheit* erfüllt es, mit Menschen, die sie mögen, verbunden zu sein, mit ihnen Zeit zu verbringen und von ihnen gemocht zu werden. *Verbundenheit* ist daher stark assoziiert mit *Menschen-zentrierten* Erlebnissen.

Das Bedürfnis *Stimulation* erfährt dann Befriedigung, wenn man Neues kennenlernt, ausprobiert oder wahrnimmt und dabei Freude und Vergnügen erlebt. *Stimulation* steht daher in starkem Zusammenhang mit *Selbst-zentrierten* Erlebniskategorien.

Das Bedürfnis *Kompetenz* charakterisiert Menschen, die Spaß daran haben, sich Herausforderungen zu stellen, und denen die erfolgreiche, eigenständige Bewältigung schwieriger Aufgaben ein gutes Gefühl gibt. Ein hohes Bedürfnis nach *Kompetenz* liegt deshalb vor allem Berichten aus *Ziel-orientierten* Erlebniskategorien zugrunde.

Insgesamt konnten zwei Erlebnisse keinem der Bedürfnisse zugeordnet werden. Diese *Selbst-orientierten* Erlebnisse beschreiben einen Moment, in dem sich die Person an der Natur erfreute (die Johannisbeeren im Garten waren reif und lecker, Rehe im Wald beobachtet). Das positive Erleben in diesen Berichten entstand durch das aktive Wahrnehmen einer Situation, an der die Person selbst nur passiv beteiligt war. Ein solches Erleben wird durch das dem UXellence[®]-Ansatz zu Grunde liegende Bedürfnisspektrum nicht abgedeckt, da die verwendeten Bedürfnisse eine aktive Interaktion der Person voraussetzen.

2.2.2 Nutzerverständnis und Ideenfindung

Für ein gemeinsames Verständnis von *Verbundenheit*, *Stimulation* und *Kompetenz* stellte das Design-Team die wichtigsten Aspekte der einzelnen Bedürfnisse mit Lego[®]-Steinen dar. So wird das Verständnis der Bedürfnisse im Team gemeinsam entwickelt und visualisiert. Das aktive, gemeinsame Bauen mit Lego[®]-Steinen fördert insbesondere die Entwicklung eines intuitiven Verständnisses der abstrakten Bedürfnisse und die Aktivierung von implizitem Wissen dazu (Schön 1983; Harel, Papert 1991). Darauf aufbauend wurden anschließend drei Bedürfnispersonas (Krüger, Fronemann, Peissner 2015) entwickelt, die eine Personifizierung eines Bedürfnisses abbilden. Die Bedürfnispersona beschreibt einen repräsentativen Vertreter der Nutzergruppe, der eine starke Ausprägung eines bestimmten Bedürfnisses hat, mit seinen wichtigsten charakteristischen Handlungen, Aussagen und Handlungsmotiven. Die Personifizierung macht das Bedürfnis für das Designteam greifbarer und fördert das Verständnis für die Nutzergruppen und ihre Bedürfnisausprägungen. Für die drei extrahierten Bedürfnisse wurden die drei Bedürfnispersonas Luna Love (*Verbundenheit*), Karl Klever (*Kompetenz*) und Nancy Neu (*Stimulation*) entwickelt.

Im anschließenden Ideenfindungsprozess wurde für jede der drei Bedürfnispersonas mögliche Lösungsansätze für Funktionalitäten, Interaktionsmechanismen und visuelle Gestaltung des Produkts zusammengetragen (Bild 5). Zunächst konnte jedes Mitglied des Projektteams seine Ideen im Silent Brainstorming einbringen. Im Anschluss wurden die Ideen gemeinsam im Team thematisch gruppiert und weitere Ideen ergänzt. Die Auswertung der Ergebnisse der Ideenfindung zeigen deutlich, dass jedes Bedürfnis eigene Anforderungen an die drei Gestaltungsbereiche mit sich bringt.

So sollte der virtuelle Begleiter um das Bedürfnis *Verbundenheit* zu adressieren beispielsweise Funktionalitäten enthalten, welche die Planung, Durchführung und Dokumentation von gemeinsamen Unternehmungen mit Familie und Freunden unterstützen, Teilhabe am Leben anderer fördern oder implizite Kommunikationswege bereitstellen. Der Begleiter sollte beidseitig eine emotionale Kommunikation ermöglichen und so gestaltet sein, dass er die Rolle eines Freundes einnimmt, sodass der Nutzer eine Beziehung zu ihm aufbauen kann.



Bild 5: Ergebnisse der Ideenfindung.

Für Nutzer mit einem hohen Bedürfnis nach *Stimulation*, sollte der Begleiter unter anderem Funktionalitäten bereitstellen, die dabei unterstützen, neue Aktivitäten auszuprobieren, neue Leute kennenzulernen, neue Unternehmungen zu planen, durchzuführen und zu dokumentieren. Dabei sollte die Interaktion variantenreich und nicht zu berechenbar gestaltet sein, um immer wieder Raum für Exploration zu geben. Es ist auch ein Begleiter denkbar, der verschiedene Formen annehmen kann, die vom Nutzer personalisiert und auf Wunsch gewechselt werden können.

Um das Bedürfnis nach *Kompetenz* zu adressieren, könnten beispielsweise Funktionalitäten integriert werden, die den Austausch mit anderen Experten zu einem Thema ermöglichen, den Nutzer dabei unterstützen, jemand anderem etwas beizubringen, oder kognitives Training fördern. Die Interaktion sollte berechenbar sein und auf einem Lernkonzept basieren, das dabei hilft, schrittweise ein umfassendes Verständnis der Funktionsweise des Begleiters (Expertenwissen) aufzubauen. Der Begleiter selbst könnte so gestaltet sein, dass er die Rolle eines Lehrlings einnimmt, dem der kompetente Nutzer etwas beibringen kann.

Bedürfnisübergreifend lassen sich darüber hinaus allgemeine Anforderungen an die Gestaltung eines seniorengerechten Assistenzsystems ableiten wie z.B. Mobilität, haptische Repräsentation, Kontrollierbarkeit und hohe Benutzerfreundlichkeit des Begleiters.

2.3 Produktgestaltung: bedürfniszentriertes Konzept für einen virtuellen Senioren-Begleiter

Ziel der bedürfniszentrierten Gestaltung sollte es in der Regel nicht sein, einzelnen Insellösungen für verschiedene Bedürfnisse zu entwickeln, sondern die verschiedenen Anforderungen in einem Produkt zu vereinen, das Nutzern mit unterschiedlichen Bedürfnisausprägungen ein positives Erlebnis beschert. Im folgenden Abschnitt wird ein auf Basis der gesammelten Ideen entwickeltes Konzept vorgestellt, anhand dessen verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Bedürfnisse gezielt in die Konzeptentwicklung einbezogen werden können.

Das entwickelte Konzept sieht einen würfelförmigen, *tragbaren* und *greifbaren* Begleiter vor. Dessen verschiedene Seiten bilden *unterschiedliche Funktionen* ab, die durch Drehen des Würfels aktiviert werden können. Die Interaktion erfolgt grundsätzlich über *Sprache*, um der Zielgruppe eine möglichst einfache, intuitive Bedienung zu ermöglichen. Eine *Touch*-Bedienung der Würfelseiten ist möglich, falls gewünscht. Während der Interaktion mit einer Würfelseite rückt diese in den Vordergrund, indem sie stärker beleuchtet wird als die restlichen Seiten (vgl. Bild 6).

Über die Hauptseite des Würfels, welche die Personifizierung des Begleiters in Form eines *veränderbaren Gesichts* zeigt, kann der Nutzer mit dem Begleiter kommunizieren. Auf den anderen Seiten finden sich verschiedene Funktionen, die je nach Nutzer individuell ausgewählt werden können. Um die Varianz in Funktionalität, Interaktion und Gestaltung für verschiedenen Bedürfnisausprägungen sinnvoll abzubilden, ist der Begleiter stark *personalisierbar*. Die Personalisierung wird über ein *Nutzerprofil* ermöglicht, das die wichtigsten Charakteristiken, Einschränkungen und Präferenzen des Nutzers enthält und zu Beginn angelegt werden muss. Im Nutzerprofil werden außerdem Informationen zu Angehörigen und Freunden, Wohnsituation, sowie Terminen gespeichert.

Das Nutzerprofil wird im Laufe der Zeit durch neue Informationen und Feedback zur den Vorschlägen des Begleiters angepasst und verfeinert. Auf Basis des Profils werden die visuelle Darstellung des Begleiters (z.B. Gesichtsausdruck), die Interaktionstechnik (Sprache und/oder Touch) und die verfügbaren Funktionen individuell an den Nutzer angepasst, sodass ein ganz eigener, persönlicher Begleiter entsteht.

Im Rahmen der Personalisierung gibt es die Möglichkeit, ein und dieselbe Funktionalität eines Produktes so auszugestalten, dass verschiedene Bedürfnisse abgedeckt werden. Bild 6 zeigt verschiedene bedürfnisbasierte Gestaltungsvarianten für die Funktion „sozialen Austausch fördern“. Für einen Nutzer mit hohem Bedürfnis nach *Verbundenheit* könnte die Funktion so geartet sein, dass der Begleiter den Terminkalender des Nutzers mit den Kalendern von Freunden oder Verwandten abgleicht und Zeiten für gemeinsame (ggf. auch regelmäßige) Unternehmungen identifiziert. Schöne gemeinsame Erlebnisse werden photographisch festgehalten und dem Nutzer von seinem Begleiter immer wieder gezeigt (siehe Bild 6, linkes Bild).

Dieselbe Funktion kann etwas abgewandelt werden, um das Bedürfnis nach Stimulation zu adressieren. In diesem Fall könnte spontan ein Kontakt für eine Verabredung vorgeschlagen werden, für die ggf. sogar bereits ein Treffpunkt ausgemacht ist und die den Nutzer überrascht. Der Begleiter könnte den Nutzer dann zu dem Treffpunkt navigieren (siehe Bild 6, mittleres Bild).

Für einen Nutzer mit einem starken Bedürfnis nach Kompetenz sollte der Begleiter nicht zu viel Unterstützung anbieten. Dieser würde sich durch eine automatische Terminvereinbarung z.B. schnell bevormundet fühlen. In diesem Fall könnte der Begleiter eine Auswahl passender Termine und Kontakte bereitstellen, aus der der Nutzer selbst auswählen kann. Für ein vereinbartes Treffen könnte er basierend auf dem Profil des Kontaktes mögliche Gesprächsthemen herausuchen, über die sich der Nutzer vorab informieren kann (siehe Bild 6, rechtes Bild).

In der Realität enthält das Bedürfnisprofil eines Nutzers in der Regel mehrere Bedürfnisse in unterschiedlicher Ausprägung. Dementsprechend ist auch eine Kombination der drei beschriebenen Varianten denkbar. Für einen Nutzer mit einem starken Bedürfnis nach *Kompetenz* und *Verbundenheit* könnte der Begleiter z.B. eine Termin- und Themenauswahl für gute Freunde oder Verwandte bereitstellen und im Anschluss die Fotos des Treffens zeigen.

Analog können auch andere Funktionen oder Interaktionsprozesse gezielt für bestimmte Bedürfnisprägungen gestaltet werden. Die entwickelten Konzepte können dann mit der Zielgruppe getestet werden. Um zu überprüfen, ob das entwickelte Produkt die Bedürfnisse der Nutzer anspricht, sollten im Idealfall Teilnehmer der Erlebnisinterviews hinzu gezogen werden, deren Erlebnisse und Bedürfnisse die Gestaltung beeinflusst haben.

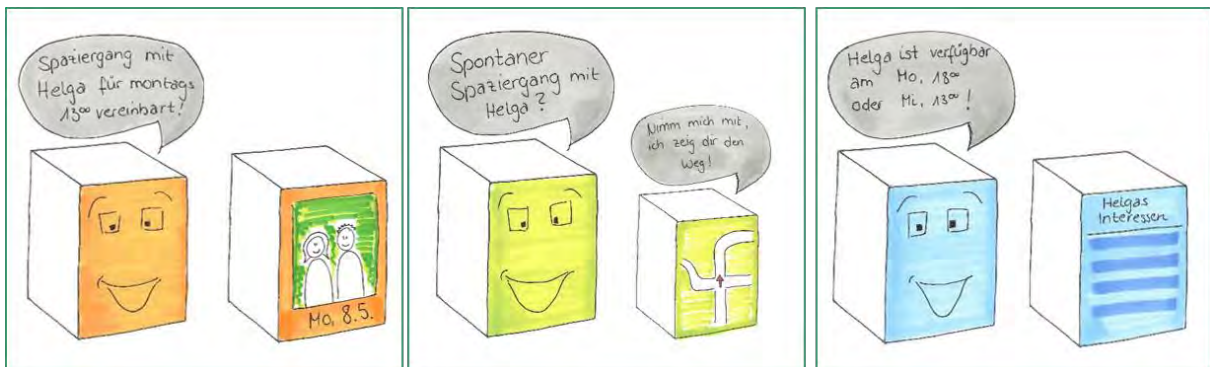


Bild 6: Bedürfnisbasierte Gestaltungsvarianten des virtuellen Seniorenbegleiters für die Funktion „sozialen Austausch fördern“. Von links nach rechts adressieren die Konzepte die folgenden Bedürfnisse: Verbundenheit, Stimulation, Kompetenz.

3 Fazit und Ausblick

Wir setzen Erlebnisinterviews gezielt ein, um Produktgestalter dabei zu unterstützen, relevante Nutzerbedürfnisse zu ermitteln, und zeigen auf, wie diese im Anschluss in die Produktentwicklung eingebracht werden, um ein positives Nutzungserleben zu ermöglichen.

Die beispielhafte Anwendung dieses bedürfniszentrierten Vorgehens auf die Konzeptentwicklung eines virtuellen Begleiters für Senioren verdeutlicht, dass Erlebnisinterviews eine geeignete Methode sind, um konkrete Momente des positiven Erlebens im Alltag zu identifizieren. Es wurde außerdem gezeigt wie aus den Erlebnisberichten Rückschlüsse auf die Bedürfnisse der Zielgruppe gezogen und diese mit Hilfe von Building Ideas Methoden gezielt in Produkthanforderungen und Konzeptideen überführt werden können. Bild 7 zeigt eine zusammenfassende Darstellung des Vorgehens hierbei. Eine Evaluation der entwickelten Konzepte mit der Zielgruppe in Form von Nutzertests ist geplant, steht allerdings momentan noch aus.

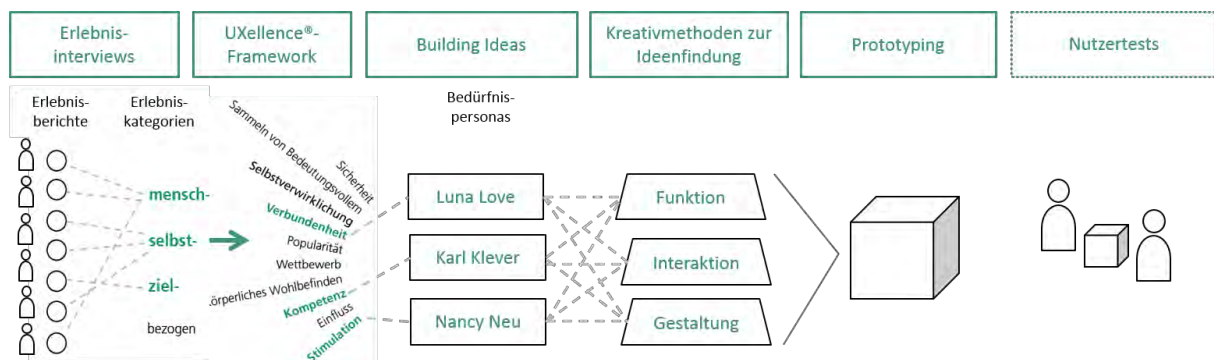


Bild 7: Vorgehen für die Konzeption des Begleiters

Die Durchführung der Erlebnisinterviews gestaltete sich unkompliziert und effizient. Es gab keine Unterschiede in der Ergebnisqualität der online und persönlich durchgeführten Interviews. Dementsprechend sind für die Interviewdurchführung keine besonderen Moderationsfertigkeiten erforderlich. Die anschließende Zuordnung der Bedürfnisse zu den Erlebniskategorien stellte sich als etwas aufwändiger heraus, da sie nicht immer ein-eindeutig zu sein scheint und ohne detaillierte Kenntnisse der Bedürfnisse schwerfällt. Sind die wichtigsten Bedürfnisse extrahiert, wird ihre Übertragung in Gestaltungskonzepte von Building Ideas methodisch unterstützt, doch auch hier sind grundlegende Kenntnisse der Bedürfnisse des UXellence®-Frameworks von Vorteil. Der Erfolg des Einsatzes bedürfnisorientierter Methoden und Ansätze ist demnach stark abhängig von der vorhandenen Expertise zum bedürfnisbasierten UX-Design im Projekt-Team. Diese müsste gegebenenfalls durch eine entsprechende Schulung vorab aufgebaut oder für den Zeitraum der Interpretationsphase durch einen Moderator mit entsprechenden Kenntnissen ins Team eingebracht werden.

Um diese Schwachstellen zu berücksichtigen, ist eine Ergänzung der Erlebnisinterviews durch weitere Methoden geplant, die dem Design-Team verstärkt Unterstützung bei der Ableitung der Bedürfnisse und deren Berücksichtigung bei Design-Entscheidungen bieten. Hierzu sollte bereits in den Erlebnisinterviews ein stärkerer Bezug der Erlebnisberichte zu den Bedürfnissen hergestellt werden. Dazu könnten die Methoden, die in unserem Projektbeispiel vom Entwicklungs-Team in der Interpretationsphase eingesetzt wurden (Bauen mit Lego®-Steinen, Bedürfnispersona), herangezogen werden, um sich im Zuge des Interviews gemeinsam mit dem Interviewpartner dem Bedürfnis hinter dem jeweiligen Erlebnis zu nähern. Es ist geplant diese Weiterentwicklung der Methode der Erlebnisinterviews in zukünftigen Projekten zu evaluieren, um eine optimale Unterstützung des Teams bei der Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse in frühen Entwicklungsphasen sicher zu stellen.

4 Literaturverzeichnis

DIVSI 2016

DEUTSCHES INSTITUT FÜR VERTRAUEN UND SICHERHEIT IM INTERNET:
Internet-Milieus 2016: Die digitalisierte Gesellschaft in Bewegung. 2016

- DIN EN ISO 9241-210 2010 DIN EN ISO 9241-210. 2010-03. *Ergonomics of human–system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems*
- Fronemann und Peissner 2014 FRONEMANN, Nora ; PEISSNER, Matthias: User Experience Concept Exploration : User Needs as a Source for Innovation. 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
- Harel und Papert 1991 HAREL, Idit ; PAPERT, Seymour: *Constructionism : Research reports and essays, 1985-1990*. Norwood, N.J. : Ablex Pub. Corp, 1991
- 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
- Kahneman 1999 KAHNEMAN, Daniel: Objective Happiness. In: KAHNEMAN, Daniel; DIENER, Ed; SCHWARZ, Norbert (Hrsg.): *Well-being : The foundations of hedonic psychology*. New York : Russell Sage Foundation Press, 1999, S. 3–25
- Krüger et al. 2015 KRÜGER, Anne Elisabeth ; FRONEMANN, Nora ; PEISSNER, Matthias: Das kreative Potential der Ingenieure : menschenzentrierte Ingenieurskunst. In: BINZ, Hansgeorg; BERTSCHE, Bernd; BAUER, Wilhelm; ROTH, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) : Entwicklung smarterer Produkte für die Zukunft*. Stuttgart, 2015, S. 40
- Krüger et al. 2016 KRÜGER, Anne Elisabeth ; PEISSNER, Matthias ; FRONEMANN, Nora ; POLLMANN, Kathrin: BUILDING IDEAS. In: BJÖRK, Staffan; ERIKSSON, Eva (Hrsg.): *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*. New York, NY : ACM, 2016, S. 1–6
- McAdams 2009 MCADAMS, Dan P.: *The person : An introduction to the science of personality psychology*. 5. ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2009
- Reiss 2004 REISS, Steven: *Multifaceted Nature of Intrinsic Motivation The Theory of 16 Basic Desires*. In: *Review of General Psychology* (2004), Vol. 8, No. 3, S. 179–193
- Schön 1983 SCHÖN, Donald A.: *The reflective practitioner : How professionals think in action*. New York : Basic Books, 1983
- Sheldon et al. 2001 SHELDON, Kennon M. ; KIM, Youngmee ; ELLIOT, Andrew J. ; KASSER, Tim: *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
- Spath et al. 2010 SPATH, Dieter ; PEISSNER, Matthias ; SPROLL, Sandra: Methods from Neuroscience for Measuring User Experience in Work Environments. In: *Proceedings of the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE '10)*, 2010
- WHO 2015 WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Global strategy and action plan on ageing and health*. 2015
- Zeiner et al. 2016 ZEINER, Katharina M. ; LAIB, Magdalena ; SCHIPPERT, Katharina ; BURMESTER, Michael: Identifying Experience Categories to Design for Positive Experiences with Technology at Work. In: *CHI'16 : Extended Abstracts*, 2016