

Methodik zur Entwicklung von individualisierten Mikrosystemen

Methodology for the Development of Individualized Microsystems

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

von

Faruk Civelek, M.Sc.

aus Aalen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Zimmermann

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Alexander Brem

Tag der mündlichen Prüfung: 21.09.2023

Institut für Mikrointegration der Universität Stuttgart

2023

Danksagung

Diese Arbeit, die während meiner Zeit am Hahn-Schickard Institut in Stuttgart entstand, verdankt ihre Vollendung dem Engagement und der Unterstützung vieler Menschen. Mein besonderer Dank gilt all jenen, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben.

Ich möchte meine tiefe Wertschätzung für Herrn Prof. Dr.-Ing. André Zimmermann, Leiter des Hahn-Schickard Instituts und des Instituts für Mikrointegration (ifm), als Hauptberichter zum Ausdruck bringen. Seine exzellente Betreuung und geduldige Anleitung, gepaart mit seiner sorgfältigen Durchsicht meiner Arbeit, sind für mich von unschätzbarem Wert gewesen. Herrn Prof. Dr. rer. pol. Alexander Brem, dem Leiter des Instituts für Entrepreneurship und Innovationsforschung (ENI), möchte ich für seine wertvollen Beiträge meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Als Mitberichter hat er mehr als üblich erheblich zur Tiefe und Qualität dieser Arbeit beigetragen.

Ein herzlicher Dank gebührt meinen Kollegen von Hahn-Schickard und dem Institut für Mikrointegration der Universität Stuttgart. Ihr kollegiales Miteinander und ihre Hilfsbereitschaft waren während der Erstellung dieser Arbeit von großem Wert. Besonders möchte ich Dr.-Ing. Karl-Peter Fritz erwähnen. Trotz seiner Rolle als Institutsleiter war er stets offen für Fragen, Ideen und Lösungsvorschläge. Meine Dankbarkeit gilt ebenfalls Dr. Benedikt Wigger, Christoph Gielisch und Claudia Feith für ihren bereichernden Austausch und ihre Ratschläge in der Gruppe Innovationsmanagement / Digitale Produktionswerkzeuge.

In besonderem Maße möchte ich mich bei meiner Familie, vor allem bei Hatice und meinen Eltern Songül und Sultan Civelek bedanken. Herzlich möchte ich mich bei meiner Frau Kristina Shukran bedanken, die mir während der gesamten Zeit den Rücken frei hielt und mich motivierte. Auch Ihre wissenschaftlichen Arbeiten waren stets eine Inspiration für mich. Ebenso möchte ich mich bei meinen Kindern Ibrahim Eymen und Osman Tahir bedanken, denen ich nicht die nötige Aufmerksamkeit geben konnte, die sie eigentlich verdient hätten.

Mit aufrichtiger Wertschätzung möchte ich Prof. Dr. habil. Hüseyin İlker Çınar ehren, den ehemaligen Inhaber des Lehrstuhls Tafsīr an der Universität Osnabrück, Initiator und Gründer des KUDEM e.V. und Gründungsdirektor des IFIS&IZ e.V.. Seine Unterstützung und sein Beistand waren nicht nur Quellen der Kraft und Inspiration für mich, sondern auch entscheidende Faktoren für den Beginn und Erfolg dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Formelzeichenverzeichnis.....	IX
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Kurzfassung.....	XV
Abstract.....	XVI
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Definitionen und inhaltliche Abgrenzung	4
2.1.1 Prozesse in der Produktentwicklung	5
2.1.2 Methoden in der Produktentwicklung.....	8
2.1.3 Produktindividualisierung	10
2.1.4 Mikrosystemtechnik	15
2.1.4.1 Grundlagen und Herstellung von Mikrosystemen	15
2.1.4.2 Molded Interconnect Devices	20
2.1.4.3 Digitale Fertigungsverfahren	26
2.1.4.4 Individualisierte Mikrosysteme und mögliche Prozessketten.....	30
2.2 Produktentstehungsprozesse	32
2.2.1 Abstraktionslevel und Modellierung.....	32
2.2.2 Einflussfaktoren auf den PEP.....	37
2.2.3 Adaptierte Produktentwicklungsprozesse	39
2.2.3.1 Mikrosystemtechnik.....	39
2.2.3.2 Individualisierung	46
2.2.3.3 Digitale Fertigungsverfahren	51
2.2.4 Erfassung und Einführung von Produktentstehungsprozessen	59
2.2.5 Vorgehen zur Optimierung von Entwicklungsprozessen.....	61
2.3 Produktentwicklungsmethoden	65
2.3.1 Relevanz für den Einsatz von PEM.....	65
2.3.2 Mögliche PEM zur Qualitätssicherung und Fertigbarkeit.....	68
2.3.3 Systematische Auswahl von PEM.....	71
2.3.4 PEM und Ansätze für die Produktindividualisierung	74
2.3.5 Spezifische Entwicklungsmethoden für räumliche Schaltungsträger	80
2.3.5.1 MID-Plan	81
2.3.5.2 MID-Konstruktionskatalog	83

2.3.5.3	Restriktionscheckliste und Eigenschaftskarte der MID-Verfahren	85
2.3.5.4	3D-CAD-Programme	87
3	Wissenschaftliche Fragestellung.....	88
4	Methodik zur Erstellung von Kontextfaktoren anhand von Use-Cases	94
4.1	Anwendungsfälle für iMST	95
4.1.1	Otoplastik zur Messung des Blutdrucks.....	95
4.1.2	Retrofit-Sensorik zur Durchführung einer Verzahnungsprüfung.....	96
4.1.3	Räumliche Sensorik zur Messung von Lichtstrahlen	97
4.1.4	Sensoren für spezielle Schiffscontainer	98
4.1.5	Messtechnik für Testfahrzeuge	99
4.1.6	Intelligente Steckverbinder als MVP	100
4.1.7	Mundmouse für Menschen mit Behinderung.....	101
4.2	Systematisierung der Use-Cases.....	103
4.3	Anforderungen an iMST.....	107
4.4	Use-Case-basierte Methodik.....	108
4.5	Validierung der Methodik anhand eines neuen Use-Case	109
4.6	Implikationen der Ergebnisse	110
5	Methodik zur Erstellung einer integrierten Produktentwicklung für die MST	113
5.1	Pilotprojekt „Smart-Connector“	114
5.1.1	Ausgangssituation und Anforderungen	114
5.1.2	Beobachtung der Entwicklungsschritte	116
5.1.3	Beobachtung der Fertigungsschritte	121
5.1.4	Modellierung des Pilotprojekts	124
5.2	Zwischenfazit des Pilotprojektes als Basis der Befragung	127
5.3	Befragung auf Basis der Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt.....	134
5.3.1	Interviewleitfaden.....	134
5.3.2	Ergebnisse der Interviews	136
5.3.3	Analyse und Strukturierung der Ergebnisse.....	143
5.4	Entwicklung und Testen ausgewählter Methoden für iMST	147
5.4.1	Entwicklung eines wissensbasierten Systems	147
5.4.2	Testen des Co-Design-Ansatzes mit MCAD und ECAD.....	149
5.4.3	Validierung KETTS	152
5.5	Implikationen der Ergebnisse	156
6	Produktentwicklungsmethodik für iMST.....	160
6.1	Phasen und Prozessschritte	160
6.2	Methoden und Werkzeuge.....	162

6.3	Ganzheitliche Betrachtung	171
6.4	Validierung des PEP	173
7	Diskussion	179
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	187
	Literaturverzeichnis.....	190
	Publikationen.....	208
	Begleitende studentische Arbeiten	209
	Anhang	210
	Anhang A.....	210
	Anhang B.....	237
	Anhang C.....	238
	Anhang D.....	239

Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing File Format
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CE	Concurrent Engineering
CPS	Cyber-Physische Systeme
Cp	Process Capability Index
Cpk	Process Capability Index Adjusted for Process Centering
CSM	Current State Map
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DfX	Design for Everything
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DLP	Digital Light Processing
DLZ	Durchlaufzeit
DRM	Design Research Methodology
FDM	Fused Deposition Modeling
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Failure Tree Analysis
FTR	First Time Right
GUI	Graphische Benutzeroberfläche
GT	Grounded Theory
iMST	Individualisierte(s) Mikrosystem(e)
ISG	Integrierter Starter-Generator
VI	

Abkürzungsverzeichnis

ISO	International Organization for Standardization
KETTS	Knowledge-Engineering Tool for Technology Selection
LCP	Liquid Crystal Polymer
LDS	Laserdirektstrukturierung
MC	Mass Customization
MDR	EU-Medizinprodukteverordnung
MI	Mass Individualization
MID	Molded Interconnect Devices
MST	Mikrosystemtechnik
MJM	Multi Jet Modeling
MP	Mass Production
MVP	Minimum Viable Product
PBT	Polybutylenterephthalat
PCB	Printed Circuit Board
PEM	Produktentwicklungsmethode(n)
PEP	Produktentstehungsprozess(e)
PET	Polyethylenterephthalat
PUC	Paraphrasierter Use-Case
PVD	Physical Vapour Deposition
PZ	Prozesszeit
QFD	Quality Function Deployment
RBV	Risikobasierte Validierung
RE	Requirement Engineering
RefMod	Reference Model
RZP	Risikoprioritätszahl
SE	Simultaneous Engineering

SLS	Selektives Lasersintern
SSI	Semi-Strukturiertes Interview
STL	Stereolithographie
TRIZ	dt. Theorie des erfinderischen Problemlösens
UCD	User-Centered Design
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WQ	Wertstromquotient

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Auftrittswahrscheinlichkeit	-
B	Bedeutung des Ausfalls	-
C _p	Process Capability Index	-
Cu	Kupfer	-
DLZ	Durchlaufzeit	h
e	Elementarladung	C bzw. As
E	Entdeckungswahrscheinlichkeit	-
i	Inputgröße	-
LSL	Obere Spezifikationsgrenze	-
PZ	Prozesszeit	h
R ²	Bestimmtheitsmaß	-
RPZ	Risikoprioritätszahl	-
USL	Untere Spezifikationsgrenze	-
w	Gewichtung	-
WQ	Wertstromquotient	-
μ	Erwartungswert	-
σ	Standardabweichung	-

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rückenmarksimplantat als ein Beispiel für iMST [3].	1
Abbildung 2: Relevanz von Losgröße 1. Eine Studie für den Deutschen Industrie 4.0 Index 2017 nach [7].	2
Abbildung 3: Abgrenzung bzw. Schnittmenge des Themengebietes.	5
Abbildung 4: Allgemeine Prozessdarstellung.	6
Abbildung 5: Generisches Schema des Entwicklungsprozesses nach [31].	7
Abbildung 6: Elemente eines Prozessmoduls nach [34].	7
Abbildung 7: Zentrale Aufgabe der Produktentwicklung nach [35].	8
Abbildung 8: Münchener Methodenmodell zum strukturierten Vorgehen der Methodenanwendung nach [40].	10
Abbildung 9: Designen der Schokolinsen mit individuellen Bildern oder Texten nach [63].	13
Abbildung 10: Vordefiniertes Auswahlmenü von Farben für Schokolinsen nach [63].	13
Abbildung 11: Struktur des Mikrosystems.	17
Abbildung 12: Grundlegendes Schema eines Mikrosystems nach [74].	18
Abbildung 13: Kategorisierung der Fertigungsverfahren von Mikrosystemen in den Hauptgruppen der DIN8580.	18
Abbildung 14: Referenzprozess für MID nach [79].	21
Abbildung 15: Prozessschritte der Laserstrukturierungsverfahren nach [74].	23
Abbildung 16: Heißprägen in der MID-Technik nach [74].	24
Abbildung 17: Kategorisierung der Begriffe innerhalb der digitalen Fertigung nach [99].	27
Abbildung 18: Prozessschritte für die Herstellung von additiv gefertigten Bauteilen nach [103].	28
Abbildung 19: Digitale Prozessketten zur Herstellung von iMST.	30
Abbildung 20: MID-Bauteil mit digitalen Fertigungsverfahren (MJM) nach [105].	31
Abbildung 21: MID-Bauteil mit dem RapidTooling-Prozess nach [105].	31
Abbildung 22: PEP von Pahl und Beitz.	32
Abbildung 23: Abstraktionslevel der Prozessmodellierung für die Produktentwicklung nach [39].	33
Abbildung 24: Unterschied zwischen Simultaneous (oben) und Concurrent Engineering (unten) nach [122].	36
Abbildung 25: Makrozyklen des V-Modells nach [125].	37
Abbildung 26: Modell zur Analyse von Kontextfaktoren nach [127].	38
Abbildung 27: Einflussfaktoren von Produktherstellungsprozessen nach [40].	39
Abbildung 28: Entwicklungsmethodik der Mikrosystemtechnik nach [21].	40
Abbildung 29: Entwurfsprozess eines Mikrosystems nach [69].	42
Abbildung 30: Generisches Vorgehensmodell für die MID nach [132].	44
Abbildung 31: Phasenmodell des kundenindividuellen Produktdefinitionsprozesses nach [65].	47
Abbildung 32: Einfluss der Stückzahlen auf den Entstehungsprozess nach [112].	48
Abbildung 33: Vorgehen bei der Entwicklung individualisierter Produkte nach [134].	48
Abbildung 34: Entwicklungsmethodik für individualisierte Produkte mittels digitaler Fertigungsverfahren nach [48].	50
Abbildung 35: PEP im Kontext der Additiven Fertigung nach [136].	52
Abbildung 36: Prozess zur Definition der Teileorientierung in der frühen Entwurfsphase nach [131].	53
Abbildung 37: DfMA-Framework nach [104].	55
Abbildung 38: Konstruktionsmethodik AM nach [133].	58
Abbildung 39: Vorgehensweise zur Rationalisierung in der Entwicklung nach [40].	63
Abbildung 40: Current State Map im Lean Development nach [152].	64
Abbildung 41: Zusammenhang zwischen Durchlaufzeit und Prozesszeit.	65
Abbildung 42: PEM nach ihrer Nutzung und Bedeutung nach [44], [113].	66

Abbildung 43: Methoden-Relevanz für iMST.	68
Abbildung 44: V-Modell mit integrierten Methoden zur Zielabsicherung nach [164].	69
Abbildung 45: Methodenordnender Mechanismus zur Methodenauswahl nach [113].	72
Abbildung 46: Ansatz methodencharakterisierende Mechanismus nach [113].	72
Abbildung 47: Elementarmethodischer Ansatz nach [113].	73
Abbildung 48: Produktarchitektur eines Wasserspenders mit individuellen Komponenten nach [177].	76
Abbildung 49: Schematischer Ansatz zur Entwicklung eines individualisierten Produktes nach [178].	77
Abbildung 50: Zusammenhang zwischen Konstruktionsarten und Individualisierungsgrad nach [65].	79
Abbildung 51: Metastrukturmodell für individualisierte Produkte nach [56], [65].	80
Abbildung 52: Entscheidungskriterien für die MID-Technik nach [180], [79].	81
Abbildung 53: Konzeptioneller Aufbau des „MID-Plan“ nach [85].	82
Abbildung 54: MID-Konstruktionskatalog nach [78].	84
Abbildung 55: MID-Eigenschaftskarte nach [181].	86
Abbildung 56: Problemstellung der Arbeit - PEP für die Mikrosystemtechnik nach [21].	90
Abbildung 57: Forschungsdesign dieser Arbeit nach der DRM nach [196].	92
Abbildung 58: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit.	93
Abbildung 59: Otoplastik als iMST für eine permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung im Ohr [199].	95
Abbildung 60: Funktionsskizze einer Zahnprüfung. In Kooperation mit Linnenbrink Technik Warburg Maschinenbau GmbH.	97
Abbildung 61: iMST als Lichtsensor.	98
Abbildung 62: Messung eines Testfahrzeuges in engen Bauräumen.	100
Abbildung 63: Intelligenter Stecker als MVP.	101
Abbildung 64: Zu optimierende Mundmouse mit der MID-Technik.	102
Abbildung 65: Herleitung spezifischer Merkmale zur Kategorisierung der Anwendungsfälle von iMST.	105
Abbildung 66: Induktive Kategorisierung aller analysierten iMST-Anwendungsfälle unter Berücksichtigung von Anforderungen zur Bildung von Produktgruppen.	109
Abbildung 67: Individualisierter Sensor in den unterschiedlichen Fertigungsstufen: CAD-Konzept (oben links), nach der Integration der elektronischen Komponenten (oben rechts) und als fertiges Produkt(unten). Fraunhofer IPA (2022).	110
Abbildung 68: Validierung der Methodik zur Identifikation von Kontextfaktoren.	110
Abbildung 69: Optimierungsprozess als Grundlage des PEP von iMST.	113
Abbildung 70: Zusammenspiel zwischen Anforderungen des Bauteils und Restriktionen des Fertigungsprozesses.	115
Abbildung 71: Entwicklungsprozess des Pilotprojekts.	116
Abbildung 72: Parameter Leiterbahndesign mit Radius und engem Space.	118
Abbildung 73: Bestückungsplan 2D-Layout.	119
Abbildung 74: Simulation Spritzguss-Prozess zur Identifikation von Bindenähten.	119
Abbildung 75: Smart-Connector-Entwurf Systemintegration.	120
Abbildung 76: Digitale Prozesskette zur Herstellung des „Smart-Connectors“.	121
Abbildung 77: Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze mit Schieber.	121
Abbildung 78: Überblick über den Werkzeugeinsatz (CAD).	122
Abbildung 79: Fehlerhafte Bauteile vom Rapid-Tooling-Prozess.	123
Abbildung 80: Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte.	124
Abbildung 81: Ist-Analyse des „Smart-Connectors“.	126
Abbildung 82: PEP von UnA.	137
Abbildung 83: PEP von UnB.	138
Abbildung 84: PEP von UnC.	139

Abbildung 85: PEP von UnD.....	140
Abbildung 86: PEP von UnE.	140
Abbildung 87: PEP von UnF.....	141
Abbildung 88: PEP von UnG.....	142
Abbildung 89: Graphische Darstellung und Terminologie des Reference Model in der Entwicklungsmethodik nach [196].....	144
Abbildung 90: Kategorisierung der Maßnahmen zur Entwicklung von individualisierten Produkten nach [220].....	145
Abbildung 91: RefMod für die Entwicklung von individualisierten Produkten.	146
Abbildung 92: Abstrakte Darstellung des Lösungsprinzips von KETTS.	147
Abbildung 93: GUI von KETTS.	149
Abbildung 94: Co-Design eines iMST (MCAD & ECAD) mit der Beta-Version von Altium.	151
Abbildung 95: Eingaben und Ergebnisse des KETTS-V0.1. A =Datenbank kann direkt über die GUI bearbeitet und angepasst werden, B =Erste Abfrage der Anforderungen, zur Prüfung ob die Machbarkeit grundsätzlich möglich ist, C =weitere Anforderungen, D =vorgeschlagene Prozesskette.	152
Abbildung 96: KETTS-V0.2 zur Identifikation eines geeigneten Materials anhand von spezifischen Anforderungen.....	153
Abbildung 97: Validierung und Erfolgswahrscheinlichkeit von KETTS in Abhängigkeit der Anzahl an Anforderungen.....	154
Abbildung 98: Validierung KETTS-V0.2 zur Identifikation der optimalen AVT.....	155
Abbildung 99: Problematik mit den Air Wires (siehe gelbe Linien), die nicht korrekt auf den Via-Pads bleiben.	159
Abbildung 100: Problematik bei der Ausrichtung von Komponenten.....	159
Abbildung 101: Prozessschritte der PEP-Methodik für iMST.....	162
Abbildung 102: Kernprozesse und Aktivitäten des Requirements Engineering nach [224].	163
Abbildung 103: Prozessfähigkeitsanalyse (Cpk und Cp).....	170
Abbildung 104: PEP für iMST.....	172
Abbildung 105: Digitales Produktdesign mit elektrischen Leiterbahnen der ersten Phase.	174
Abbildung 106: Design-Rule Leiterbahnabstand nach LPKF.....	175
Abbildung 107: Grundkörper hergestellt mit dem <i>freeformer</i> . In Kooperation mit Arburg.....	177
Abbildung 108: Darstellung der Problematik zur Metallisierung der Pins. In Kooperation mit LPKF.	177
Abbildung 109: Stellenweise Lücken in den Strukturen bei einem Einfallswinkel von ca. 60°. In Kooperation mit LPKF.....	178

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definitionen für Mass Customization (MC) und Mass Individualization (MI)	11
Tabelle 2. Unterschiede und Eigenschaften von Serienprodukten und individualisierten Produkten... ..	15
Tabelle 3: Gegenüberstellung MID-Strukturierungsverfahren nach [79].	26
Tabelle 4. Übersicht über die Verfahren der generativen Fertigung nach [104], [107]–[110].	29
Tabelle 5: Methoden zur Modellierung von Prozessen.	34
Tabelle 6: Entwicklungsablauf eines Mikrosystems nach [131].	43
Tabelle 7. Methoden zur Erfassung von Entwicklungsprozessen nach [141].	60
Tabelle 8. Kriterien zur Auswahl von Methoden nach [40].	74
Tabelle 9. Restriktionscheckliste nach [181].	85
Tabelle 10: Abstraktionsprozess der PUC mit den hergeleiteten Merkmalen.	106
Tabelle 11: Bewertungskriterien der Anforderungen für iMST.	108
Tabelle 12: Anforderungen des „Smart-Connectors“	117
Tabelle 13: Kennzahlen aus der Ist-Analyse des Pilotprojekts.	126
Tabelle 14. Optimierungsansätze aus dem Pilotprojekt.	127
Tabelle 15. Sammlung von Anforderungen für eine ideale MCAD&ECAD Softwarelösung.	131
Tabelle 16. Kriterien zur Auswahl von Unternehmen.	134
Tabelle 17. Übersicht über die ausgewählten Unternehmen der Befragten.	135
Tabelle 18. Interviewleitfaden für das SSI.	136
Tabelle 19. Einzeldaten der Validierung von KETTS.	154
Tabelle 20: Partner und Rahmen der Validierung des PEP.	173
Tabelle 21: Vergleich zwischen Validierungsprozess und Pilotprojekt	178

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit Methoden und Prozessen der Produktentwicklung für die Mikrosystemtechnik. Hierbei fließt der Kontext der Individualisierung in die Methoden und Prozesse ein. Das Ziel dieser Arbeit ist es, konkrete Maßnahmen für eine effizientere Herstellung von individualisierten Mikrosystemen (iMST) systematisch abzuleiten. Zur Erreichung des Ziels werden in dieser Arbeit generelle Anforderungen aus diversen Anwendungsbereichen aufgezeigt. Anschließend wird mittels einer Fallstudien ein iMST hergestellt und strukturiert beobachtet. Mit dieser Studie zeigt die Arbeit konkrete Schwachstellen und mögliche Handlungsansätze in der Entwicklung von iMST auf. Um über diese Studie hinaus weitere Erkenntnisse von Schwachstellen und erforderlichen Maßnahmen zu erlangen, werden mehrere Unternehmen im Rahmen einer qualitativen Analyse befragt. Mit dieser Datengrundlage bildet die Arbeit eine Methodik, welche Prozesse, Methoden, Anforderungen und Werkzeuge vereint.

Die Methodik zeigt, in welchen Fällen und Phasen die entsprechenden Methoden eingesetzt werden sollen. Aufgrund der Herausforderungen von individualisierten Anwendungen stellt diese Arbeit die wichtigsten Methoden zur Bewerkstelligung dieser Herausforderungen bereit. Ein wissensbasiertes Werkzeug (KETTS) und die Nutzung von M/ECAD-Applikationen bieten großes Potenzial zur Effizienzsteigerung des Entstehungsprozesses. Diese werden in dieser Arbeit genauer beleuchtet, entwickelt und getestet. Die Methodik wird mit der Herstellung eines weiteren iMST validiert, wodurch der Mehrwert der ausgewählten Prozesse und Methoden deutlich wird. Im abschließenden Teil dieser Arbeit werden die Beschränkungen sowie potenzielle Forschungsrichtungen in der Produktentwicklung und Mikrosystemtechnik erörtert. Hierbei werden insbesondere die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Erweiterung der einzelnen Methoden betrachtet.

Abstract

This thesis deals with methods and processes of product development for microsystems. Thereby, the context of individualization enters into the methods and processes. The goal of this study is to systematically derive specific measures for more efficient development and production of individualized microsystems (iMST). To achieve this goal, general requirements from various application areas are identified in this thesis. Then, through a case study, an iMST is manufactured and observed systematically. With this study, the thesis shows specific weaknesses and possible approaches in the development of iMST. In order to gain further insights of weaknesses and necessary measures beyond this study, several companies are interviewed in a qualitative study. With this database, the work creates a methodology that combines processes, methods, requirements and tools.

The methodology shows in which cases and stages the respective methods should be used. Due to the challenges of individualized applications, this work provides the most important methods to overcome these challenges. A knowledge-based tool (KETTS) and the use of M/ECAD applications offer great potential to increase the efficiency of the creation process. These will be explored, developed and tested in more detail in this thesis. The methodology is validated with the manufacturing of another iMST, which demonstrates the added value of the selected processes and methods. The final part of this thesis discusses the limitations as well as potential research directions in product development and microsystems engineering. In particular, the possibilities for further development and expansion of the individual methods are considered.

1 Einleitung und Motivation

Die Digitalisierung beeinflusst die Gesellschaft und Industrie gleichermaßen. Immer mehr digitale Prozesse, Services und Produkte erobern den Markt. Die Grundlage dafür sind u. a. elektronische Mikrosysteme, wobei es sich bspw. um Sensoren, Aktoren oder Funkmodule handeln kann. Der Hardwarefertigung elektronischer Mikrosysteme kommt damit eine besondere Bedeutung zu, weshalb bspw. das Landesministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg die Mikrosystemtechnik als eine Schlüsseltechnologie für Digitalisierung deklariert hat.

Die Umsätze auf dem globalen Markt für Mikrosysteme sind branchenübergreifend kontinuierlich gestiegen, wobei Consumer, Automotive, Medical und Industrial die umsatzstärksten Branchen sind [1]. Auch für die Zukunft wird mit einem Wachstum gerechnet, was aus einer Studie von *Market Research Future* hervorgeht [1]. Dabei wird von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 8,1% bis zum Jahre 2030 ausgegangen [2]. Die Haupttreiber für das Wachstum sind *smart wearable*, *connected car*, *smart home*, *automotive industry* und *personalized medicine* [2]. Ein Beispiel bildet ein Implantat, welches elektrische Impulse an Muskeln sendet, um die Wirkung des Gehirns nachzuahmen, sodass eines Tages Menschen mit schweren Wirbelsäulenverletzungen beim Stehen, Gehen und Trainieren geholfen werden könnte. Auf diese Weise konnte ein gelähmter Mann mit durchtrennter Wirbelsäule wieder gehen [3]. Abbildung 1 zeigt ein Rückenmarksimplantat als ein Beispiel für individualisierte Mikrosysteme (iMST)¹.

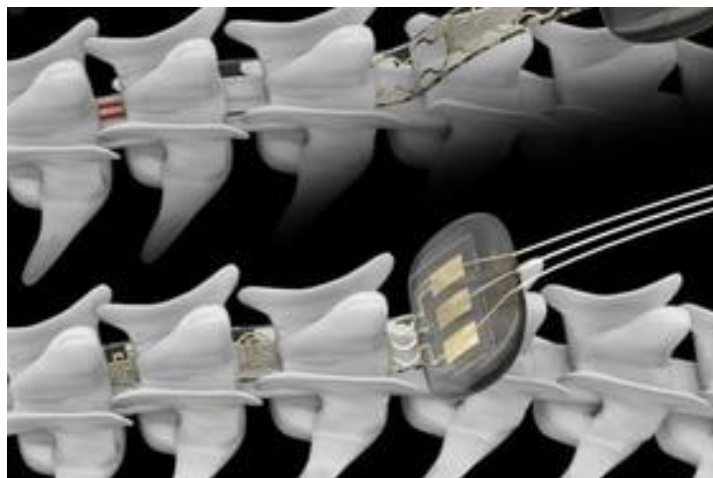


Abbildung 1: Rückenmarksimplantat als ein Beispiel für iMST [3].

¹ Der Begriff iMST hat in dieser Arbeit eine zentrale Bedeutung und wird daher im Kapitel 2.1.4.4 näher erläutert.

Darüber hinaus hat die Europäische Kommission zum Ausdruck gebracht, dass die Mikrosystemtechnik nicht nur für digitale Produkte und Dienste wichtig ist, sondern auch als Grundlage für Innovation und Wettbewerbsfähigkeit in allen wichtigen Wirtschaftszweigen dient [4], [5]. Parallel zu diesem Trend entstehen neue Anwendungsfelder von individualisierten Produkten, welche über die Medizin- oder Textilbranche hinausgehen. Über mehrere Branchen hinweg befragte die Staufen AG insgesamt 394 Unternehmen in Deutschland, ob die Losgröße 1 ein wichtiges strategisches Thema für ihr Unternehmen und ihre Branche ist. Mit Ausnahme der Automobilindustrie bejahten mehr als 70% der Befragten diese Frage, darunter auch die Maschinenbaubranche und die Elektronikindustrie (siehe Abbildung 2) [6].

Mit der Relevanz der Mikrosystemtechnik und dem Trend der Individualisierung entsteht ein neues Paradigma und damit auch eine neue Produktkategorie – iMST.

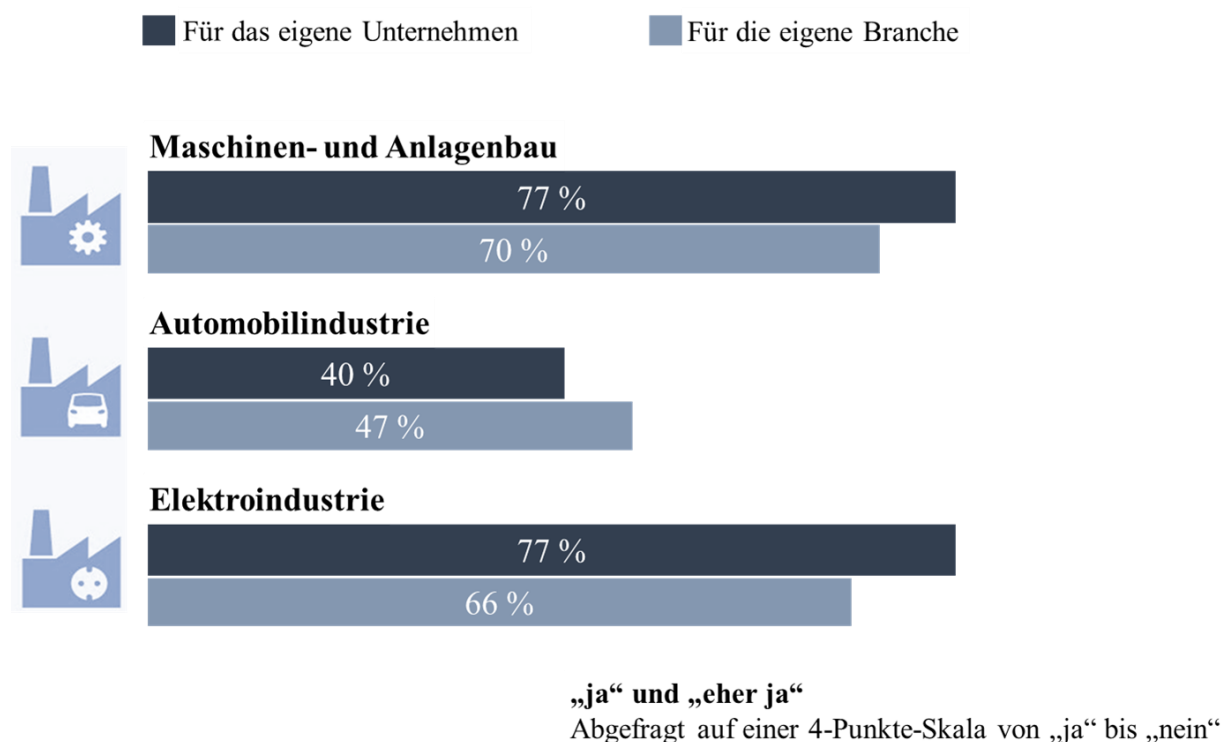


Abbildung 2: Relevanz von Losgröße 1. Eine Studie für den Deutschen Industrie 4.0 Index 2017 nach [7].

Durch die immanente Produktvielfalt in der Individualisierung und die interdisziplinäre Charakteristik der Mikrosystemtechnik wächst die Komplexität sowie die Bedeutung in der Produktentwicklung von iMST. Mit zunehmender Komplexität muss auch die Leistungsfähigkeit der Entwicklung steigen und somit auch der Bedarf an neuen Ansätzen in der Produktentwicklung [7]. Gemäß den Zielen der Produktentwicklung müssen Produkte so

entwickelt werden, dass die Bedürfnisse der Stakeholder eines Unternehmens erfüllt bzw. Märkte bedient oder erschlossen werden, um Gewinne zu erzielen [8]. Zur Erreichung dieser Ziele der Produktentwicklung, sind planbare und strukturierte Prozesse unabdingbar, die wiederum den korrekten Einsatz geeigneter Methoden und Hilfsmitteln ermöglichen [9]. Produktentstehungsprozesse (PEP) bieten den Entwicklern eine Art Rezeptur an, um die Entwicklung eines Produktes anforderungsgerecht zu gestalten [10]. Im Allgemeinen entsprechen die Anforderungen den Elementen des magischen Dreiecks im Projektmanagement: Zeit, Kosten und Qualität. Das Beheben von Fehlern oder die nachträgliche Anpassung ist mit hohen Kosten verbunden, was über die *rule of ten*² qualitativ dargestellt werden kann. Weiterhin werden über 70% der Gesamtkosten eines Produktes in der Entwicklungsphase festgelegt [11]. Vergangene Studien zeigen zudem, dass aufgrund einer kleineren Losgröße die Kosten in der Entwicklungsphase höher sein können [12] und somit davon ausgegangen werden kann, dass für iMST auch die *rule of ten* Fehlerkostenkurve weiter oben in der Y-Achse beginnt bzw. die Gesamtkosten über 70% liegen. Dass eine Kausalität zwischen der Qualität des PEP und dem Erfolg des Produktes vorliegt, zeigt von Regius [13] ausführlich. Folglich ist die Optimierung und Anpassung des PEP an die Rahmenbedingungen und Kontextfaktoren eines Unternehmens von essentieller Bedeutung [10], [14]–[20]. In der Wissenschaft und Praxis sind diverse PEP mit unterschiedlichen Granularitäten, Formen, Verlinkungen und Kontextfaktoren zu finden.³ Insbesondere iMST als Kontextfaktor vertieft zu betrachten, ist deshalb lohnenswert, da einerseits aufgrund der Individualisierung die spezifischen Bedürfnisse und Anforderungen sich je nach Anwendungsfall unterscheiden können – und daher eine hohe Flexibilität gewährleistet werden muss – und andererseits ein Mikrosystem abhängig von kostenintensiven Fertigungsverfahren ist [21], die zu einer gewissen Starrheit in der Entwicklung führen. Mikrosysteme bilden hierbei oft eine Komponente von Massenprodukten [22], wie Smartphones, Automobilen oder Computern [23], [24]. Folglich sind Mikrosysteme seither grundsätzlich nur für den Massenmarkt bestimmt.

Ein möglicher Lösungsansatz für dieses Dilemma bilden die digitalen Fertigungsverfahren, die heutzutage in einer so hohen Vielfalt zur Verfügung stehen, dass sie für den Entwickler und Manager kaum überschaubar sind. Eine Methodik für iMST ist auch deshalb von großer Bedeutung, da iMST u. a. Anwendung in der Medizintechnik finden, bei der aufgrund der

² Die "Rule of Ten" besagt, dass die Kosten für die Fehlerkorrektur in der Produktentwicklung in jeder Entwicklungsphase um den Faktor 10 ansteigen. Daher ist es wichtig, frühzeitig und sorgfältig zu planen und zu testen, um teure Fehler in späteren Phasen zu vermeiden. Die Y-Achse stellt die Kosten und die X-Achse die Entwicklungsphase dar [11].

³ Beispiele hierfür siehe Kapitel 2.1.1 – Prozesse der Produktentwicklung

Regularien eine systematische und strukturierte Vorgehensweise vorausgesetzt wird. Insbesondere die digitalen Prozessketten⁴, wie etwa die generativen Fertigungsverfahren, sind mit den Regularien der Medizintechnik schwer zu vereinbaren.

2 Stand der Technik

2.1 Definitionen und inhaltliche Abgrenzung

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Terminologien beschrieben und diskutiert. Diese sind notwendig und wichtig, um ein einheitliches Verständnis sicherzustellen. Zusätzlich werden die Begriffe „individualisierte Produkte“ und „individualisiertes Mikrosystem“ genauestens abgegrenzt und neu definiert.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf die drei Forschungsbereiche Individualisierung, Produktentwicklung und Mikrosystemtechnik, wobei diese sich weiter in individualisierte Produkte, Methoden und Prozesse sowie räumliche Schaltungsträger untergliedern lassen (siehe Abbildung 3). Dem Venn-Diagramm ist zu entnehmen, dass sich aus der Schnittmenge dieser untergliederten Bereiche die visuelle Eingrenzung bzw. Schnittmenge des Themengebietes dieser Arbeit ergibt.

⁴ Siehe Kapitele 2.2.3.3 für eine genaue Definition und Abgrenzung

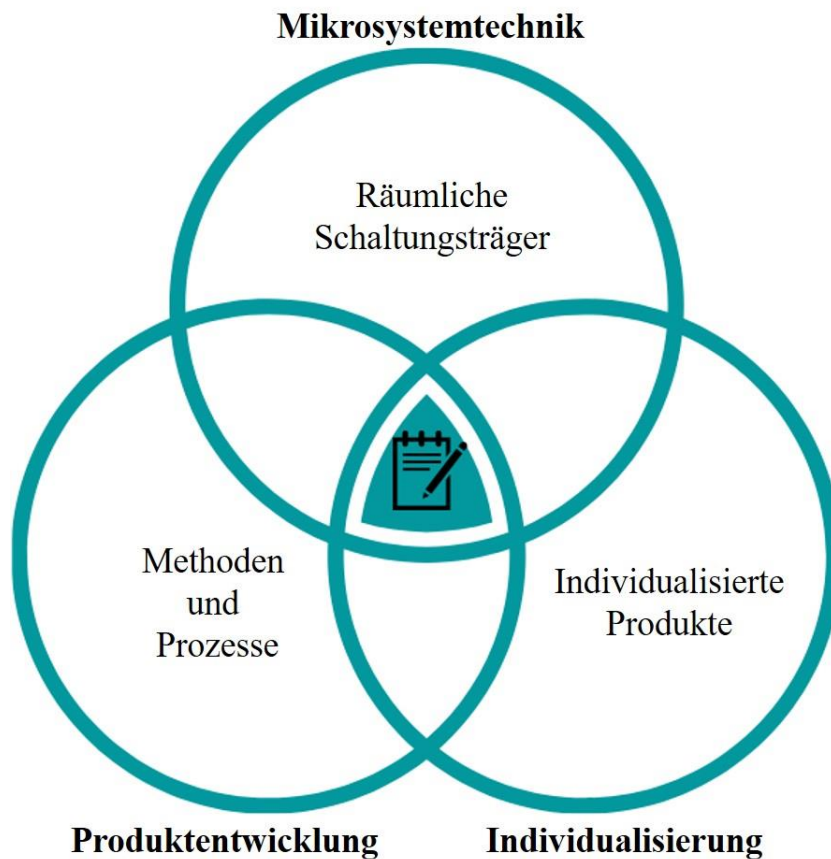


Abbildung 3: Abgrenzung bzw. Schnittmenge des Themengebietes.

2.1.1 Prozesse in der Produktentwicklung

Ein Entwicklungsprozess bildet einen speziellen Teil eines ganzheitlichen Prozesses ab, weshalb eine grobe und kontextspezifische Betrachtung des Begriffs „Prozess“ relevant ist und in diesem Unterkapitel definiert wird. Laut Duden wird der Begriff „Prozess“ als „ein Vorgang, der sich über eine gewisse Zeit erstreckt und bei dem etwas [allmählich] entsteht“ [25], beschrieben. In der Produktentwicklung ist das „Entstehende“ ein Produkt, wobei ein Produkt sowohl materiell als auch immateriell sein kann [26]. Demnach kann auch im Kontext der Produktentwicklung das Ergebnis eines Prozesses als ein Produkt betrachtet werden, wie von der ISO 9000:2005 definiert. Auch andere Definitionen des Begriffs Prozess lassen sich mit der Entwicklung von Produkten vereinbaren. Bspw. beschreibt Davenport [27] den Prozess als eine zeitlich sowie räumlich spezifisch strukturierte Menge von Aktivitäten mit einem Anfang und einem Ende sowie klar definierten Inputs und Outputs (siehe Abbildung 4). Im Kontext der

Produktentwicklung kann der Output als ein Produkt und der Input als Kundenanforderungen betrachtet werden.

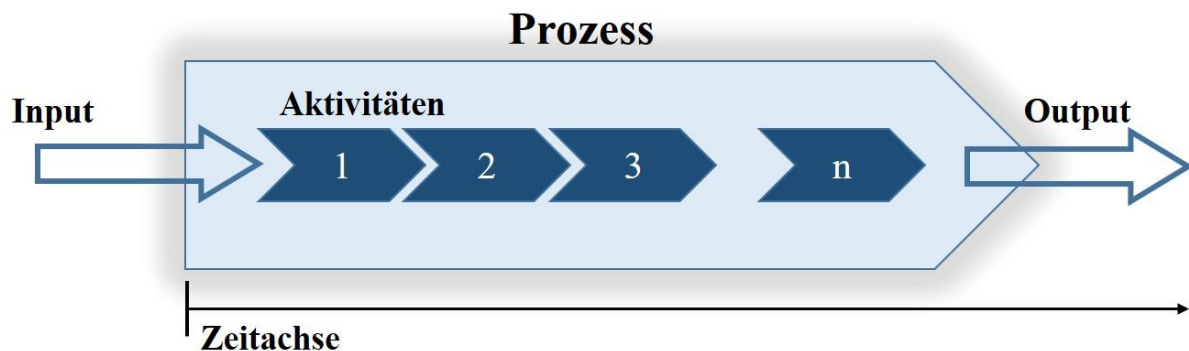


Abbildung 4: Allgemeine Prozessdarstellung.

Um aus einem Input einen effizienten Output zu erzielen, müssen die Aktivitäten innerhalb eines Prozesses mehrere Interaktionen aufweisen und mit den erforderlichen Ressourcen ausgeführt werden [28]. Eine Aktivität kann dabei durch Menschen oder Maschinen (Ressourcen) ausgeführt werden und als eine abgeschlossene Arbeitseinheit beschrieben werden.

Umfassender wird ein Prozess im Kontext der Produktentwicklung von Kreimeyer [29] definiert: „*A process consists of interdependent tasks that exchange information via artifacts. The process is enabled and supported by the purposeful allocation of resources and timeoriented constraints. All of these entities are interrelated, on the one hand, via the input-output relationships among tasks along the principal process flow, and, on the other hand, via other relationship types that generate the overall process network*“. In dieser Definition werden unterschiedlichen Abhängigkeiten und Randbedingungen innerhalb einer Aktivität aufgegriffen, wobei Kreimeyer von einer Aufgabe (task) spricht statt einer Aktivität. Analog zu dieser Definition kann eine einzelne Entwicklungstätigkeit mit der Darstellung nach Eversheim und Schuh [30] gemäß Abbildung 5 beschrieben werden. Die Entwicklungsaktivität stellt dabei das zentrale Element dar und kann je nach Detaillierungsgrad durch eine Aktivitätengruppe, generische Aktivität, spezifische Aktivität oder individuelle Aktivität festgelegt werden.

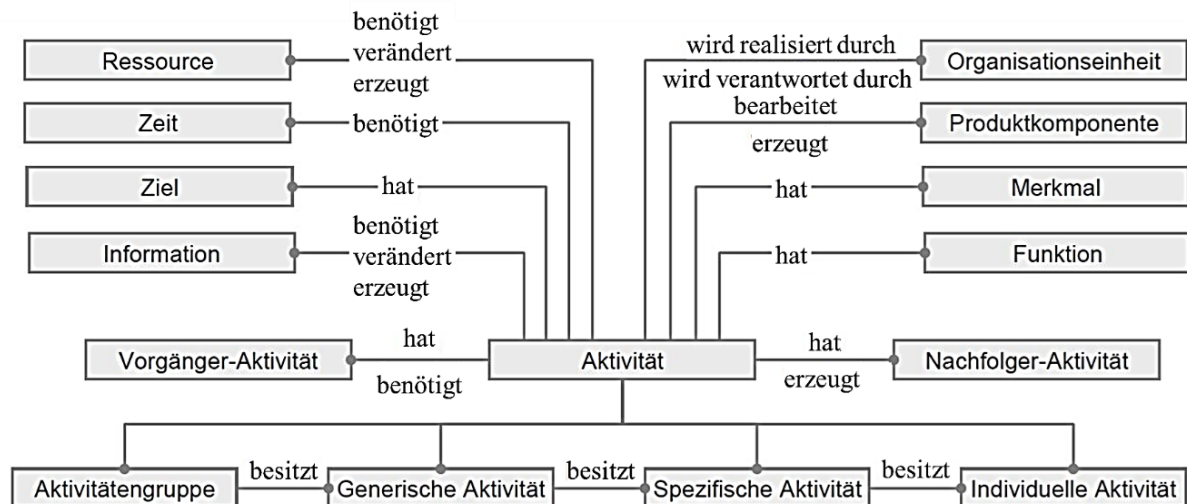


Abbildung 5: Generisches Schema des Entwicklungsprozesses nach [31].

In der Produktentwicklung kann eine Reihe von aufeinander folgenden Entwicklungsaktivitäten dargestellt werden, welche in Abhängigkeit der Anforderungen ein Produkt im Voraus beschreibt [11], [31]. Da Aktivitäten im Entwicklungsprozess mehrere Interaktionen aufweisen und Ressourcen benötigen, um aus dem Input den gewünschten Output zu erzielen [28], wird in der Modellierung und Kommunikation von Prozessen auf Prozessmodule zurückgegriffen [32]. Mit „gewünschtem Output“ ist ein Outcome gemeint, welches als eine Leistung zu verstehen ist, die einen Wert für eine Organisation schafft. So hat ein Prozess im engeren Sinne das Ziel, einen Output zu erzeugen, während er im weiteren Sinne darauf abzielt, ein Outcome zu generieren [33]. Prozessmodule verstehen sich als Sub-Prozesse und können mittels folgender Elemente beschrieben werden (siehe Abbildung 6) [34].

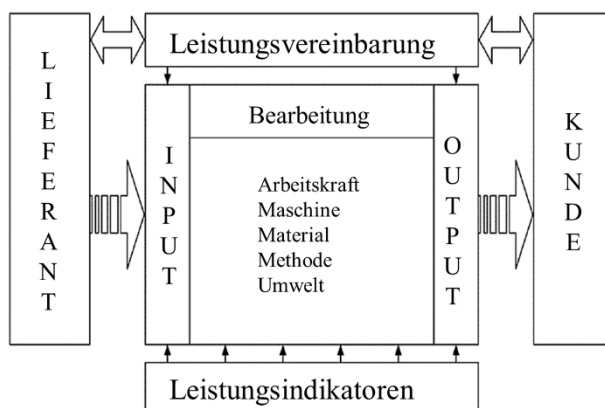


Abbildung 6: Elemente eines Prozessmoduls nach [34].

Input und Output sind die Schnittstellen zu Zulieferern und Kunden des Prozessmoduls und die Leistungvereinbarung definiert das Ziel des Prozessmoduls. Der Bearbeitungsschritt

(Bearbeitung) stellt die eigentliche Transformation dar und Leistungsindikatoren bewerten diesen Bearbeitungsschritt, wobei auch der Input und Output verglichen werden. Ein ähnliches Bild ist bei der Darstellung für die zentralen Aufgaben der Produktentwicklung zu finden [35] (siehe Abbildung 7). Aus der Systemtheorie ist bekannt, dass ein Prozess als eine Blackbox betrachtet werden kann [36]. Diese Blackbox hat Randbedingungen und Inputgrößen, woraus eine Outputgröße entsteht. In der Produktentwicklung wird durch die Beeinflussung der Randbedingungen und Inputgrößen stets versucht, den optimalen Output zu bekommen. So soll auch die Blackbox nach und nach besser verstanden werden, obwohl die genauen Kausalitäten zwischen Input und Output nicht bekannt sind. Daher kann die Blackbox auch als ein komplexes System beschrieben werden.

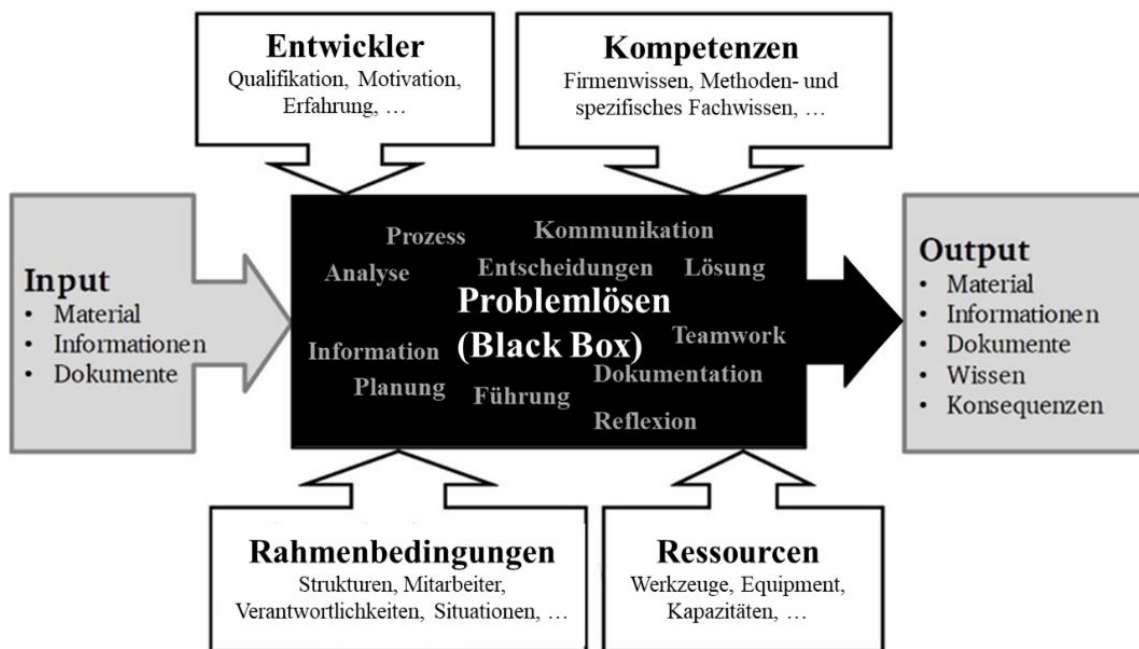


Abbildung 7: Zentrale Aufgabe der Produktentwicklung nach [35].

Zusammenfassend können die Aktivitäten in der Produktentwicklung durch Prozess-basierte Elemente dargestellt werden. Diese spiegeln somit das Umfeld der Produktentwicklung wider.

2.1.2 Methoden in der Produktentwicklung

Wie im Kapitel 2.1.1 wird in diesem Kapitel auf die allgemeine Definition eingegangen und mit der Produktentwicklung in Verbindung gebracht. Eine vertiefte und kontextspezifische Recherche zu den Produktentwicklungsmethoden wird im Kapitel 2.3 gezeigt. Da insbesondere dieser Begriff weit gefasst und nicht klar abzugrenzen ist sowie übergreifend und vielfältig gebraucht wird, ist die Klärung des Methodenbegriffs nötig.

Der ursprünglich aus dem Griechischen stammenden Begriff „Methode“⁵, der sich aus den beiden Worten *meta* (hin, nach) und *hodes* (der Weg) zusammensetzt, bedeutet umgangssprachlich „der Weg zu etwas hin“ [37]. Im Kontext der Produktentwicklung werden nach VDI 2217 [38] die Methoden als grundsätzliche Vorgehensweisen zur Lösung eines Problems definiert. Der Produktentwickler bzw. Konstrukteur benötigt sowohl analytische Fähigkeiten als auch Intuition, um Lösungen für ein Problem zu finden. Im Allgemeinen bietet die Konstruktionsmethodik drei Klassen an Methoden zur Unterstützung der Lösungsfindung [39]:

- Recherchierende Methoden: Stand des Wissens der Natur und Technik wird untersucht, bspw. Bionik oder Marktanalyse
- Heuristische (intuitive) Methoden: Ideenfindung, bspw. Brainstorming
- Diskursive Methoden: Verwendung von systematischen Suchmethoden, bspw. physikalische Effekte oder Konstruktionskataloge

In der Literatur ist der Unterschied zwischen einer Methode und Methodik zu finden [40], [41]. Die Kombination mehrerer Methoden wird als Methodik definiert, auch wenn diese Definition nicht konsequent eingehalten wird. Bspw. wird TRIZ (Theorie des erfinderischen Problemlösens), welches aus mehreren Methoden besteht, oft als eine Methode deklariert [40].

Methoden sind präskriptiv und stellen allgemein definierte Handlungsanweisungen dar, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen oder eine bestimmte Tätigkeit auszuführen, z. B. die Analyse und Sammlung von technischen Anforderungen [42]. Sie haben also einen operativen Charakter. Mit diesem Punkt wird die Abgrenzung zu einem Prozess deutlich, da Prozesse einen allgemeinen Handlungs- und Entscheidungsplan für bestimmte Situationen bereitstellen und Methoden auf gewissen Arbeitsnormen basieren [43], [44]. Vereinfacht kann gesagt werden, dass ein Prozess angibt, „Was“ zu tun ist, und eine Methode oder Methodik der Frage nach dem, „Wie“ etwas zu tun ist, nachgeht [40]. Für die Arbeit ist diese Unterscheidung zum einheitlichen Verständnis essentiell und begründet unter anderem die Auswahl der Forschungsmethode.

⁵ Methoden und Werkzeuge werden häufig als Synonym verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird unter einem Werkzeug (Tool) ein Hilfsmittel verstanden, das zur Unterstützung einer konkreten Anwendung von Methoden dient – wie aus Abbildung 8 nach Lindemann (2009) hergeleitet werden kann.

Bevor Methoden angewandt werden, sollten Überlegungen bzw. Modelle erstellt werden, die eine erfolgreiche Anwendung unterstützen, bspw. das Münchener Methodenmodell von Lindemann [40], welches vor der Anwendung einer Methode grundlegende Schritte empfiehlt (siehe Abbildung 8).

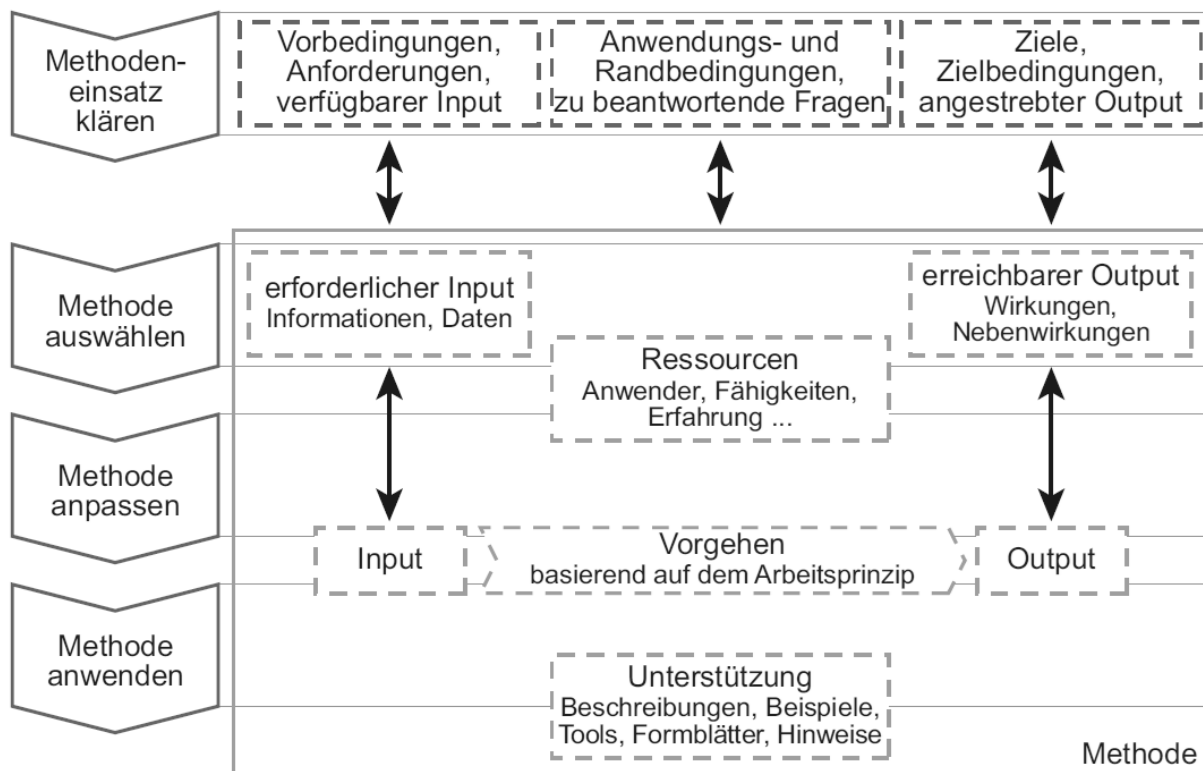


Abbildung 8: Münchener Methodenmodell zum strukturierten Vorgehen der Methodenanwendung nach [40].

Insbesondere wird sich die Arbeit mit dem letzten Punkt, Anwendung der Methode, befassen, da u. a. die von Gausemeier [45] durchgeführte Studie mit 68 Unternehmen gezeigt hat, dass es an der Akzeptanz und Nutzung der Methoden mangelt. Hauptgrund für die Nichtanwendung einer Methode in der Produktentwicklung ist oftmals die Zeit [45]. Daher müssen Werkzeuge entwickelt werden, welche Methoden anwenderfreundlicher machen.

2.1.3 Produktindividualisierung

Wird von individualisierten Produkten im unternehmerischen Kontext gesprochen, wird dies oft mit dem Begriff *Mass Customization* (MC) assoziiert. Daher wird der Begriff MC häufig als Synonym für individualisierte Produkte verwendet [46]. In der Literatur lässt sich zudem

der Begriff *Mass Individualization* (MI)⁶ vermehrt finden [47]–[49]. Bis auf Koren et al. [47] wurde keine genaue Abgrenzung zwischen MC und MI dargestellt. Daher werden in Tabelle 1 die Definitionen für MC und MI von unterschiedlichen Autoren aufgelistet. Anschließend wird versucht, eine klare Abgrenzung zwischen beiden Begriffen herzuleiten.

Tabelle 1: Definitionen für Mass Customization (MC) und Mass Individualization (MI)

Autoren	Definition von „Mass Customization“
Davis, 1987	“Mass customization should enable manufacturers and sellers to customize their offerings for individual buyers, even as they produce for masses of customers.” [50]
Pine, 1993	“Mass customization means developing, producing, marketing, and delivering affordable goods with enough variety and customization that nearly everyone finds exactly what they want. The leading pioneers of Mass Customization providing tremendous variety, and individual customization, at prices comparable to standard goods and services – and often better.” [51]
Agrawal et al. 2001	“Mass Customization typically means selling highly individual products on a mass scale.” [52]
Piller & Stotko, 2002	“Mass customization means the production of goods and services for a (relatively) large market which exactly meet the needs of every individual customer with regard to certain product characteristics, the cost level demands that this can be done at total costs roughly corresponding to those of standard mass-produced goods.” [53]
Anderson, 2004	“Mass Customization is the ability to quickly and efficiently build-to-order customized products.” [54]
Blecker & Abdelkafi, 2006	“Mass customization aims to conciliate two business practices, which are mass and craft (single-piece) production. Mass production manufactures low cost products by reaping the benefits of standardization and scale economies. On the other hand, craft production assumes a high level of individualization since the products are tailored to specific customer requirements.” [55]
Piller, 2007	“The term mass customization denotes an offering that meets the demands of each individual customer, but that can still be produced with mass production efficiency.” [56]
Autoren	Definitionen von „Mass Individualization“ bzw. „Mass Personalization“
Lindemann, 2006	“Unter individualisierten Produkten werden Bündel aus Sachprodukten und Dienstleistungen verstanden, die sowohl Standard- als auch individuelle Komponenten enthalten.” [57]
Arora et al., 2008	“Personalization is when the firm decides, usually based on previously collected customer data, what marketing mix is suitable for the individual.” [58]
Tseng et al., 2010 Keskin et al. 2017	“Personalization is about achieving each customer satisfaction individually, whereas the customers are classified into different market segments, and customers within the same segment receive parameter-based customized products in customization.” [59]
Jiao, 2011 Uduwela et al., 2014	“In the case of MP the product design horizon has shifted from a physical product perspective to a total life cycle experience, allowing customers to co-construct the service experience to suit their context.” [59], [60]
Koren et al., 2015	“In the mass-individualization paradigm the customers are involved in the design process! This is a new challenge of this paradigm. ... In mass-customization even if some customers feel as if they are designing their product, the truth is that they are NOT involved in the design of their products. They are simply selecting an option.” [47]
Spallek & Krause, 2016	“Product individualization, i.e. the creation of individual product variants for each customer according to their individual needs, is carried out by the company and can go to different lengths, e.g., adaptation of one or more product attributes to individual needs.” [61]

Überwiegend wird bei den Definitionen von MC auf „effiziente Herstellung“ und „Preis“ eingegangen. So wird etwa erwähnt, dass der Preis variantenreicher Produkte ähnlich dem der

⁶ Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Mass Personalization als eine Unterkategorie von Mass Individualization betrachtet – dabei hat Mass Personalization die Eigenschaft, dass sie sich immer auf die Individualität einer Person bezieht.

Massenprodukte ist [51], [53], [55] oder dass die Effizienz der Herstellung identisch mit der Massenproduktion ist [56]. Der in Kontrast stehende Begriff MI fokussiert sich eher auf die kundenbezogene Entwicklungsaktivität und somit die Schaffung eines Mehrwerts für den Kunden sowie die passgenaue Anpassung an den Kunden [58]–[60]. Dabei wird auf den Faktor Preis bzw. Kosten kaum eingegangen. Daher ist der von Koren et al. [47] definierter Unterschied zwischen MC und MI noch ausbaufähig und konnotativ zu erweitern. Aus diesen Gründen ist es plausibel, dass bei MI der Individualisierungsgrad⁷ höher ist als bei MC. Jedoch ist der Grad der Individualisierung unspezifisch, was zur Folge hat, dass keine klare Abgrenzung zwischen MC und MI besteht. Duray et al. [62] betont den Mangel an konzeptionellen Grenzen für MC und erwähnt, dass das wesentliche Problem die nicht ausreichende und klare Definition des Begriffs MC ist. Daher soll durch eine mathematische Schreibweise die Definition des Begriffs entwickelt werden, um auf diese Weise eine spezifische Differenzierung zu ermöglichen (siehe Formel 1 und Formel 2).

Die erste Gleichung (1) steht für die Definition von MC, wobei „a“ und „b“ immer größer als „0“ sind sowie reelle Zahlen ($\mathbb{R}$) darstellen und so einen bestimmten Freiraum eingrenzen. Die Variable „x“ steht für die möglichen Varianten an Produkten. Innerhalb von MC sollten die Kosten (C) vergleichbar ($\approx$) mit der Massenproduktion (MP) sein. Die Formel (2) unterscheidet sich von der für MC durch die Menge an möglichen Varianten an Produkten sowie ihre Kosten. Dies wird daran deutlich, dass „x“ bei MC auf die natürlichen Zahlen ($\mathbb{N}$) beschränkt wird, während bei Formel (2) die Beschränkung auf rationale Zahlen ($\mathbb{Q}$) besteht. Die $\mathbb{N}$ stellen eine begrenztere Alternative zu $\mathbb{Q}$ dar, das heißt, bei MC existiert eine begrenzte Anzahl an Produktvarianten, während die Anzahl bei MI unendlich sein kann. Bezogen auf die Produktentwicklung kann hierfür das Beispiel angeführt werden, dass ein Kunde beim Kauf eines Schuhs nicht nur fest definierte Größen oder Farben auswählen kann (MC), sondern auch Größen oder Farben, die es so noch nicht gibt (MI). Dabei sollten die Kosten marktfähig und erschwinglich sein.

Formel 1: Mathematische Definition Mass Customization

$$C(MC) = \{x \in \mathbb{N} \mid a \leq x \leq b \wedge a, b > 0\} \approx C(MP)$$

Formel 2: Mathematische Definition Mass Individualization

$$C(MI) = \{x \in \mathbb{Q} \mid a \leq x \leq b \wedge a, b > 0\} \geq C(MP)$$

⁷ Eine Einordnung zum genauen Verständnis des Individualisierungsgrades ist Abbildung 50 zu entnehmen.

Für beide Formeln gilt: $a, b \in \mathbb{R}_0^+$ und $a < b$

Die MI-Definition beschreibt nicht, ob die Eigenschaft der Individualität für das ganze Produkt gelten soll oder nur für eine Komponente des gesamten Produktes. Werden Beispiele aus der Praxis im B2C-Markt betrachtet, ist zu erkennen, dass oft nur bestimmte Komponenten diese Art von Individualität anbieten. Bspw. stellt die Firma Adidas maßgeschneiderte Schuhe mittels additiver Fertigung her. Analog zur Definition können dabei nicht nur Schuhgrößen, wie zwischen 30 – 49, ausgewählt werden, sondern genau die passende Größe, welche bspw. 45,789 lauten kann. So ändert sich die Geometrie des Schuhs, jedoch bleibt sein Design stets gleich. Die Tochtergesellschaft von Mars (M&M's), bietet eine Mischform an, das heißt, sowohl MC als auch MI-Ansätze sind zu finden [63]. Dabei können vordefinierte Farben für die Schokolinsen ausgewählt werden (MC, siehe Abbildung 10), aber auch individuelle Bilder auf die Schokolinsen gedruckt werden (MI, siehe Abbildung 9). Wenn dieser Vorgang für einen Kunden wie ein Prozess aussieht, stecken dahinter grundlegende Unterschiede für den Entstehungsprozess. Bspw. kann beim Letztgenannten keine Vorbereitung für die Bestellung, im Gegensatz zur Auswahl von Farben, durchgeführt werden. Zudem ist es unwahrscheinlich, dass das Leistungsspektrum, Drucken von individuellen Bildern auf die Schokolinsen, Wiederholungen beinhaltet.

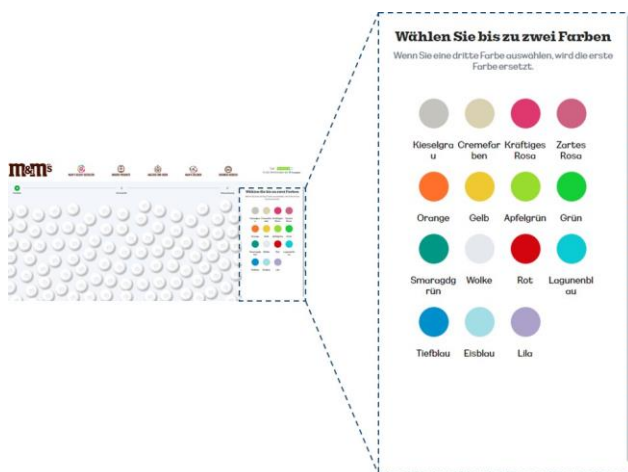


Abbildung 10: Vordefiniertes Auswahlmenü von Farben für Schokolinsen nach [63].

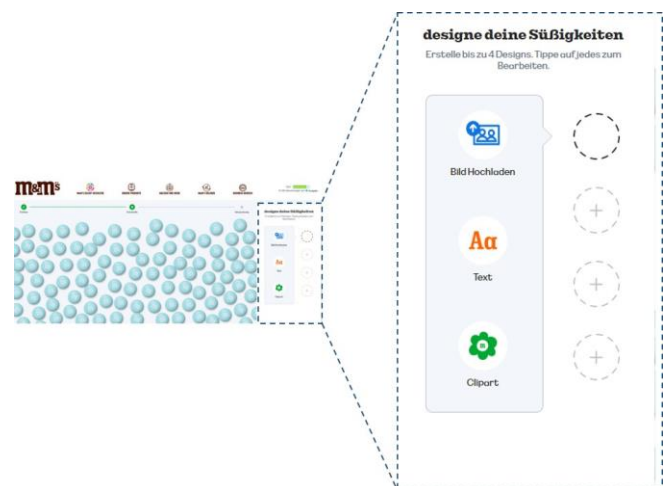


Abbildung 9: Designen der Schokolinsen mit individuellen Bildern oder Texten nach [63].

Wird das Praxisbeispiel von M&M's der MI-Definition gegenübergestellt, lassen sich deutliche Übereinstimmungen finden. Dies stellt somit eine Bestätigung für die prinzipielle Eignung der entwickelten Definitionen dar.

Ein anderer Ansatz zur Definition des Begriffs der Produktindividualisierung ist der nach Piller und Stotko [64], in dem das Ausmaß der Individualisierung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Kundenintegration steht. Gleichzeitig wird nach dem Ausmaß der Individualisierung in *soft customization* und *hard customization* untergliedert. Das Konzept kann so erläutert werden, dass das Ausmaß der Individualisierung umso höher ist, je früher die Integration des Kunden stattfindet. Mit dieser Definition kann jedoch keine produktspezifische Abgrenzung durchgeführt werden, da eine frühe Kundenintegration auch bei Massenprodukten möglich ist.

Mit der Definition einhergehend ist es essentiell, die Wesensmerkmale bzw. die typischen Eigenschaften von individualisierten Produkten zu kennen, um so eine klare Abgrenzung zu Serienprodukten herzustellen. Hierfür wurden diverse Quellen analysiert [57], [64]–[66], in Tabelle 2 zusammengeführt und systematisiert. Diese zeigt anhand von ausgewählten Kriterien die prinzipiellen und allgemeinen Hauptunterschiede zwischen Serienprodukten und individualisierten Produkten. Anzumerken ist, dass die Unterschiede je nach Anwendungsfall variieren können.

Tabelle 2. Unterschiede und Eigenschaften von Serienprodukten und individualisierten Produkten.

Kriterium	Serienprodukte	Individualisierte Produkte
Kundenbedürfnisse	Auf breiter Basis erfasst, allgemeine Nachfragebedürfnisse	Kundenspezifisch, kundensynchroner Entwicklungsprozess
Kundenintegration in der Produktentwicklung	Gering	Hoch
Anforderungsvariabilität	Gering	Hoch
Konstruktionsabsicherung	Möglich	Kaum möglich
Vorbereitungsgrad auf die potenziellen Kundenanfragen	Hoch	Gering
Leistungsgestaltung	Standardisierte Leistungskomponenten	Individualisierte Gestaltung
Produktstrukturplanung	Geringe Freiheitsgrade, hohe Vorbereitung	Hohe Freiheitsgrade, geringe Vorbereitung
Entwicklungskosten pro Stück	Gering	Hoch

Nachdem die Definition von MC und MI untersucht wurde, kann nun auf die Mikrosystemtechnik (MST) eingegangen werden, worauf in den darauffolgenden Kapiteln dann der Begriff „iMST“ definiert werden kann.

2.1.4 Mikrosystemtechnik

2.1.4.1 Grundlagen und Herstellung von Mikrosystemen

Die Erfindung des Halbleitertransistors im Jahr 1947 löste einen Paradigmenwechsel in der Miniaturisierung technischer Systeme aus [67]. Mit dem raschen Fortschritt in der Silizium-Halbleitertechnologie führte Kenji Uchino 1979 den Begriff "Mikro-Mechatronik" ein, um einen Anwendungsbereich von „piezoelektrischen Aktoren“ zu beschreiben, der 1983 in seinem Buch *Piezoelectric Actuators* veröffentlicht wurde [68]. Die Besonderheit und damit auch der Unterschied zur Mikroelektronik⁸ liegt darin, dass verschiedene Funktionen, Komponenten,

⁸ Für eine detaillierte Unterscheidung zwischen Mikroelektronik und MST siehe [69], S. 13

Materialien und Technologien in einem System miteinander verbunden werden [70]. Dabei ist das Ziel, diese Integration möglichst platzsparend und miniaturisiert auf einem Substrat zu realisieren [71]. Folglich sind die Vorteile von Mikrosystemen u. a., dass sie ggü. anderen Bauteilen relativ klein sind und Gewicht einsparen. Schwesinger et al. [70] definieren ein Mikrosystem als „... ein sehr kleines Bauteil, das im besten Fall Sensoren, elektronische Verarbeitung der Daten und eine physikalische Aktion (Aktorik) miteinander verbindet.“⁹ Wie klein das Mikrosystem sein sollte, wird nicht genau spezifiziert. Eine grobe Einschätzung von Schwesinger et al. [70] ist, dass es nicht größer als eine Geldmünze ist. Jedoch kann ein Mikrosystem durch die notwendige elektrische Kontaktierung größer sein [70]. Die Mikrosystemtechnik (MST) beschäftigt sich mit der Entwicklung und Herstellung von Mikrosystemen. Ein bekanntes Mikrosystem ist zum Beispiel der Airbag-Sensor im Automobil. Dieser ermittelt das Ausmaß einer physikalischen Größe, in diesem Fall die negative Beschleunigung, mit einem Sensor und gibt dabei das Signal zum Auslösen des Airbags. Der Sensor kann z.B. ein Feder-Masse-System mit mikromechanischen Balken beinhalten, die als Elektroden dienen. Beim Abbremsen eines Automobils verändert sich der Elektrodenabstand. Somit entsteht eine Kapazitätsänderung, die von der Ausleseelektronik erfasst und in einen Messwert umgerechnet werden kann. Das Besondere ist, dass durch die mikromechanische Struktur, also durch die sehr geringe Größe, die bewegliche Kammstruktur sich nur bei plötzlichen Bremsen durch einen Auffahrunfall bewegt, nicht aber bei einer normalen oder starken Bremsung. Wie aus diesem Beispiel abgeleitet werden kann, erfordert die MST diverse Kompetenzfelder und branchenübergreifende Schlüsseltechnologien, bspw. die Mikromechanik und Mikroelektronik. Weitere typische Bereiche sind die Optik und die Fluidik. Darüber hinaus spielt zudem die Informatik eine eminente Rolle, die bspw. für die Verarbeitung und Visualisierung der Messwerte essentiell ist und somit als wichtige Grundlage für Cyber-Physische Systeme (CPS)¹⁰ dient. Die Verwendung von Mikrosystemen und das Zusammenspiel in CPS zeigt die Abbildung 11. Dieser kann gleichzeitig die Grundstruktur eines Mikrosystems entnommen werden.

⁹ Für weitere Definitionen eines Mikrosystems siehe bspw. auch die DIN32564, S. 4.

¹⁰ CPS zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine Verknüpfung von realen physischen Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden virtuellen Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze herstellen [72].

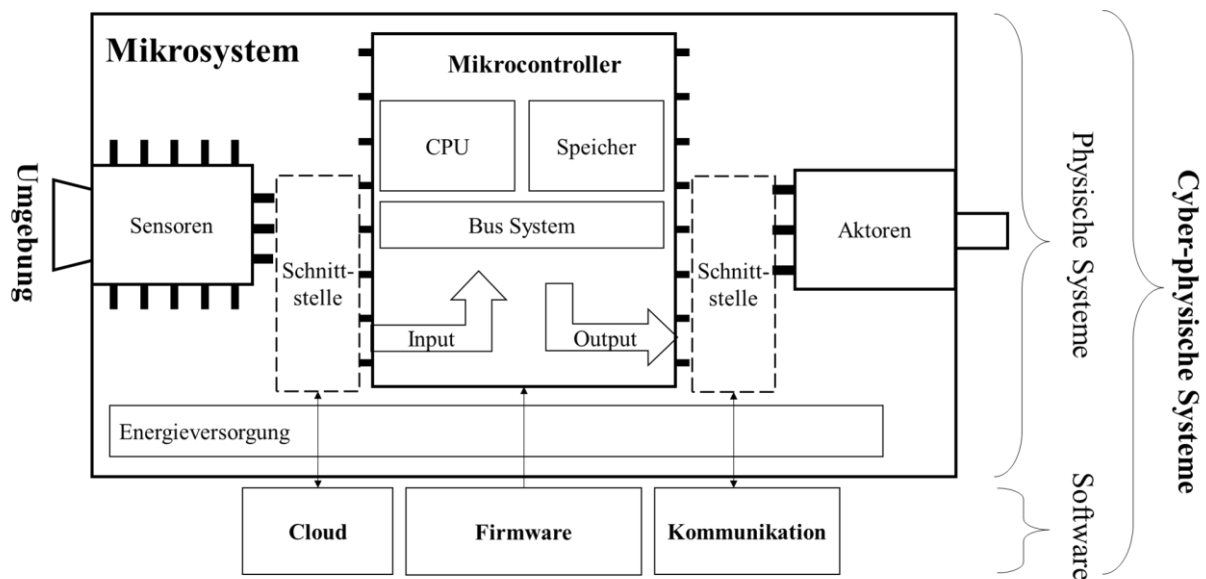


Abbildung 11: Struktur des Mikrosystems.

Die MST beschäftigt sich mit der Entwicklung, Herstellung und Applikation von Mikrosystemen [69]. Für die Herstellung eines Mikrosystems ist es wichtig, seinen grundlegenden Aufbau zu kennen. Abbildung 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Mikrosystems. Dabei handelt es sich beispielhaft um eine integrierte Schaltung mit hybrider Integration. Bei der hybriden Integration werden einzelne Komponenten separat mit unterschiedlichen Technologien hergestellt und auf die Platine (Substrat) platziert und elektrisch kontaktiert [73]. Des Weiteren kommt aus dem Aufbau des Mikrosystems der Systemcharakter zum Ausdruck, da hier mehrere Komponenten miteinander verbunden sind und zusammen eine Gesamtfunktion bilden. Daher spielt die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) eine entscheidende Rolle in der MST und ist ein wichtiger Treiber zur Miniaturisierung [74]. Die AVT hat nicht nur die Funktion zur Fixierung und Kontaktierung von mechanischen und elektrischen Bauteilen, sondern auch zur Entwärmung und zum Schutz vor der Umgebung [74]. Somit ist sie u. a. verantwortlich für Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Systemperformance, Gewicht, wirtschaftliche Fertigung und Kosten des Gesamtsystems [74], [75].

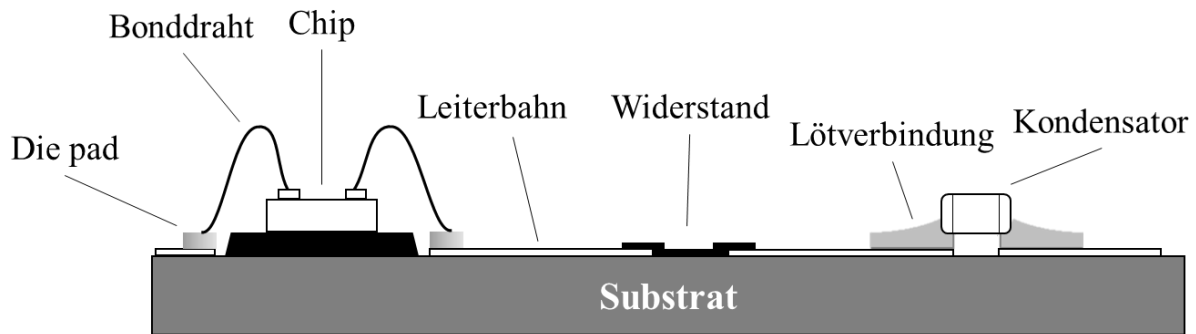


Abbildung 12: Grundlegendes Schema eines Mikrosystems nach [74].

Wie bei der hybriden Integration deutlich wird, werden innerhalb eines Systems unterschiedliche Herstellungsverfahren genutzt. Folglich spielt in der MST die Herstellungstechnologie eine zentrale Rolle, da die Herstellung von Mikrosystemen sehr technologiegetrieben ist [21]. Zusätzlich kommt hinzu, dass bei der Herstellung von Mikrosystemen eine Vielzahl an verschiedenen Fertigungsverfahren zur Verfügung steht [70]. Folglich muss aufgrund der großen Anzahl an Fertigungstechnologien ein Entwickler die passende Technologie oder die Kombination mehrerer Technologien identifizieren und auswählen. Hier unterscheidet sich die MST von anderen Bereichen der Technik [66]. Abbildung 13 zeigt die üblichen und weit verbreiteten Fertigungsverfahren, welche in der Literatur und Lehre überwiegend zur MST zu finden sind [21], [69], [75]–[77]. Dabei wurden diese - im Rahmen dieser Arbeit - den sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN8580 zugeordnet.

Fertigungsverfahren der MST nach Hauptgruppen der DIN8580					
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	Stoffeigenschaft ändern
• Mikrospritzgießen • Feingießen • Drucktechnik (Additive Fertigung)	• Heißprägen • Laserbiegen	• UP-Fräsen • UP-Drehen • Mikro-Bohren • Mikro-Schleifen • Ätzen	• Mehrkomponenten-spritzguss • Löten • Kleben • Laserstrahlschweißen • Bonden • Schnappverbindung	• Galvanik • Außenstromlose Metallisierung • Aufdampfen	• Mikrohäärten • Mikrolegieren • Laserstrukturierung
Lithographie, Galvanik und Abformung (LIGA)					
Molded Interconnect Device (MID)			Molded Interconnect Device (MID)		
Dickschichttechnik				Dickschichttechnik	
Dünnschichttechnik		Dünnschichttechnik		Dünnschichttechnik	

Abbildung 13: Kategorisierung der Fertigungsverfahren von Mikrosystemen in den Hauptgruppen der DIN8580.

Die Fertigungsverfahren, welche zur Herstellung eines Mikrosystems einen ganzheitlichen Prozess erfordern, also eine Prozesskette, die aus mehreren Verfahren besteht, die in der Regel zu unterschiedlichen Verfahrensgruppen gehören, sind in Abbildung 13 dargestellt. Das heißt,

für die Herstellung von Mikrosystemen werden Prozessketten benötigt, die bereits in der Entwicklungsphase berücksichtigt werden müssen. Die genannten Fertigungsverfahren eignen sich grundsätzlich nur für mittlere bis große Losgrößen [21]. Gründe für die hohe Vielfalt an möglichen Fertigungsverfahren sind die Größe der Bauteile und die Materialien, die in der MST angewandt werden. Einige typische Materialien, die in der MST eingesetzt werden, sind [69], [70], [76]:

- **Metalle:** Etwa Gold, Silber oder Kupfer, um elektrisch leitfähige Bauteile herzustellen.
- **Keramiken:** Etwa Aluminiumoxid oder Zirkonoxid, um Bauteile mit hoher Härte und Chemikalienbeständigkeit herzustellen.
- **Polymere:** Etwa Polyimide oder Epoxide, um Bauteile mit geringer Dichte kostengünstig herzustellen.
- **Gläser:** Etwa Siliziumdioxid oder Borosilikatglas, um Bauteile mit hoher Transparenz und Chemikalienbeständigkeit herzustellen.
- **Halbleiter:** Etwa Silizium oder Galliumarsenid, um Bauteile mit elektrisch leitfähigen und halbleitenden Eigenschaften herzustellen. Halbleiter, vor allem Silizium, werden überwiegend als Substratmaterial (Basismaterial) verwendet, auf die dann andere Materialien aufgebracht werden.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Wahl der Materialien für ein Mikrosystem von verschiedenen Faktoren abhängen kann, wie den Anforderungen an die mechanischen, elektrischen oder thermischen Eigenschaften [78]. Es ist daher von großer Relevanz, geeignete Materialien für jede spezifische Anwendung sorgfältig auszuwählen.

Die Herstellungsverfahren in der MST sind in der Regel für die Massenproduktion geeignet. Jedoch gibt es Technologien und Fertigungsverfahren, die kleine Losgrößen zu marktfähigen Preisen herstellen können. Da das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung und Herstellung von iMST ist, werden diese Technologien im folgenden Unterkapitel genauer betrachtet und erläutert. Die Gründe, weshalb diese Technologien und Fertigungsverfahren für die Individualisierung geeignet sind, werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

2.1.4.2 Molded Interconnect Devices

Räumliche Schaltungsträger *Molded Interconnect Devices* bzw. *Mechatronic Intergrated Devices*, kurz MID)¹¹ werden als eine Technologie dargestellt, die insbesondere dazu verwendet wird, elektrische Leiterbahnen und Komponenten sowie Funktionalitäten, z.B. optische, fluidische und thermische, direkt auf einem Kunststoffträger zu integrieren [80]. Dabei ist anzumerken, dass die MID-Technologie aus einer Vielzahl an Fertigungsverfahren bzw. Technologien bestehen kann und somit eine Prozesskette bildet. Es wird oft der Begriff „3D-MID“ verwendet, da die MID-Bauteile oft eine 3D-Anordnung haben und sich u. a. dadurch deutlich von den konventionellen Leiterplatten (PCB bzw. *Printed Circuit Board*) unterscheiden. Weiterhin ermöglicht die MID-Technologie eine höhere Packungsdichte sowie eine vielfältigere und flexiblere Anwendungsmöglichkeit aufgrund der möglichen dreidimensionalen Gestaltung [81]. Hinsichtlich der Individualisierung bietet die MID-Technologie folgende Vorteile:

- vielfältige Freiheitsgrade beim Design eines Bauteils
- Masken oder Layout-spezifische Werkzeuge können je nach Technologieauswahl vermieden werden.
- Hohes Maß an Flexibilität bei der Fertigung des Grundkörpers
- Potenzial zur Produktinnovation aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten zur Funktionsintegration

Um diese Vorteile für die Individualisierung genauer nachvollziehen zu können, wird in diesem Kapitel auf die technischen Grundlagen bzw. die Technologien genauer eingegangen, wodurch vor allem die potenzielle Eignung bestimmter Technologien für iMST deutlich wird.

Den grundlegenden Herstellungsprozess von MID, welcher auch als MID-Referenzprozess von diversen Autoren deklariert wird, zeigt die Abbildung 14 [80], [82], [83]. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die ersten drei Schritte bereits als MID-Herstellungsverfahren beschrieben werden können. Dies bedeutet, dass ein unbestücktes Bauteil bereits ein MID-Bauteil darstellt.

¹¹ Im Deutschen wird auch oft der Begriff „spritzgegossene Schaltungsträger“ verwendet. Da ein MID-Bauteil nicht zwingend ein Spritzguss-Bauteil ist, wurde der Begriff „Mechatronic Interconnect Devices“ eingeführt [79].

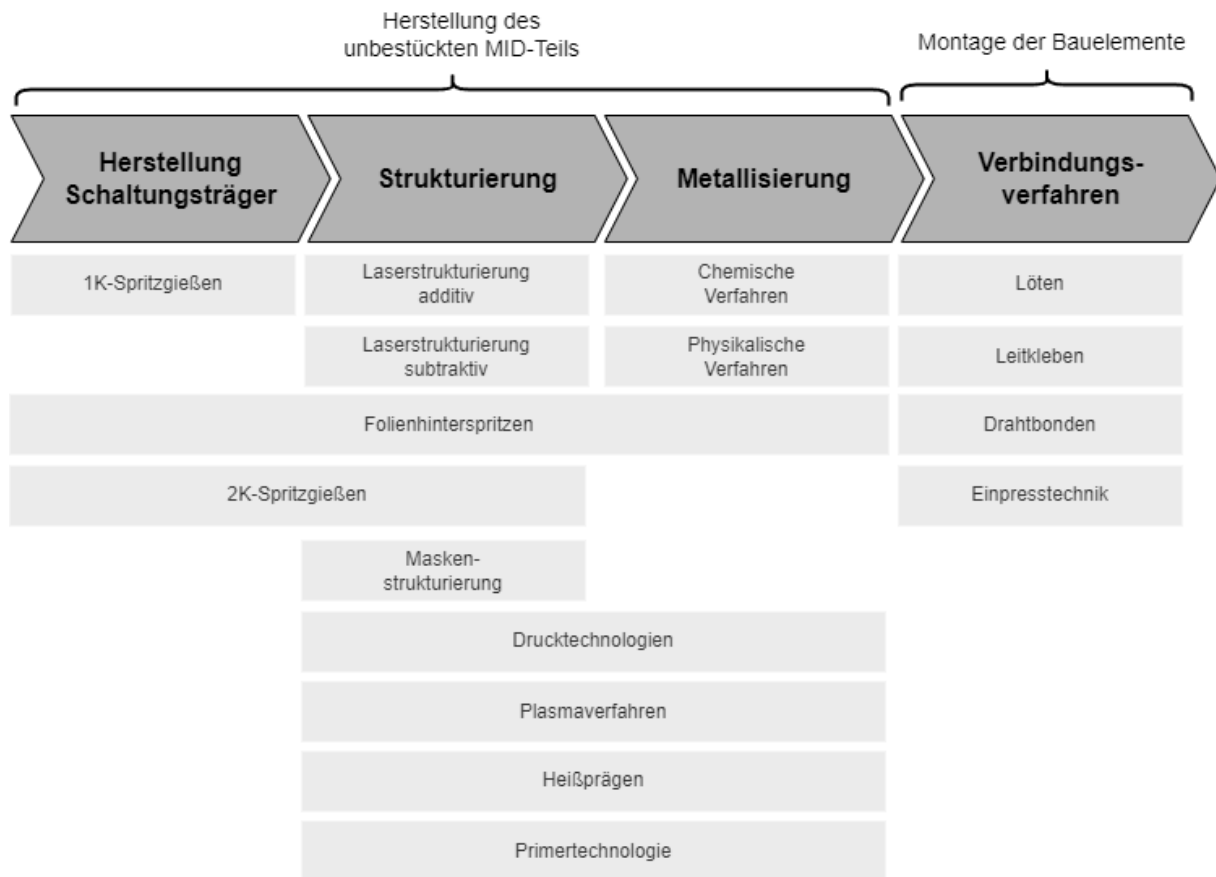


Abbildung 14: Referenzprozess für MID nach [79].

Im Folgenden wird auf die MID-Herstellungsverfahren eingegangen, wobei die möglichen Verbindungstechniken in diesem Kapitel nicht erläutert werden, da ein MID-Bauteil auch ohne die Bestückung als ein MID definiert werden kann.

Der erste Schritt bei der Herstellung von elektronischen Bauteilen ist die Fertigung des Schaltungsträgers (Substrats) aus Kunststoffen. Hierfür wird das Material üblicherweise in eine Form eingespritzt, die der gewünschten Geometrie entspricht. Hierfür wird oft das **Einkomponentenspritzgießen** (auch als Mono-Injektion oder 1K-Spritzgießen bezeichnet) ausgewählt, welches ein Fertigungsverfahren ist, bei dem ein Kunststoffmaterial, meist im granulierten Zustand vorliegend, in die gewünschte Form gegossen wird. Durch die von einer Schnecke erzeugten Scherkräfte und durch zusätzlichen Wärmeeintrag wird das Granulat aufgeschmolzen und in die Kavität eingespritzt. In der Kavität kühlt die Schmelze ab und erstarrt, wodurch das Bauteil seine endgültige Form annimmt. Der Unterschied zum **Zweikomponentenspritzgießen** (2K-Spritzgießen) liegt darin, dass zwei verschiedene Kunststoffe verwendet werden, die nacheinander in die Form eingespritzt werden. Einer der Kunststoffe kann dabei als metallisierbare Komponente verwendet werden, während der andere

als nicht metallisierbare Komponente dienen kann. Daher kann das 2K-Spritzgießen für die Strukturierung verwendet werden. Bei der Strukturierung werden die elektrisch leitfähigen Bereiche auf der Oberfläche des MID-Bauteils erzeugt. Ein weit verbreitetes Verfahren zur Strukturierung sind die **laserbasierten Verfahren**. Diese werden in voll-subtraktive, semi-additive und voll-additive Verfahren eingeteilt [84], was in Abbildung 15 mit der jeweiligen Prozesskette dargestellt ist. Beim voll subtraktiven Verfahren wird ein Laserstrahl verwendet, um Material von der Oberfläche abzutragen und so die gewünschte Struktur zu erzeugen. Zuvor wurde das Bauteil komplett mit leitfähigen Materialien beschichtet, meistens einer Schichtfolge Kupfer-Nickel-Gold (Cu/Ni/Au). Bei semi-additiven Verfahren besteht der Unterschied zu voll-subtraktiven darin, dass beim Schichtaufbau zuerst nur eine Kupferschicht abgeschieden wird, welche außenstromlos chemisch oder durch sog. *physical vapour deposition* (PVD) erzeugt werden kann, dann folgt die Laserablation, Reinigung und die (Cu/Ni/Au) Nachverstärkung. Das voll-additive Verfahren (Laserdirektstrukturierungsverfahren (LDS-Verfahren)) unterscheidet sich prinzipiell von den zu letzt genannten Verfahren. Hier werden Thermoplaste mit einer laseraktivierbaren Komponente gefüllt¹², die sich zunächst passiv verhält. Das heißt, eine Metallabscheidung an der Oberfläche erfolgt nicht von alleine. Erst durch eine Laserstrukturierung werden die Additive aktiviert. Nach einer Reinigung kann anschließend die außenstromlose Metallisierung erfolgen.

¹² Dabei handelt es sich meistens um anorganische Kupferoxide (sog. Additive).

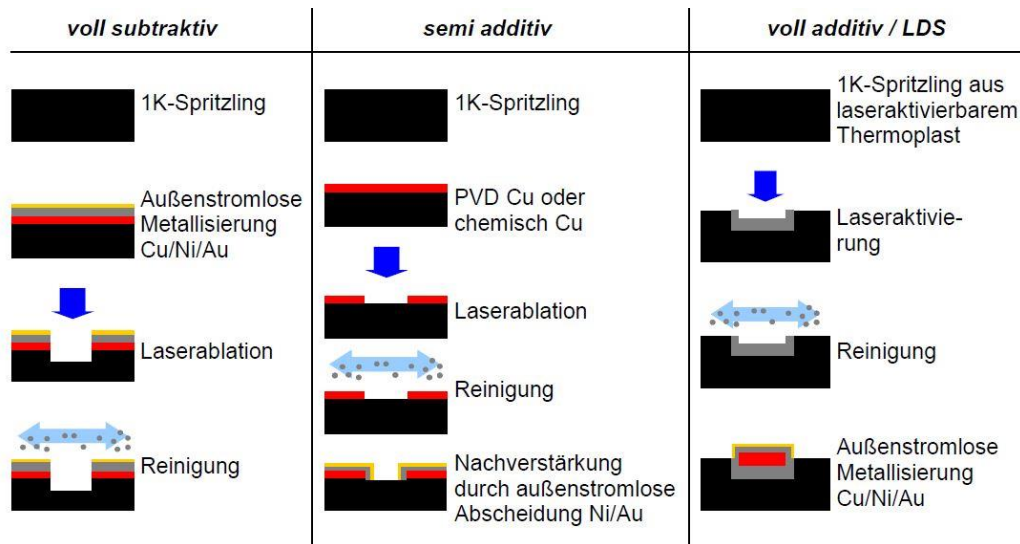


Abbildung 15: Prozessschritte der Laserstrukturierungsverfahren nach [74].

Beim Verfahren des **Folienhinterspritzens** wird eine Folie als mechanisch flexibler Schaltungsträger in die Kavität eines Kunststoffspritzgusswerkzeugs eingesetzt und beim Füllen der Kavität mit dem Kunststoff verbunden. Nach dem Erstarren des Kunststoffmaterials bleibt die Folie mit elektrischen Leiterbahnen auf der Kunststoffoberfläche zurück [85]. Bei chemisch ähnlichen Werkstoffen ist die Verbindung zwischen Folie und Kunststoff in der Regel gegeben [85]. Die **Maskenstrukturierung** bzw. ein Maskenbelichtungsverfahren wird überwiegend bei der Herstellung von konventionellen Leiterplatten verwendet. Dabei wird auf das gesamte Substrat Kupfer und Photoresist aufgebracht, die dann mit einer Maske, welche die Struktur der Schaltungen bzw. Leiterbahnen enthält, überdeckt werden. Anschließend wird der Photoresist mithilfe von UV-Licht belichtet und entwickelt, wodurch nach einem Ätzprozess die Schaltungen und Leiterbahnen auf das Substrat übertragen werden [80]. Die **Drucktechniken** für MID beinhalten Aerosol-Jet und Inkjet-Druck. Beide Verfahren weisen eine kurze Prozesskette auf und sind verglichen zu anderen Verfahren sehr schnell [86]. Darüber hinaus sind sie flexibel einsetzbar und benötigen keine Layout-spezifischen Werkzeuge oder Masken, wodurch sie kostengünstig sind. Folglich hat die Drucktechnik essentielle Eigenschaften, die für eine Anwendung im Bereich der Individualisierung sprechen.¹³ Der Druckprozess läuft so ab, dass die Tinte auf den spritzgegossenen Kunststoffkörper gedruckt und anschließend die aufgetragene Tinte gesintert wird [80]. Beim Aerosol-Jet-Verfahren wird von einer pneumatischen Zerstäubung gesprochen, da die Tinte pneumatisch mit einem inerten Trägergas vermischt und auf das Substrat aufgetragen wird. Anders als beim Aerosol-Jet wird beim Inkjet-Druck die Flüssigkeit nicht „vernebelt“, sondern

¹³ Für ein Beispiel einer individualisierten Anwendung mit der Drucktechnik siehe [87].

es werden einzelne Tropfen erzeugt und dann auf das Substrat aufgetragen [88]. Dabei wird häufig die Piezo-Technologie zur Erzeugung der Tropfen verwendet [88]. Da der Abstand zwischen Substrat und Düse ca. 2 mm betragen muss, ist die 3D-Gestaltungsfreiheit im Vergleich zum Aerosol-Jet stark eingeschränkt. Beim **Plasmaverfahren**, welches ebenfalls der Drucktechnik zugeordnet werden kann, handelt es sich um eine additive Metallisierung des Substrats. Dabei wird das zur Beschichtung verwendete Pulver, bspw. Kupferpartikel, über den Plasmastrahl geschmolzen und auf das Substrat aufgebracht.¹⁴ Im Gegensatz zum Plasmaverfahren ist das **Heißprägen** ein bereits etabliertes und weit verbreitetes Verfahren in der MID-Technik. Es handelt sich hierbei um ein Verfahren, bei dem thermoplastischer Kunststoff (Substrat) mittels eines Prägestempels unter Wärme und Druck strukturiert wird. Zwischen Prägestempel und Substrat befindet sich das Leiterbild auf einer Folie (Prägefolie, siehe Abbildung 16). Die Struktur des Leiterbildes wird durch den Prägestempel vorgegeben. Das Verfahren hat die Vorteile, dass viele thermoplastische Kunststoffe verwendet werden können, das Leiterbild mit unterschiedlich dicken Metallschichten hergestellt werden kann und keine chemische oder galvanische Metallisierung erforderlich ist. Zudem sind die Investitionskosten relativ niedrig und die Prozessdauer relativ kurz [89]. Konträr zur Individualisierung hat das Heißprägen die Nachteile der räumlichen Einschränkung und der geringen Flexibilität aufgrund der Verwendung eines Prägestempels [89].

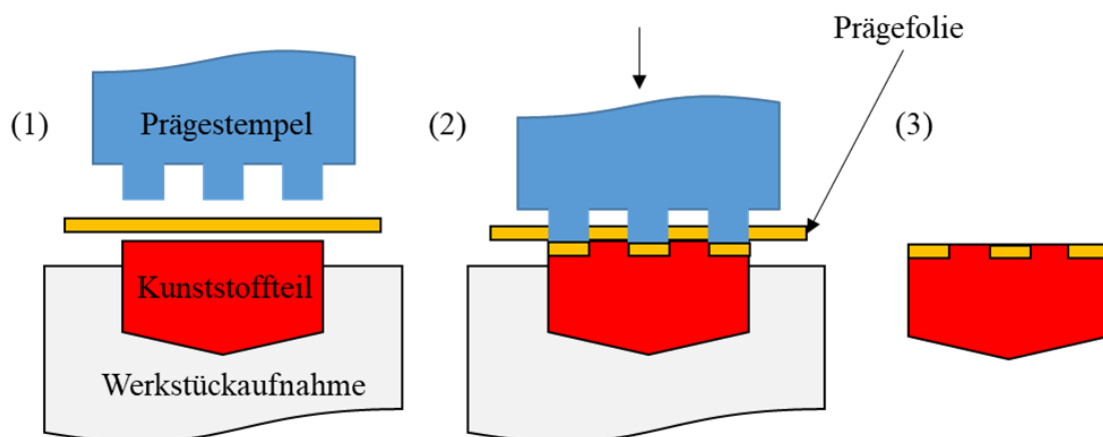


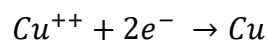
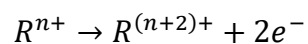
Abbildung 16: Heißprägen in der MID-Technik nach [74].

Die **Primertechnologie** in der MID-Technik beinhaltet, dass auf das Substrat ein Primer (Haftmittel) aufgetragen wird, um anschließend die Haftung der Leiterschicht auf dem Kunststoffträger zu gewährleisten. Die „Primer-Struktur“ kann durch den Siebdruck oder

¹⁴ Das Plasmaverfahren befindet sich noch im Forschungsstadium und wird nicht genauer betrachtet. Für eine genaue Beschreibung siehe [80], S. 96 - 100.

Tampondruck erfolgen [84]. Dieses Verfahren ist nicht sehr flexibel und ermöglicht keine Anpassung der Schaltungen während des Fertigungsprozesses, da entweder ein strukturiertes Sieb oder (beim Tampondruck) ein Klischee benötigt wird [89], [90]. Die oben dargestellten Verfahren können für mehrere Zwecke eingesetzt werden, wie etwa das Folienhinterspritzen für die Herstellung des Substrats, die Strukturierung und die Metallisierung. Zudem gibt es chemische Verfahren, die ausschließlich für die Metallisierung eingesetzt werden. In der Praxis der MID-Technik wird hauptsächlich die **außenstromlose chemische Metallabscheidung** verwendet [91]. Zur Verbesserung der Metallisierungseigenschaften, etwa der Stromfähigkeit, kann die vorerst außenstromlos chemisch aufgebrachte Schicht galvanisch verstärkt werden. Bei der außenstromlosen Metallisierung wird keine äußere Spannungsquelle benötigt. Hierbei erfolgt der zur Abscheidung erforderliche Elektronentransfer zwischen Reduktionsmittel und Metallion. In der Reaktion gibt das Reduktionsmittel Elektronen ab, wodurch es oxidiert wird, während sich auf der Oberfläche des Substrats durch Reduktion der Metallionen eine metallische Schicht bildet. Das Substrat, das Additive enthält, die durch Laserstrahlung aktiviert werden, bildet in den aktivierten Bereichen katalytische Keime. Diese führen dazu, dass die Elektronen vom Reduktionsmittel auf die Oberfläche des Substrats übergehen und zur Reduktion der Metallionen, also Kationen, zur Verfügung stehen.¹⁵ Dieser Prozess kann vereinfacht über die beispielhafte Reaktionsgleichung (3) für Kupfer(II)-Ionen (Cu^{++}) und ein Reduktionsmittel (R) dargestellt werden. Dabei wird durch die Reduktion von Cu^{++} zu atomarem Cu eine Kupferschicht auf dem Substrat abgeschieden.

Formel 3: Reaktionsgleichung der außenstromlosen chemischen Metallisierung am Beispiel von Kupfer.



Die laserinduzierte Aktivierung der Additive im Substrat erfolgt in der Regel mit einem Festkörperlaser (Nd:YAG-Laser, d.h. Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) [96]. Für die anschließende Metallisierung werden in der Praxis häufig die Metalle Kupfer, Nickel und Gold verwendet, die nacheinander auf dem Substrat abgeschieden werden. Dieses Verfahren ist hinsichtlich der Individualisierung vorteilhaft, da kaum Gestaltungsrestriktionen vorhanden sind und der vorgelagerte Prozess (LDS-Verfahren) eine hohe Flexibilität ermöglicht und als ein digitales Verfahren deklariert werden kann [97], [98].

¹⁵ Siehe hierfür die Patente [92] und [93] oder auch die Veröffentlichungen [94], [95].

Aufgrund der Technologievielfalt ist es wichtig und hilfreich, eine Charakterisierung und Bewertung der einzelnen Verfahren durchzuführen. Deshalb hat bspw. Franke [80] eine Gegenüberstellung der wesentlichen MID-Strukturierungsverfahren anhand ausgewählter Eigenschaften tabellarisch aufgestellt (siehe Tabelle 3). Diese Tabelle wurde insbesondere für den Zweck erstellt, dass für jede Anforderung ein geeignetes Verfahren ausgewählt werden kann. Diese Tabelle ist auch ein Beispiel dafür, wie wichtig die Technologieauswahl für die Herstellung von Mikrosystemen ist.¹⁶ Zudem erhöht sich die Technologievielfalt mit der Zeit, sodass in Tabelle 3 nicht alle aktuell verfügbaren Technologien berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Gegenüberstellung MID-Strukturierungsverfahren nach [79].

	min. Leiterbahnbr eite (µm)	3D- Gestaltungs- freiheit	Layout- änderung	Material- vielfalt	Stückzahl	Material- kosten	Werkzeug- kosten	Investition
LPKF-LDS®	100	hoch	einfach	mittel	hoch	hoch	sehr gering	mittel - hoch
ADDIMID	keine Angabe	hoch	einfach	hoch	hoch	mittel	sehr gering	mittel - hoch
MIPTec	50	hoch	einfach	sehr gering	hoch	hoch	sehr gering	mittel - hoch
Resist	30	mittel	mäßig	sehr hoch	hoch	gering	gering - mittel	mittel
Aerosol-Jet®	10	hoch	einfach	sehr hoch	gering	mittel	mittel	mittel - hoch
Inkjet 50	50	gering	einfach	sehr hoch	hoch	mittel	sehr gering	hoch
2K	150	sehr hoch	sehr hoch	gering	sehr hoch	gering - mittel	sehr hoch	sehr hoch
Folienhinterspritzen	100	mittel	einfach	sehr hoch	hoch	gering - mittel	hoch	sehr hoch
Heißprägen	300	gering	mäßig	sehr hoch	hoch	gering	mittel	gering
Flamecon®	keine Angabe	mittel	einfach	hoch	mittel	gering	sehr gering	mittel - hoch
Plasmadust®	200*	mittel	einfach	hoch	mittel	gering	sehr gering	mittel - hoch
Primer	100	hoch	einfach	sehr hoch	mittel	gering	mittel	mittel - hoch
* maskiert. Ohne Maske	mind. 2.000							

Über diese typischen MID-Fertigungsverfahren hinaus gibt es zusätzlich die additive Fertigung, welche sich mit der MID-Technik kombinieren lässt und für die Individualisierung geeignet ist [80], [99]. Die additive Fertigungsverfahren werden als digitale Verfahren bezeichnet [100]. Aufgrund der Vorteile bei der Herstellung von individualisierten Produkten werden daher im nächsten Kapitel ausgewählte digitale Herstellungstechnologien vorgestellt.

2.1.4.3 Digitale Fertigungsverfahren

Der Begriff, „digitale Fertigung“ ist aus dem englischen Begriff *Digital Manufacturing* bzw. *Rapid Manufacturing* abgeleitet, wobei viele weitere Termini teilweise als Synonym verwendet werden, bspw. generative Verfahren, *Freeform Fabrication*, *Tool-less Fabrication*, *eManufacturing*, *Additive Manufacturing*, *Direct Manufacturing*, *Digital Manufacturing* und 3-D-Druck [100], [101]. Zusätzlich gibt es u. a. die Begriffe *Rapid Tooling*, *Direct Tooling* und

¹⁶ Eine weitere Gegenüberstellung von Mikrofertigungsverfahren zeigen bspw. Schwesinger et al. [70], S. 460.

Rapid Prototyping, die in diesem Kontext ebenfalls verwendet werden, wobei diese sich einfacher unterscheiden lassen. Eine Kategorisierung der unterschiedlichen Begriffen führt Gebhardt [100] aus (siehe Abbildung 17).¹⁷ Anstatt „generative Fertigungsverfahren“ kann auch „additive Fertigungsverfahren“ als ein technologischer Oberbegriff verwendet werden [104]. Die generellen Eigenschaften dieser Verfahren sind [104]:

- Produkte können direkt aus einer CAD-Datei und ohne den Einsatz von Werkzeugen erzeugt werden.
- Die Materialeigenschaften verändern sich während des Bauprozesses.
- Die Produkte können in jeder beliebigen Orientierung aufgebaut und bearbeitet werden.

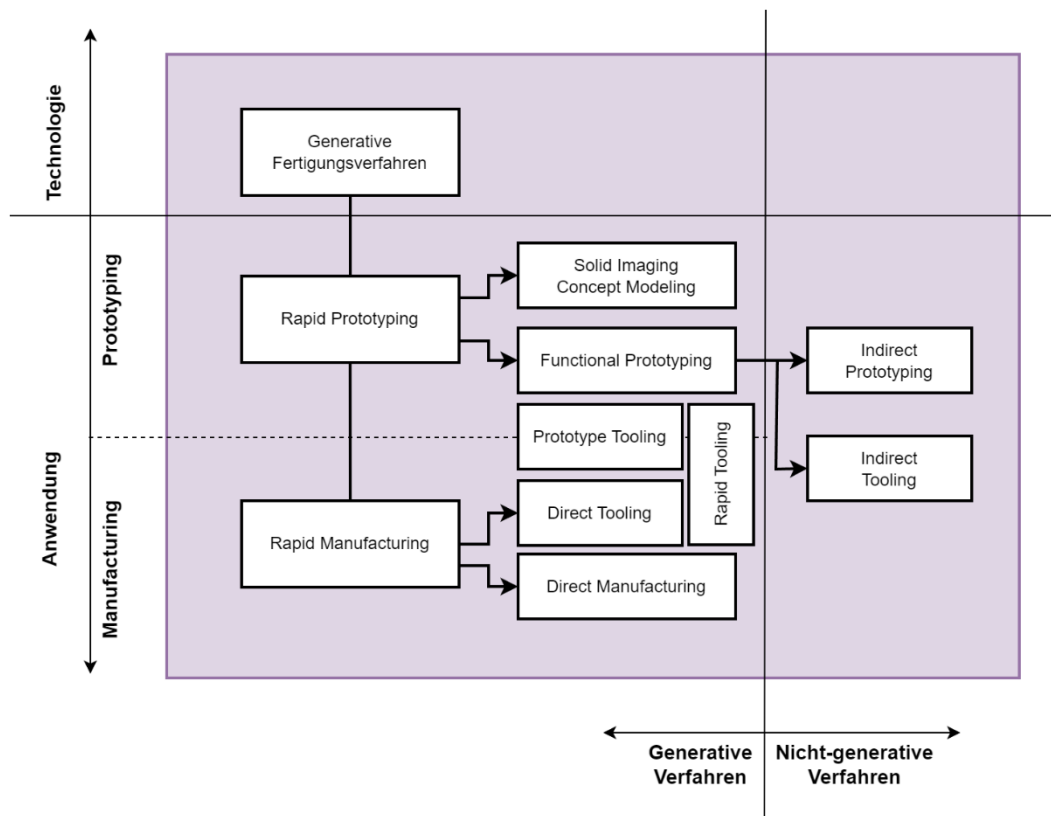


Abbildung 17: Kategorisierung der Begriffe innerhalb der digitalen Fertigung nach [99].

Dass das Wort „direkt“ aus der ersten Eigenschaft mit Vorsicht zu betrachten ist, zeigen Kumke et al. [105] auf (Abbildung 18). Hierbei wird deutlich, dass grundsätzlich weitere Schritte nach der CAD-Erzeugung benötigt werden. Da einige dieser Schritte (2 und 3) einfach und schnell durchgeführt werden können sowie teilweise bereits automatisiert wurden, zeichnet sich dieses

¹⁷ Weitere Unterscheidungen finden sich im VDI3405 [102], indem die additive Fertigung in Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) und Direct Manufacturing (DM) untergliedert wird, und DIN EN ISO 17296-2, 2016 [103].

Verfahren im Vergleich zu konventionelleren Verfahren hinsichtlich Entwicklungszeit und Flexibilität aus. Als Entwickler wird dafür grundsätzlich nur ein CAD-Tool verwendet.

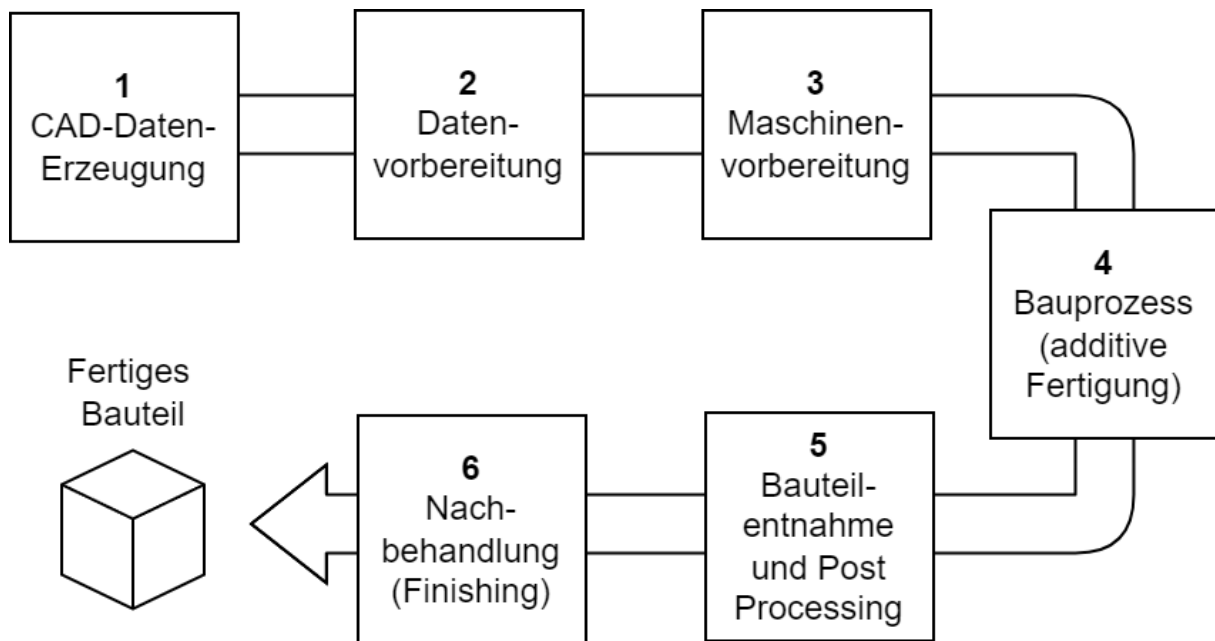


Abbildung 18: Prozessschritte für die Herstellung von additiv gefertigten Bauteilen nach [103].

Folglich kann vereinfacht gesagt werden, dass digitale Fertigungsverfahren über einen geeigneten Prozess die Übersetzung von CAD-Dateien in physische Komponenten gewährleisten. Mit dieser Definition lassen sich Verfahren aus der MID-Technik als digitale Fertigungsverfahren einordnen, etwa die Laserdirektstrukturierung (LDS), bei der ein Bauteil im CAD konstruiert wird und die Laseranlage die entworfenen Strukturen realisiert (siehe Kapitel 2.1.4.2). Aus den oben genannten Eigenschaften wird zudem ersichtlich, weshalb die digitalen Fertigungsverfahren für individualisierte Anwendungen geeignet sind:

- Geringer Initialaufwand
- Wirtschaftliche Herstellung kleiner Losgrößen
- Flexibilität

Da ein Ziel der vorliegenden Arbeit die Unterstützung der Herstellung von iMST ist, werden in diesem Kapitel lediglich die digitalen Fertigungsverfahren erwähnt, die sich mit der MID-Technik in eine Prozesskette besonders gut integrieren lassen. Diese sind *Fused Deposition Modeling* (FDM)¹⁸, selektives Lasersintern (SLS), *MultJet-Modeling* (MJM), *Digital Light Processing* (DLP) und Stereolithographie (SLA) [80], [106]. Tabelle 4 soll eine kurze

¹⁸ Auch bekannt als *fused filament fabrication* (FFF)

Erläuterung des Funktionsprinzips sowie der Vorteile und Nachteile der genannten Verfahren geben [104], [107]–[110].

Tabelle 4. Übersicht über die Verfahren der generativen Fertigung nach [104], [107]–[110].

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
<i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	Ein thermoplastisches Filament wird durch eine Düse erhitzt als Schicht bzw. Schmelze aufgetragen, die dann erkaltet und auf die nächste Schicht aufgetragen wird.	- Kosteneffizient - Einfache Handhabung - Breite Materialauswahl	- Geringere Oberflächenqualität - Geringere Präzision - Längere Fertigungszeiten
Selektives Lasersintern (SLS)	Ein Laser erhitzt ein pulverisiertes Material, sodass sich aus dem Pulverteilchen eine Schicht bildet, auf die die nächste Schicht aufgetragen wird.	- Hohe Oberflächenqualität - Höhere Festigkeit - Geeignet für funktionsfähige Prototypen	- Hohe Kosten - Emission von Partikeln - Geringere Präzision
Stereolithographie (SLA)	Ein Laser belichtet ein flüssiges Photopolymerharz, das dann durch Vernetzung eine Schicht bildet, auf die die nächste Schicht aufgetragen wird.	- Höchste Präzision - Gute Oberflächenqualität - Breite Materialauswahl	- Hohe Kosten - Empfindlichkeit gegenüber Licht und Feuchtigkeit
<i>Multi Jet-Modeling</i> (MJM)	Mehrere Düsen gleichzeitig geben das Material auf die Bauplattform ab und erzeugen das Modell Schicht für Schicht.	- Höhere Geschwindigkeit - Gute Oberflächenqualität - Geeignet für große Modelle	- Geringere Präzision - Geringere Materialvielfalt
<i>Digital Light Processing</i> (DLP)	Ein Projektor projiziert Licht auf ein flüssiges Photopolymerharz, das dann durch Vernetzung eine Schicht bildet, auf die die nächste Schicht aufgetragen wird.	- Hohe Geschwindigkeit - Höhere Präzision - Gute Oberflächenqualität	- Empfindlichkeit gegenüber Licht und Feuchtigkeit - Geringere Materialvielfalt

2.1.4.4 Individualisierte Mikrosysteme und mögliche Prozessketten

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „individualisierte Mikrosysteme“ iMST wie folgt definiert:

Ein individualisiertes Mikrosystem ist ein Mikrosystem¹⁹, welches aus einer begrenzten Anzahl von Komponenten besteht, wovon mindestens eine Komponente einzigartig ist in Bezug auf die geometrische Gestalt und/oder die elektrische bzw. mechanische Funktion.

Die Kombination der MID-Technik mit der generativen Fertigung eignet sich, um iMST effizient herstellen zu können. Auf diese Weise können unterschiedliche Prozessketten aufgebaut werden, welche in Abbildung 19 abgebildet sind und sich jeweils durch die Kombination der Prozessschritte unterscheiden.

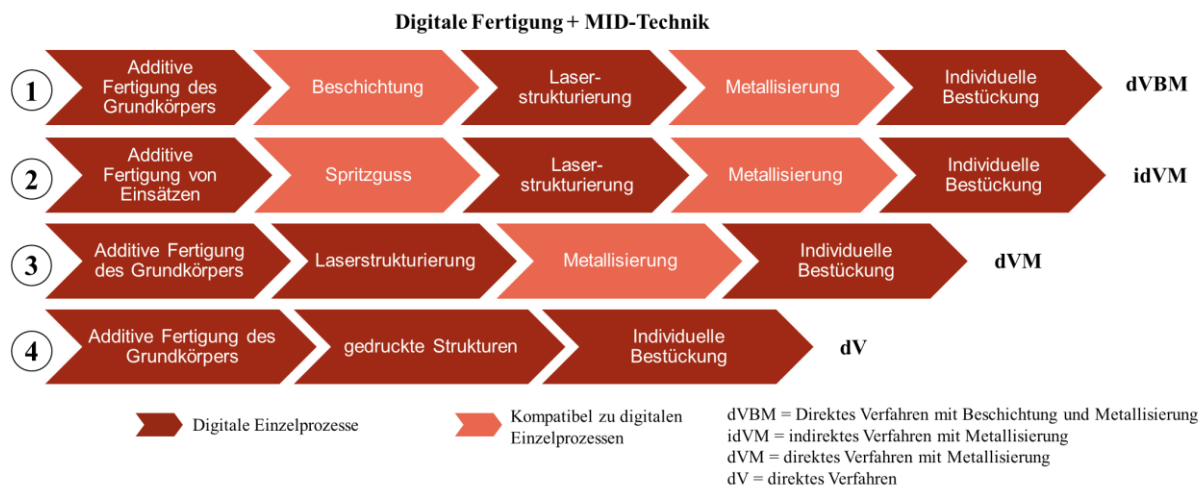


Abbildung 19: Digitale Prozessketten zur Herstellung von iMST.

Aus Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass es Prozessketten mit einer unterschiedlichen Anzahl an Prozessschritten gibt. Auf den ersten Blick scheint es so, dass die kürzeste Prozesskette auch die schnellste darstellt. Jedoch kann sich dies je nach Anforderungen, wie bspw. Temperaturbeständigkeit des Mikrosystems ändern. Für den ersten Schritt aller Prozessketten stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Bei diesen vier ausgewählten Prozessketten sind weitere Optionen in Bezug auf die gewählten Verfahren möglich. Diese Vielfalt an möglichen Verfahren erschwert eine rationale Auswahl der Prozesskette.

¹⁹ „Unter einem Mikrosystem ist ein sehr kleines Bauteil zu verstehen, das im besten Fall Sensoren, elektronische Verarbeitung der Daten und eine physikalische Aktion (Aktorik) miteinander verbindet.“ [70]

Ein Beispiel der ersten Prozesskette aus Abbildung 19 ist der 3D-Pyramidenstumpf (Abbildung 20). Der ProtoPaint (LDS-Lack) im zweiten Schritt wird benötigt, um das 3D-gedruckte Bauteil LDS-fähig zu machen. Der letzte Bestückungsschritt wurde vernachlässigt.

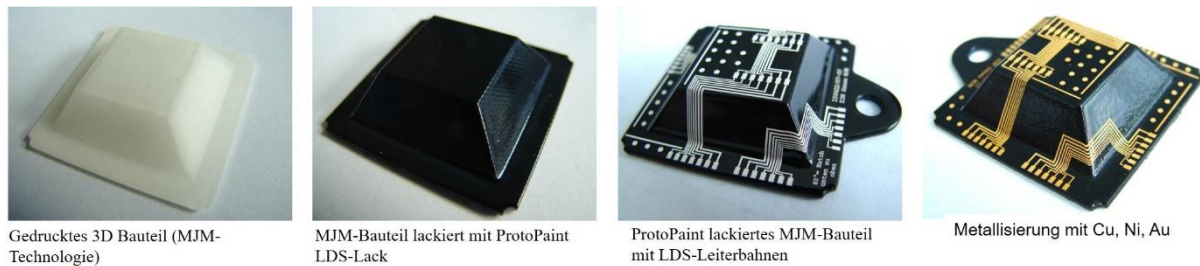


Abbildung 20: MID-Bauteil mit digitalen Fertigungsverfahren (MJM) nach [105].

Das selbe Bauteil konnte im Rahmen eines Forschungsprojektes [106] mit der zweiten Prozesskette (*RapidTooling*) umgesetzt werden (siehe Abbildung 21).

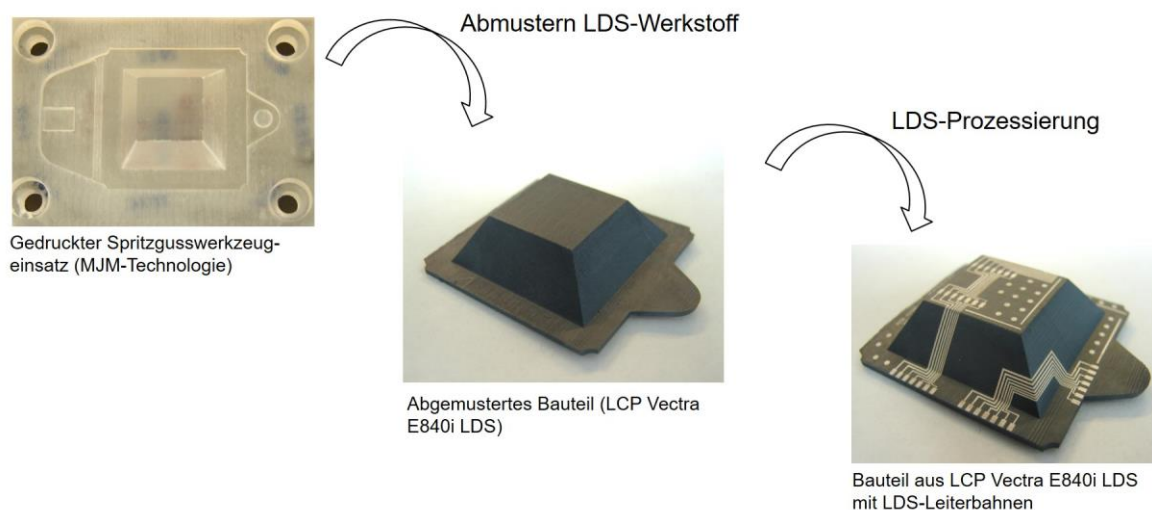


Abbildung 21: MID-Bauteil mit dem RapidTooling-Prozess nach [105].

Werden die Ergebnisse beider Prozessketten verglichen, ist zu erkennen, dass diese unterschiedliche Charakteristiken und Merkmale aufweisen. Bspw. ist die Oberfläche beim Prozess idVM rauer als im Falle der Prozesskette dVBM, wodurch eine gesonderte CO₂-Schneestrahlnreinigung nötig wird. Vorteil der idVM ist jedoch, dass verschiedene Werkstoffe beim Spritzgießen verwendet werden können. Dieser Vergleich soll zeigen, dass je nach Anwendungsfall und Anforderungen die Auswahl der Prozesskette unterschiedlich sein kann. Jedoch kann dies beliebig komplex für den Entwickler sein, da die Anzahl der Anforderungen, Fertigungsverfahren und deren Restriktionen beliebig hoch sein kann.

2.2 Produktentstehungsprozesse

2.2.1 Abstraktionslevel und Modellierung

Die Besonderheiten bei der Entwicklung von Mikrosystemen sind u. a. die Interdisziplinarität, durch die Verknüpfung von Elektronik, Mechanik und Informatik sowie die Technologieabhängigkeit, da Neuentwicklungen von Mikrosystemen ebenfalls von neuen bzw. weiterentwickelten Technologien abhängen [21], [111]. Mit der Individualisierung erweitern sich die Charakteristiken und erschwert sich die Entwicklung, da die Flexibilität und das spezifische Anwendungsfeld ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Damit geht einher, dass während des Entwicklungsprozesses keine festgelegte Formulierung des Problems vorliegt, weshalb Ziele und Bedingungen nicht vollständig bekannt sind und während des Prozesses angepasst werden müssen. Dies führt zu einer Erhöhung der Entwicklungszeit und –kosten durch die nötigen Iterationen innerhalb des Entwicklungsprozesses. Ein Kernziel des Produktentstehungsprozesses (PEP) ist es daher Entwickler zu unterstützen, die in Produktqualität, Produktkosten und Entwicklungszeit gemessenen Erfolgskriterien zu erreichen [17]. Für eine erfolgreiche Produktentwicklung ist eine Entwicklungssystematik Voraussetzung [82]. Diese stellt sicher, dass das integrative Zusammenwirken aller beteiligten Entwickler erfolgt [82]. Der Entwicklungsprozess ist dabei ein Teil des Entstehungsprozesses, da der Entstehungsprozess den vollständigen Prozess von der Produktidee bis zum physikalischen Vorliegen des hergestellten Produkts beschreibt [8].

Abbildung 22 zeigt den allgemeinen Prozess der Produktentwicklung, welcher sich in vier Hauptphasen gliedert, wie sie von Pahl und Beitz [112] beschrieben werden. Die VDI-Richtlinie 2221 [113] erkennt diese Phasen an, beschreibt den Produktentwicklungsprozess jedoch anhand von sieben Arbeitsabschnitten, die den Phasen untergeordnet sind, wobei die vier Phasen bei der Richtlinie VDI2221 überlappen.

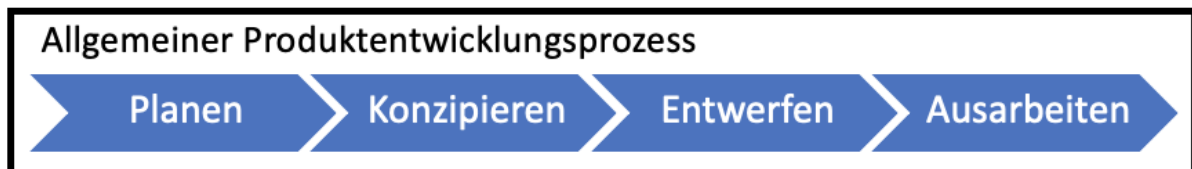


Abbildung 22: PEP von Pahl und Beitz.

Diese Prozesse weisen einen hohen Allgemeinheitsgrad auf und sind präskriptiver Natur [40]. Jedoch kann ein PEP unterschiedliche Detaillierungsgrade haben. Nach Lindemann [40] werden vier Detaillierungsebenen der Prozessmodelle unterschieden (siehe Abbildung 23). Bei

der Mikrologik wird von elementaren Handlungsabläufen, bei der Makrologik hingegen von der Betrachtung des Gesamtprojekts gesprochen.

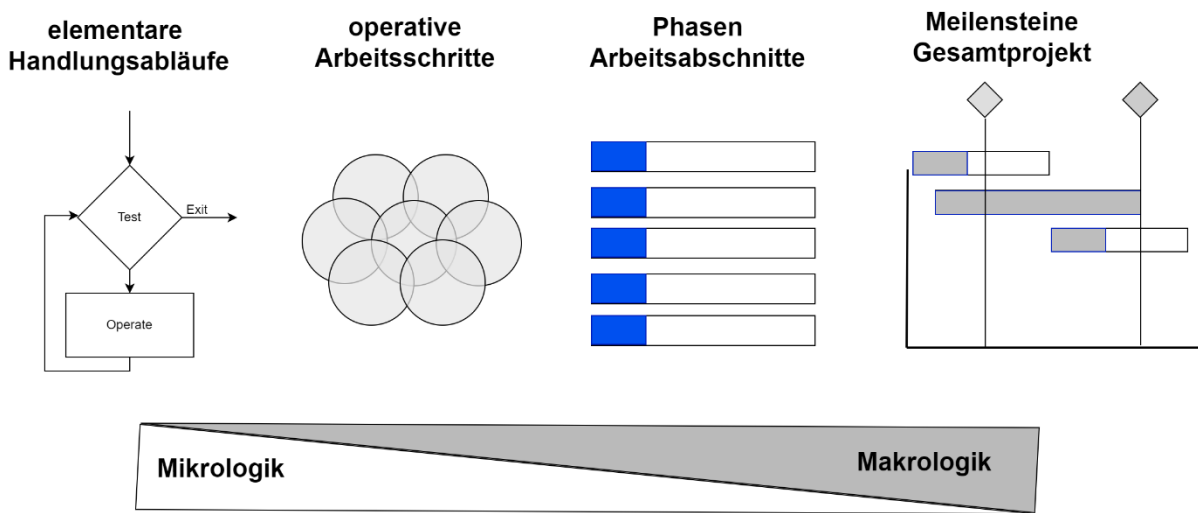


Abbildung 23: Abstraktionslevel der Prozessmodellierung für die Produktentwicklung nach [39].

Während das Vorgehen in der Mikrologik elementare Denk- und Handlungsabläufe abbildet, geht es bei der Makrologik darum, die Abbildung der Phasen von Arbeitsschritten zu zeigen [114]. Die Modelle dazwischen werden oft als Vorgehensmodell zur Problemlösung bezeichnet, das heißt, hier werden Schritte von der Problemidentifikation bis zur Lösung dargestellt [114].

Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit, die sich u. a. auf die Erstellung eines PEP für iMST fokussiert, ist es von Bedeutung, einige Methoden der Modellierung von Prozessen zu betrachten. Einige dieser Methoden werden häufig zur Prozessmodellierung von PEP verwendet. Tabelle 5 zeigt ausgewählte Modellierungsmethoden von Prozessen, welche einander gegenübergestellt wurden.

Tabelle 5: Methoden zur Modellierung von Prozessen.

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Vorteile	Nachteile
Petri-Netz [115]	Graphische Methode zur Modellierung von Abläufen und Systemen in Form von Knoten und Kanten – ohne Verknüpfungsoperatoren	Klare Darstellung von Abhängigkeiten und Ressourcenbedarf	Prozessbausteine sind nicht abbildbar. Begrenzte Modellierungsfähigkeit
<i>Structured analysis and Design Technique</i> (SADT) [116]	Strukturierte Methode für Analyse und Design von Geschäftsprozessen, die sehr hierarchisch ist.	Relativ leicht zu verstehen, da die Methode eine systematische Analyse und Gestaltung von Prozessen bietet.	Kann bei komplexen Prozessen eingeschränkt sein. Überbewertung formaler Prozesse, wie Dokumentation
Netzplantechnik [117]	Graphische Methode zur Planung und Überwachung von Projekten, die vor allem sehr termingetrieben sind.	Gute Übersicht über den zeitlichen Ablauf von Projekten	Hat nicht die Möglichkeit, Eingangs- und Ausgangsgrößen abzubilden.
Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) bzw. <i>Business Process Model Notation</i> (BPMN) [118]	Graphische Methode zur Modellierung von Prozessen, die von Ereignissen ausgelöst werden.	Gute Übersicht über die Abhängigkeiten zwischen Ereignissen und Prozessen. Ermöglicht die Integration von Geschäftsregeln.	Kann bei komplexen Prozessen aufgrund der Überladung von Informationen eingeschränkt sein.
Swim-Lanes [119]	Graphische Methode zur Darstellung von Prozessen und Verantwortlichkeiten	Klare Darstellung von Verantwortlichkeiten und Abläufen, Modellierung parallel ablaufender Prozesse, einfache Übertragbarkeit.	Kann unübersichtlich werden, wenn viele Akteure involviert sind.
OMEGA [120]	Mathematische Methode zur Modellierung von Prozessen und Systemen	Kann komplexe Prozesse und Systeme genau modellieren. Unterstützt objektorientierte Modellierung – was eine gewisse Flexibilität bietet.	Erfordert mathematisches Wissen und kann für kleine Projekte überdimensioniert sein.

Im Gegensatz zu den Methoden der Prozessmodellierung gibt es zusätzlich abstraktere Modelle zur Darstellung eines PEP.

Die bekanntesten sind:

- Wasserfall-Modell
- V-Modell
- Spiralmodell
- Agiles Modell

Das **Wasserfall-Modell** gehört zu den bekanntesten und älteren Vorgehensmodellen, welches grundsätzlich sequenziell abläuft, die Arbeitsschritte werden nacheinander abgearbeitet [121]. Das **V-Modell** ist eine Erweiterung des Wasserfallmodells nach Royce, welches sich darin unterscheidet, dass es in vielen Phasen Qualitätsprüfungen gibt und diese domänenübergreifend betrachtet werden [122]. Ein bekanntes Modell, um Prozesse zu wiederholen, ist das **Spiralmodell**. Es hat eine iterative Herangehensweise, um komplexe und risikobehaftete Projekte mit möglichst geringem Risiko umzusetzen [123]. Zu den modernen Vorgehensmodellen gehört das **Agile Modell**, zu dem bspw. Scrum gehört. Bei diesen Modellen wird der Fokus auf die Durchführung gelegt, während im Gegensatz dazu bei den anderen eher die Planung im Vordergrund steht. Der Verlauf des Projekts wird grundsätzlich immer für die nähere Zukunft geplant, da hier stark iterativ agiert wird [121]. Das Projektziel bzw. die Anforderungen sind oft unklar definiert, da davon ausgegangen wird, dass diese sich ändern werden [124].

Des Weiteren gibt es sogenannte nebenläufige Vorgehensmodelle wie das **Simultaneous Engineering (SE)** oder **Concurrent Engineering (CE)**. Abbildung 24 zeigt die Unterschiede zwischen Simultaneous (oben) und Concurrent Engineering (unten).

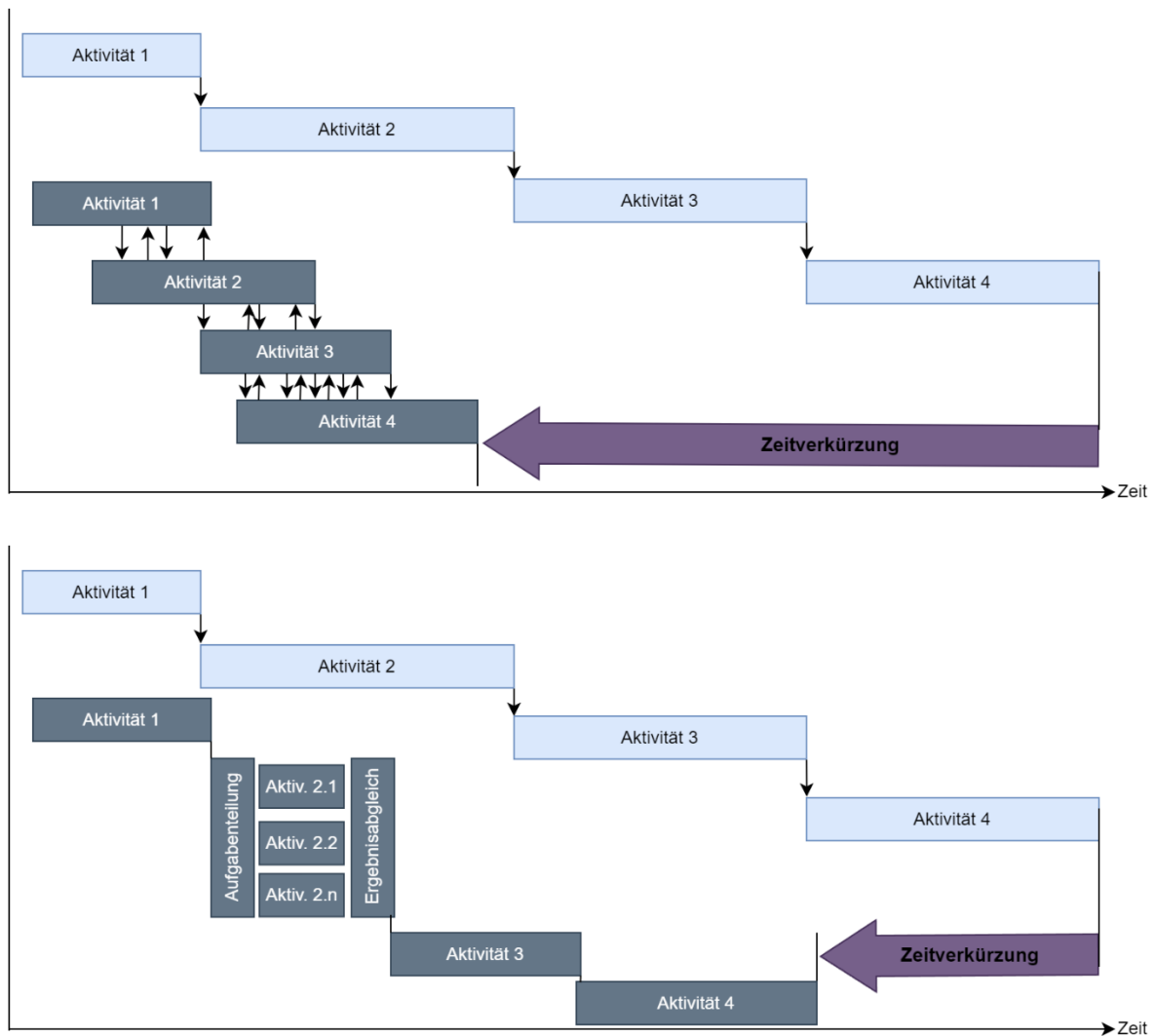


Abbildung 24: Unterschied zwischen Simultaneous (oben) und Concurrent Engineering (unten) nach [122].

SE ist ein Ansatz, bei dem Entwicklungsaktivitäten aus verschiedenen Funktionsbereichen parallel bearbeitet werden [125]. Dadurch können spätere Funktionsbereiche bereits vor einer abschließenden Freigabe mit ihrer Arbeit beginnen. Diese Methode kann die Durchlaufzeit eines Projekts verkürzen. Jedoch kann die Entscheidung herausfordernd sein, wann vorläufige Ergebnisse stabil genug sind, um weiterverwendet werden zu können. Beim CE geht es hingegen darum, Aktivitäten innerhalb eines Funktionsbereichs zu parallelisieren [125]. Hierbei ist es das Ziel, Aufgaben so zu unterteilen, dass sie parallel bearbeitet werden können. Der Fokus liegt auf der Definition von Schnittstellen zwischen den Teilaufgaben, um eine parallele Bearbeitung zu ermöglichen. In der Praxis werden sowohl Elemente von SE als auch CE verwendet [8].

Zuletzt gibt es noch sogenannte hybride Modelle, die eine Kombination aus den genannten Modellen darstellen. Bspw. kann das V-Modell von VDI 2206 [126] kann als ein Spiralmodell betrachtet werden, wie anhand von Abbildung 25 zu erkennen ist.

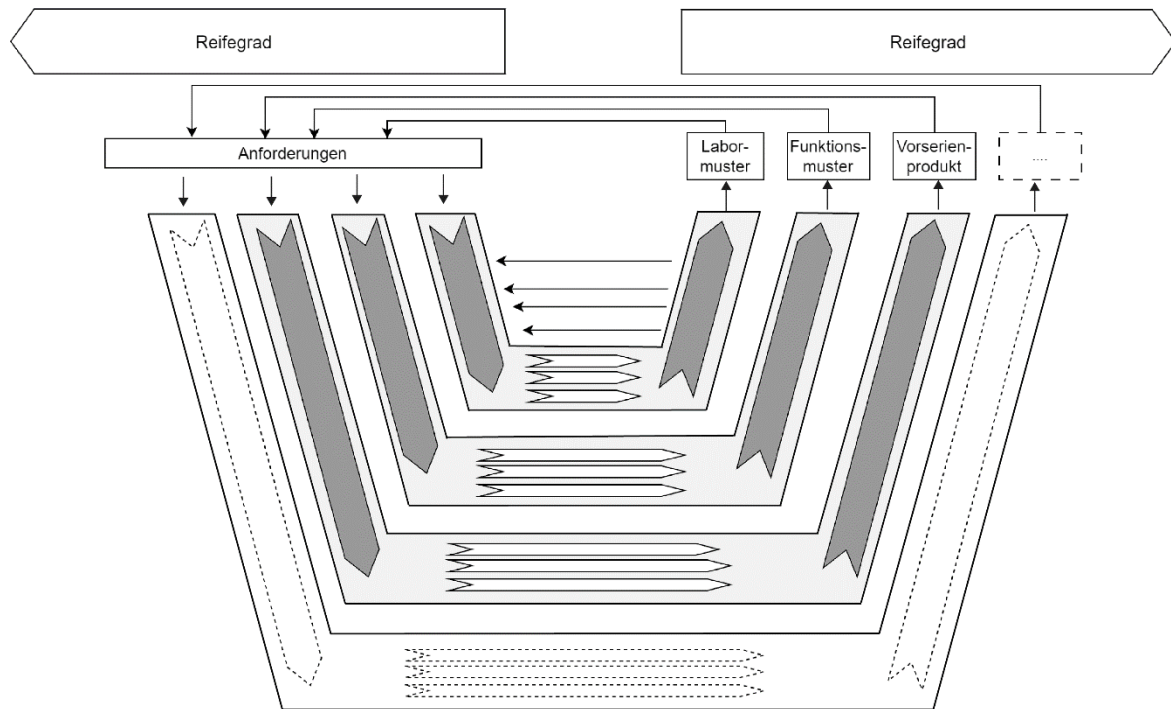


Abbildung 25: Makrozyklen des V-Modells nach [125].

Ein weiteres hybrides Modell ist das Wasserfall-Scrum Modell [121]. Während der Implementierung und Umsetzung wird Scrum genutzt, aber z. B. in den Stufen „Test“ und „Auslieferung“ wird wieder das traditionelle Vorgehen angewandt. Einige Stufen des Wasserfallmodells bleiben bestehen. Es ist jedoch nicht festgelegt, welche Phasen mit Scrum umgesetzt werden.

Je nach Anwendungsfall und Aufgabe eines Vorgehensmodells muss entschieden werden, welcher Abstraktionslevel bzw. welche Methode zur Modellierung geeignet ist. Dabei ist es wichtig, die Einflussfaktoren auf das Vorgehensmodell bzw. auf den PEP zu berücksichtigen. Das folgende Kapitel soll daher einen kurzen Überblick über den Aspekt der Einflussfaktoren geben.

2.2.2 Einflussfaktoren auf den PEP

Eine große Schwierigkeit bei der Anpassung von Prozessen besteht darin, den Entwicklungskontext möglichst umfassend zu verstehen und die Auswirkungen auf die Daten- und Informationsströme zu bestimmen [127]. Zur Erfassung und Analyse von Kontextfaktoren zeigt Reitmeier [128] daher ein Modell, welches diesen Schritt unterstützen soll (Abbildung 26).

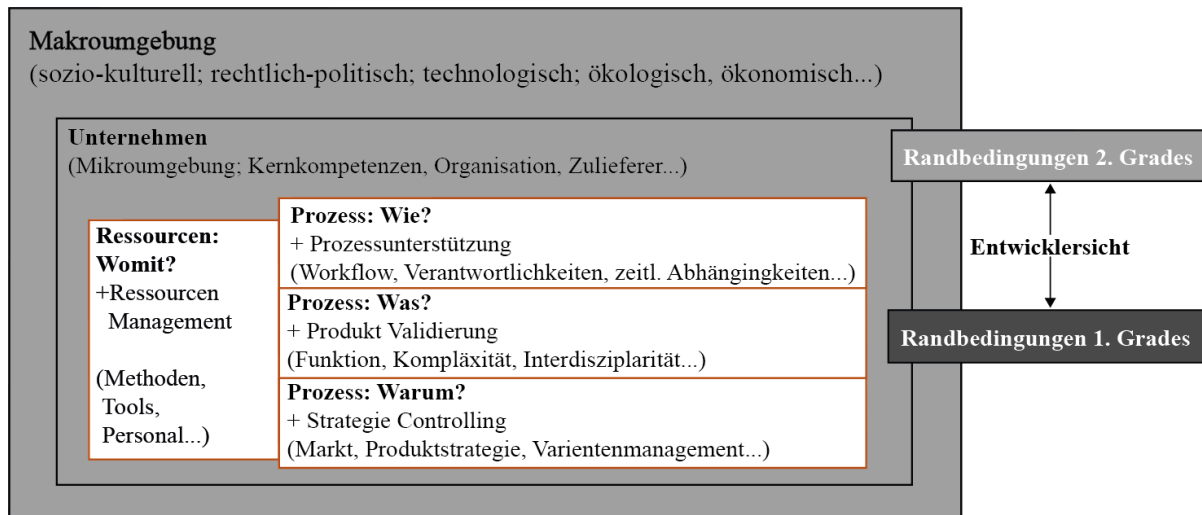


Abbildung 26: Modell zur Analyse von Kontextfaktoren nach [127].

Reitmeier unterscheidet bei Kontextfaktoren zwischen solchen ersten Grades, die direkt mit der Tätigkeit der Entwickler in Verbindung stehen und dadurch die notwendigen Aktivitäten unmittelbar beeinflussen oder selbst von den Entwicklern beeinflusst werden können. Aspekte des Produkts und des Prozesses sowie Unternehmensressourcen spielen ebenfalls eine Rolle. Strategische Überlegungen, wie die Bedeutung des Entwicklungsprojekts für den Markt, die Branche, den Kunden oder dessen Einordnung im Produktmanagement, beeinflussen die Anpassung des Entwicklungsprozesses. Kontextfaktoren zweiter Ordnung, die sich aus dem Makroumfeld oder der Unternehmensstrategie ergeben, beeinflussen die grundlegende Gestaltung der Entwicklungsabläufe. Durch diese Modelle konnten bspw. von Gericke et al. [129] über 230 Kontextfaktoren bestimmen. Ein weiteres Modell, welches die Einflüsse auf den Prozess der Produktherstellung darstellt, ist das Ishikawa-Diagramm von Ehrlenspiel und Meerkamm [41]. Abbildung 27 zeigt diese Auswahl von Kontextfaktoren, bei denen äußere und innere Einflüsse unterschieden werden, wobei die gekennzeichneten (*) zu den äußeren gehören.

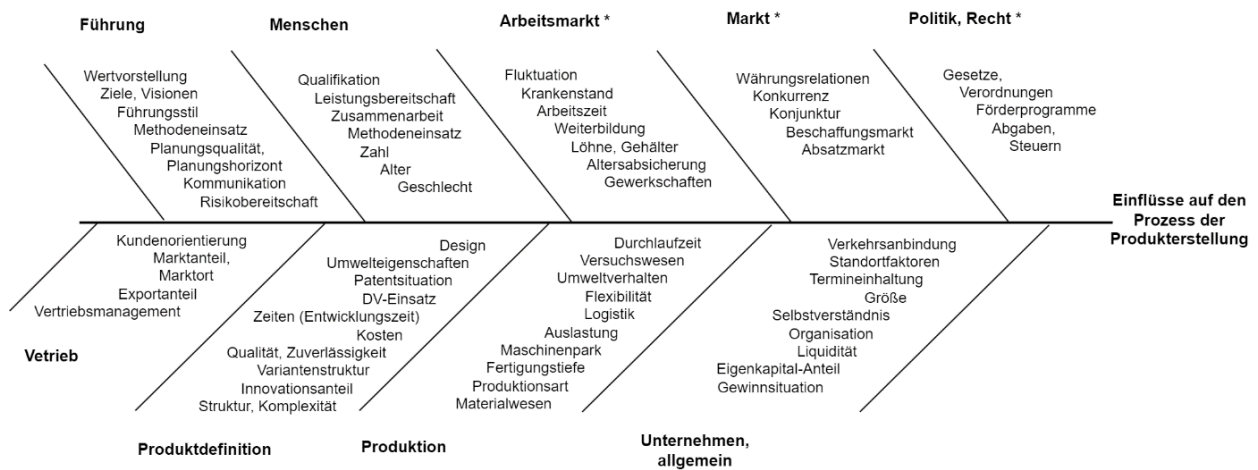


Abbildung 27: Einflussfaktoren von Produktherstellungsprozessen nach [40].

iMST sind sehr spezifisch, daher ist eine einfache Zuordnung bzw. Identifikation von Kontextfaktoren nicht einfach gegeben. Wie in diesem Kapitel eingangs erwähnt, ist die Bestimmung von Kontextfaktoren eine Herausforderung. Daher wird im Kapitel 4 eine Methodik entwickelt, die eine Möglichkeit bietet, Kontextfaktoren anhand von Anwendungsfällen zu generieren. Zuvor sollen im nächsten Kapitel einige Beispiele und vorhandene adaptierte PEP gezeigt werden, die auf Basis von Kontextfaktoren erstellt wurden.

2.2.3 Adaptierte Produktentwicklungsprozesse

2.2.3.1 Mikrosystemtechnik

In diesem Unterkapitel werden die in der Literatur explizit als PEP für die Mikrosystemtechnik erwähnten Modelle genauer betrachtet. Diese schließen die Vorgehensmodelle bzw. PEP der MID-Technik ein, da diese als eine Untergruppe der Mikrosystemtechnik aufgefasst werden kann. Anschließend soll eine Zusammenfassung über die Unterschiede dieser Prozesse erstellt werden. Anzumerken ist, dass aufgrund ihrer Ähnlichkeit und Aktualität nicht alle potenziell relevanten Methodiken für die MST aufgezeigt werden können.²⁰

Eine Methodik, die explizit für die MST erstellt wurde, liefert die Arbeit von Watty [21]. Die Grundlage des PEP beruht auf dem das V-Modell nach VDI 2206 [126]. Durch Veränderungen und Ergänzungen einzelner Komponenten des eigentlichen V-Modells wird ein modifiziertes Modell für die MST erzeugt, dargestellt anhand von Abbildung 28. Wie aus Abbildung 28 entnommen werden kann, sind die Methoden auf der linken Seite aufgelistet. Diese wurden

²⁰ Für weitere Entwicklungsmethodiken der Mikrosystemtechnik siehe z. B. auch [130], [131].

nicht den entsprechenden Phasen zugeteilt, wobei sie in der Detailbetrachtung einer einzelnen Phase erwähnt werden.

Allgemein: Zuordnung von Methoden für die einzelnen Entwicklungsphasen

- Hauptmerkmalsleitlinien und erweiterte Anforderungsliste zur Ermittlung von Anforderungen
- Werkstoff-Auswahlmatrix
- Technologie-Auswahlmatrix
- Katalog mit Sammlung physikalischer Effekte
- Wirkstruktur zur Erkennung von Wechselwirkungen
- Ordnungsschemata / Konstruktionskataloge
- Gestaltungsrichtlinien
- System-FMEA

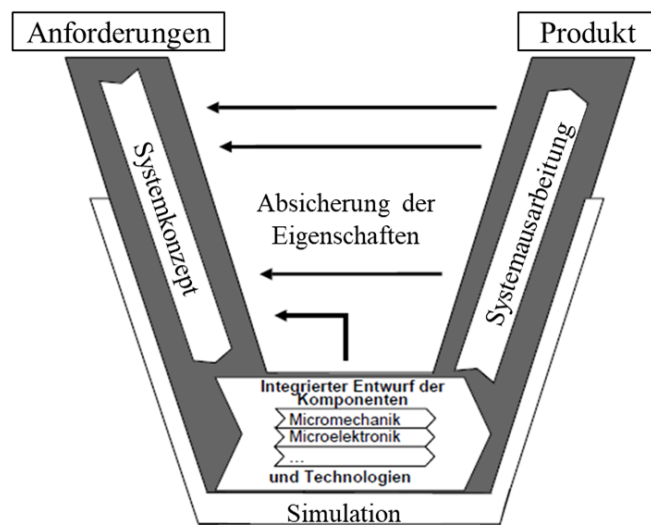


Abbildung 28: Entwicklungsmethodik der Mikrosystemtechnik nach [21].

Diese Methodik zeichnet sich dadurch aus, dass bestimmte Methoden für die MST ausgewählt wurden. Dabei kritisiert Watty, dass einige Faktoren, wie die Technologiebeziehung, Störeinflüsse und das Wissensmanagement, nicht berücksichtigt werden, aber wichtig für die MST sind [21].

Eine weitere Systematik zur Neuentwicklung eines Mikrosystems ist die von Schwesinger et al [70]. Der Prozess beginnt mit den Anforderungen, die mittels neuer Wirkprinzipien gelöst werden sollen (siehe Abbildung 29).

Anschließend folgen das Design des Bauteils bzw. das Flowchart. Der nächste Schritt ist die Herstellung eines Prototyps. Dabei beschreiben Schwesinger et al. [70], dass der Prototyp hohe Kosten verursachen kann, da auf die Modellierung und Simulation verzichtet wird. Als Grund, weshalb die Modellierung und Simulation später erfolgt, führen sie an, dass in der Regel für neue Mikrosysteme keine aussagekräftigen Simulationen und Modelle durchgeführt bzw. aufgestellt werden können. Nach dem *Prototyping* folgt die Messung, wobei damit die Validierung gemeint ist. Folglich kann die Abfrage beginnen, ob die Anforderungen erfüllt werden oder nicht. Hierbei ist im Vergleich zu anderen Prozessen zu sehen, dass, auch wenn

die Anforderungen erfüllt werden, danach die Modellierung und Simulation sowie die zukünftige Verbesserung des Prozesses folgt.

Im Kontext der Individualisierung ist von Schewsinger et al. [70] die folgende Aussage getätigt worden: *„Für originäre Mikrosysteme existieren in der Regel keine Modelle. Sie müssen erst entwickelt und mit Hilfe von Messdaten abgeglichen werden. Dieser Prozess kostet sehr viel Zeit und Manpower“*.

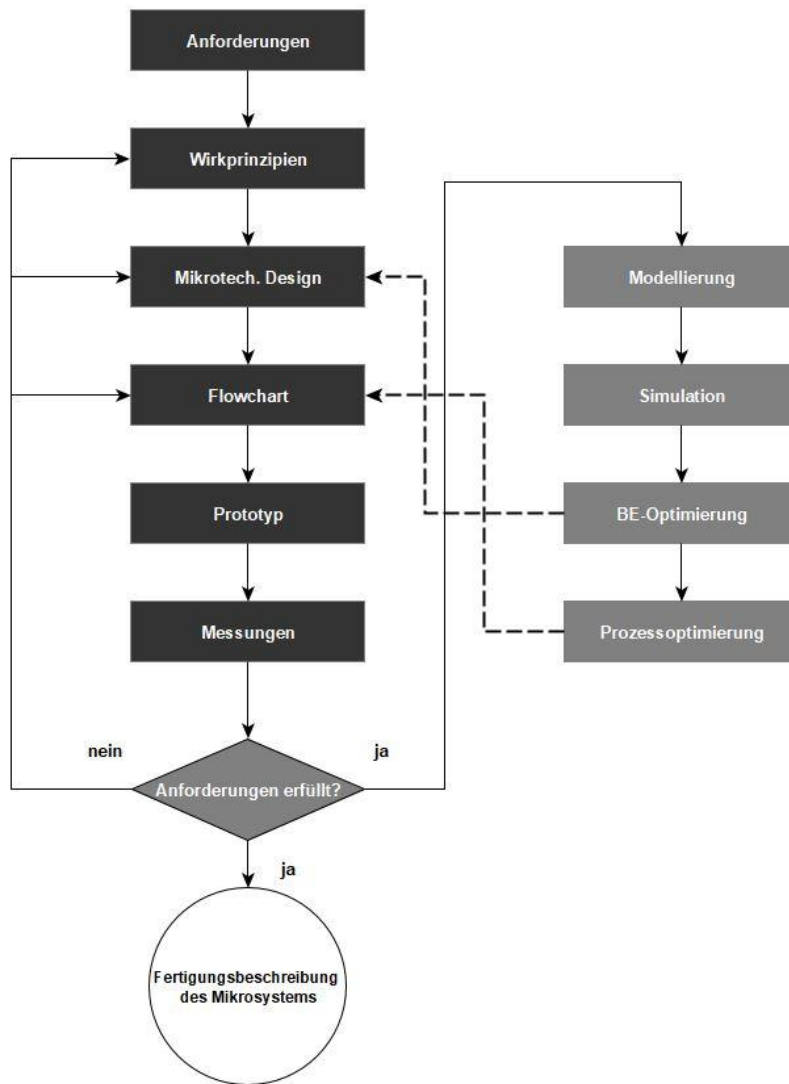


Abbildung 29: Entwurfsprozess eines Mikrosystems nach [69].

Der zuletzt genannte Entwicklungsablauf von Mikrosystemen wird im [132] geschildert. Dieser besteht aus 13 Schritten und zwei Spalten, die diese Entwicklungsschritte erläutern (siehe Tabelle 6). Der Entwicklungsablauf beginnt mit der Sammlung von Anforderungen durch die Erstellung eines Lasten- bzw. Pflichtenheftes. Anschließend folgt die System-Konzeption, in der das Produkt, aber auch die Fertigungstechnologie konzipiert werden. In Schritt 3 folgt durch System-Design/Konstruktion die gestalterische Festlegung, wobei die Verwendung von Designregeln und CAD sowie Simulations-Tools empfohlen wird. Daraufhin folgen konkretere Schritte für die Einrichtung und Bereitstellung der Fertigung. Nachdem auch die einzelnen Komponenten bereitgestellt werden, beginnt im 8. Schritt das Prototyping. Wie in vielen Vorgehensmodellen folgen anschließend Schritte von der Validierung bis zur Serienfertigung.

Tabelle 6: Entwicklungsablauf eines Mikrosystems nach [131].

Nr.	Entwicklungsschritt	Zweck	Bemerkung
1	Lastenheft / Pflichtenheft	Genaue Festlegung der Anforderungen ans System	
2	System-Konzeption	Konzeption der Architektur und Fertigungstechnologie (Gehäuse, Substrate, Bauelemente, Fertigungstechnik, Dienstleister...)	
3	System-Design/Konstruktion	Entwurf, Simulation und Verifikation des Systems und der Komponenten; für Si Chips erfolgt der entsprechende Ablauf (s.o.)	Designregeln beachten, CAD+Simulations-Tools
4	Fertigungstechnik festlegen	Fertigungstechnik für alle Komponenten und für die System-Montage festlegen	
5	CAM-Daten	Daten für die Herstellung oder Beschaffung aller Komponenten generieren	CAM-Regeln beachten
6	Fertigungstechnik einrichten	Fertigungstechnik für Komponenten und System-Montage einrichten (Werkzeuge, Versuche,...)	
7	Komponenten bereitstellen	Komponenten beschaffen, anfertigen, Testen	
8	Prototypen anfertigen	Systemkomponenten zu Prototypen montieren	
9	Funktionstest	Verifikation der Funktion des Systems	
10	System-Redesign	Überarbeitung des Systems Ablauf wie Schritte 3-8	
11	Qualifikation	Überprüfung der System-Zuverlässigkeit	
12	Validierung/Feldtest	Überprüfung der Erfüllung der Kundenwünsche	Freigabe Serie
13	Serienprodukt	Serienproduktion	

Wenn die drei vorgestellten Prozesse zur Entstehung eines Mikrosystems betrachtet werden, kann festgestellt werden, dass sie sowohl hinsichtlich ihrer Struktur als auch ihres Inhalts unterschiedlich modelliert sind. Während das erste und dritte Modell eine frühzeitige Integration von Simulationen vorsehen, empfiehlt das zweite Modell eine spätere Anwendung von Simulationen bzw. Messungen. Strukturell unterscheiden sich die Modelle vor allem dadurch, dass das V-Modell, eine klassische Flow-Chart-Darstellung oder eine tabellarische Form verwendet werden. Des Weiteren ist festzustellen, dass der Prozess nach [132] auf einen Blick mehrere Perspektiven, Entwicklungsschritte, Zwecke und Bemerkungen aufzeigt, wobei bei den beiden anderen Ansätzen darauf hingewiesen wird, dass Erläuterungen separat und entlang der Prozessschritte dargestellt werden müssen. Dies hat jedoch den großen Nachteil, dass der Entwickler mehrere Dokumente berücksichtigen muss und keinen Überblick über den gesamten Prozess hat. Ein Nachteil der Tabellenform, ggü. anderen Modellen, ist, dass die Iterationsschritte schriftlich und als ein ganzer Prozessschritt dargestellt werden müssen – als sog. *System-Redesign*. In diesem Punkt sind das Flussdiagramm bzw. das V-Modell stimmiger. Das V-Modell zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Modellen insofern aus, dass dieses den Integrationsaspekt der nötigen Disziplinen darstellt.

Innerhalb der MST gibt es Entstehungsprozesse der MID-Technik, die in dieser Arbeit eine besondere Aufmerksamkeit erhalten. Das generische Vorgehensmodell nach Kaiser [133] zählt zu den bekanntesten in der Literatur und wird oft als Referenz und Leitfaden für die Entwicklung von Mikrosystemen verwendet (siehe Abbildung 30). Dieses basiert wiederum

auf den Referenzprozessen zur Entwicklung integrierter mechanisch-elektronischer Baugruppen von Gausemeier [82].

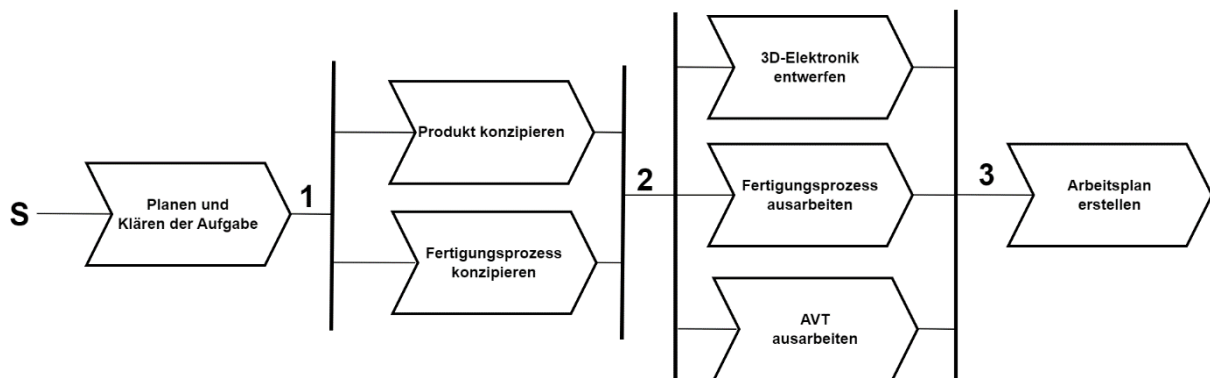


Abbildung 30: Generisches Vorgehensmodell für die MID nach [132].

Ein Hauptunterschied zu Gausemeiers Referenzprozess ist, dass dieser nicht mit der Technologiefindung beginnt, sondern mit dem Planen und Klären der Aufgabe.²¹ Auch wenn die Prozessschritte selbsterklärend sind, werden diese im Folgenden nach Kaiser und Franke [80], [133] näher erläutert.

Planen und Klären der Aufgabe: Das „Einkaufsdokument“ dieser Phase ist ein konkreter Auftrag zur Entwicklung. Dieser wird gründlich untersucht und das darin enthaltene Problem oder die Aufgabe so objektiv wie möglich formuliert. Wenn es bereits ähnliche Produkte gibt, ist es sinnvoll, eine Analyse von deren Schwächen durchzuführen, um Optimierungspotentiale zu erkennen.

Produkt konzipieren: Diese Phase startet auf Basis des Entwicklungsauftrages und einer Anforderungsliste. Zunächst werden die Funktionen des zu entwickelnden Produkts definiert. Abhängig von den Zielen können dabei unterschiedliche Ansätze für die Modellierung der Funktionen genutzt werden. Um die Funktionsanforderungen zu erfüllen, werden Lösungsmuster evaluiert und kombiniert, bis man schließlich auf grundlegende Lösungskonzepte stößt. Diese Ideen werden anschließend nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet und die ursprüngliche Anforderungsliste weiter verfeinert. Schließlich werden die Funktionsweise und das grundlegende Design des Produktkonzepts

²¹ Zudem werden zu jeder Phase Methoden und teilweise auch Werkzeuge empfohlen. Diese werden im Kapitel 2.3 gesondert erläutert und betrachtet.

entwickelt. Hierbei ist es besonders wichtig, die Herstellbarkeit zu berücksichtigen und das Konzept ggf. an die Fertigungsrestriktionen anzupassen.

Fertigungsprozess konzipieren: Während der Produktkonzipierung wird parallel das Konzept für den Fertigungsprozess in Angriff genommen. Dazu wird mit der Suche nach geeigneten Fertigungstechnologien begonnen. Hierbei werden die Restriktionen berücksichtigt, die sich aus dem Design des Schaltungsträgers und der Anordnung der Bauteile ergeben. Aus den recherchierten Technologien wird schließlich das beste Verfahren für eine Herstellung auf MID-Basis ausgewählt.

3D-Elektronik entwerfen: Diese Phase beschreibt die eigentliche Entwurfsphase von Pahl/Beitz [112]. Dabei wird das dreidimensionale Schaltungslayout entworfen. Unter Berücksichtigung von Designgrundsätzen wird eine grobe Form festgelegt, die im Anschluss hinsichtlich Form, Werkstoff und Toleranzen ausgearbeitet wird. Um die elektronischen Funktionen zu realisieren, wählt der Entwickler die passenden elektronischen Bauteile aus und verknüpft diese im Layout. Nach Überprüfung des Layouts anhand von verfahrensspezifischen Design-Regeln (z. B. Abständen und Breiten von Leiterbahnen) und eventuell erforderlichen Anpassungen stellt das vollständig entwickelte räumliche Schaltungslayout das Endresultat dieser Phase dar.

Fertigungsprozess ausarbeiten: In dieser Phase werden die Lösungskonzepte für den Produkt- und Fertigungsprozess als Input verwendet. Das Ziel ist die Entwicklung eines ausgearbeiteten Fertigungsprozesses einschließlich Prüfverfahren. Zunächst wird die Übereinstimmung des bestehenden Fertigungskonzepts mit dem detaillierten Produkt bewertet, insbesondere ob das gewählte MID-Verfahren für die Fertigung des Produkts geeignet ist. Anschließend wird die Fertigungsprozesskette ausgearbeitet, dabei werden die erforderlichen Anlagen und Handhabungssysteme sowie ihre Prozessparameter definiert. Im Anschluss werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung durch die Auswahl geeigneter Prüfverfahren bestimmt. Die parallel entwickelte automatisierte visuelle Prüfung muss schlussendlich in den Fertigungsprozess integriert werden, um das endgültige Ergebnis zu erzielen - dieses ist ein ausgearbeiteter Fertigungsprozess, inklusive der erforderlichen AVT.

AVT ausarbeiten: In dieser Phase wird die spezifische Auswahl der Verfahren für den Aufbau und die Verbindung von Bauteilen vorgenommen. Die Auswahl wird von den vorab festgelegten Eigenschaften des Produkts entscheidend beeinflusst. So hat bspw. die

Temperaturbeständigkeit des verwendeten Werkstoffs Einfluss auf die Wahl des Verbindungsmediums. Basierend auf den ausgewählten Verfahren bestimmt ein Entwickler die notwendigen Anlagen und Werkstoffe sowie die Prozessparameter. Als Ergebnis liegt eine detaillierte AVT-Fertigungsprozesskette vor.

Arbeitsplan erstellen: In der letzten Phase dieser Entwicklungsmethodik wird die Arbeitsplanung festgelegt, die in die Bereiche Arbeitsablauf- und Arbeitsmittelplanung unterteilt ist. In der Arbeitsablaufplanung werden Arbeits- und Montagepläne sowie Steuerprogramme für Maschinen erstellt. Die Auslegung der Maschinen und Vorrichtungen wird in der Arbeitsmittelplanung unter Berücksichtigung von Stückzahl, Toleranz und Kapazität vorgenommen.

Alle Modelle haben nicht den Anspruch zur Entwicklung von iMST, somit wurden naturgemäß die Eigenschaften der Individualisierung nicht berücksichtigt. Dies wurde bereits von Schwesinger et al. [70] implizit erwähnt. Folglich ist es lohnenswert, sich eingehend mit den bestehenden Ansätzen zur Entwicklung individualisierter Produkte auseinanderzusetzen, um so die Charakteristika der Individualisierung zu erkennen und diese PEP für iMST zuzuschreiben.

2.2.3.2 Individualisierung

Ein adaptierter PEP, der speziell auf die Individualisierung ausgerichtet ist, konnte nicht identifiziert werden. Jedoch werden Prozesse bzw. Methodiken vorgestellt, die bestimmte und ausgewählte Eigenschaften der Produktindividualisierung berücksichtigen. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Baumberger [66] stellt sich in seiner Arbeit der Problematik, wie die kundenspezifische Produktdefinition von individualisierten Produkten erfolgen kann. Da die Leistungsdefinition des Produktes während des PEP erfolgt, ergeben sich große Herausforderungen. Ein Ergebnis ist dabei das Phasenmodell des kundenindividuellen Produktdefinitionsprozesses, wie Abbildung 31 zeigt.

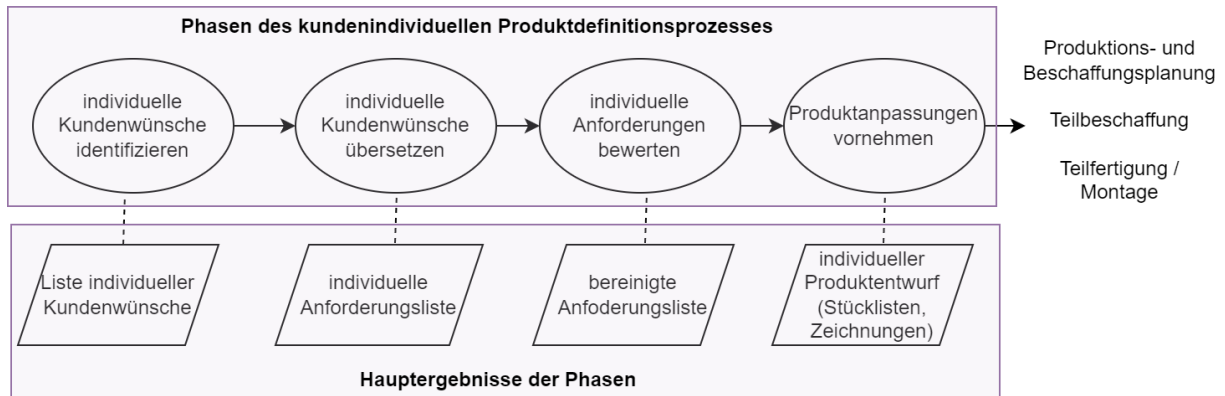


Abbildung 31: Phasenmodell des kundenindividuellen Produktdefinitionsprozesses nach [65].

Die einzelnen Phasen enthalten detaillierte Beschreibungen sowie ausgewählte Methoden. Im Kontext des gesamten Entwicklungsprozesses für individualisierte Produkte ist das Phasenmodell insofern relevant, da individualisierte Produkte durch eine relativ lange Vorentwicklungsphase gekennzeichnet sind und im Gegensatz zu variantenreichen Serienprodukten kein komplettes Variantenspektrum kundenanonym vorentwickelt und angeboten werden kann [66]. Die endgültige Definition der kundenindividuellen Produkte findet in kundenspezifischen Entwicklungsprozessen statt [66]. Diese sind durch die Integration des individuellen Kunden charakterisiert und bestehen aus den Phasen Aufnahme der Kundenbedürfnisse, kundenindividuelle Produktdefinition und –erstellung [66]. Daher betont Baumberger, dass die frühen Struktur- und Planungsphasen essentiell sind [66]. Zusammenfassend zeigt Baumberger in seiner Arbeit, dass die Vorentwicklungsphase länger, iterativer und relevanter für den Produkterfolg bei individualisierten Produkten ist. Dieser Punkt ist für Baumberger der wesentliche Unterschied zu Varianten- bzw. Serienprodukten im Entwicklungsprozess.

Eine weitere Charakteristik der Produktindividualisierung ist die Herstellung in Losgröße 1 [134]. In Bezug auf diesen Kontext, Losgröße 1, gibt es ebenfalls ein generisches VDI 2221 Vorgehensmodell [113]. Abbildung 32 stellt dementsprechend den Einfluss der Stückzahlen auf den Entstehungsprozess dar.

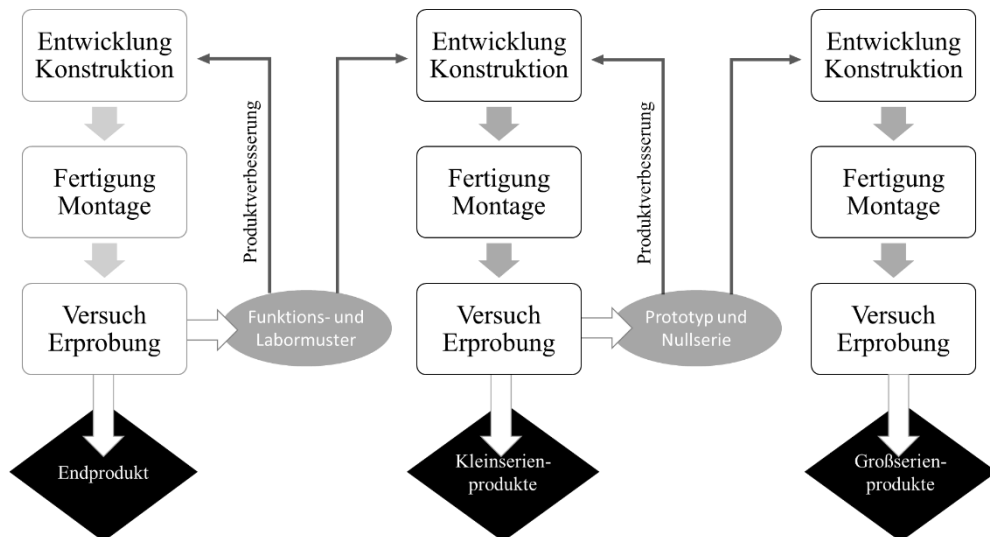


Abbildung 32: Einfluss der Stückzahlen auf den Entstehungsprozess nach [112].

Der Begriff Stückzahl wird unterteilt in Einzelproduktion, Kleinserienproduktion und Großserienproduktion. Der PEP zum Einzelprodukt führt vor allem aufgrund von Versuchen und Erprobung zu hohen Herstellungskosten. Im Gegensatz zu Kleinserien und Großserien entsteht bei der Einzelfertigung kein Skaleneffekt. Es zeigt sich, dass keine große Aufmerksamkeit auf die Herstellung des Einzelproduktes gelegt wurde, eher verdeutlicht Abbildung 32 den Weg und die dafür nötigen Modelle sowie Prototypen zur Großserienproduktion.

Ein weiterer Vorgehensansatz innerhalb der Individualisierung ist der von Hildebrand [135]. Dabei vollzieht sich die Entwicklung individualisierter Produkte auf zwei Ebenen, bedingt durch die Abgrenzung zwischen kundenanonymen und kundenbezogenen Aufgaben (siehe Abbildung 33).

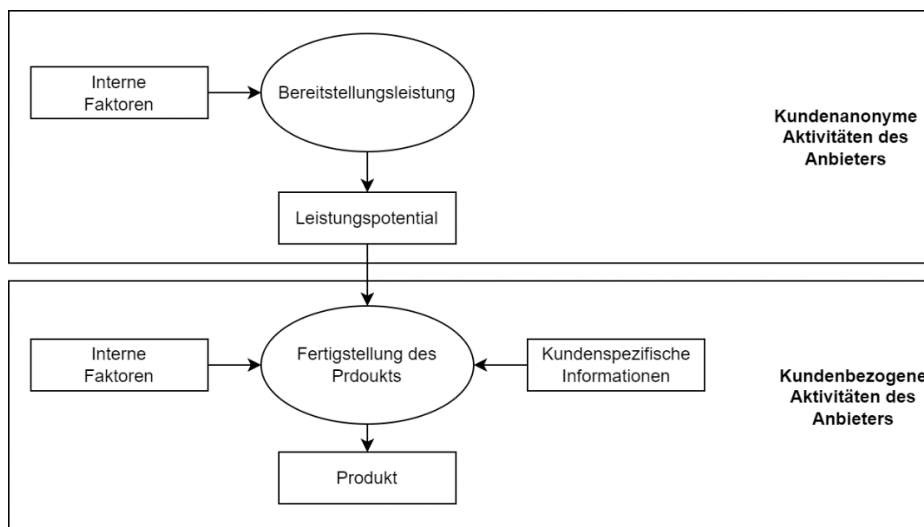


Abbildung 33: Vorgehen bei der Entwicklung individualisierter Produkte nach [134].

Zuerst findet eine Vorauswahl bzw. die Entwicklung eines kombinierten Leistungspotentials statt, welches die Fähigkeiten festlegt, die am Markt angeboten werden können. Auf Basis des Leistungspotentials werden definierte Leistungsbestandteile einmalig ohne Einbeziehung des Kunden entwickelt. Ohne Einbindung des Kunden werden bestimmte Leistungskomponenten einmalig aufgrund des Leistungspotentials entwickelt [135]. Der Fokus bei der Entwicklung liegt oft mehr auf dem Design einer anpassungsfähigen Produktstruktur als auf dem Konstruieren einzelner Produktbestandteile [40], [135]. Auf dieser Ebene existiert das individuelle Produkt lediglich als eine konzeptionelle Darstellung. Während der Vorkombination ist es jedoch wichtig, bereits die Möglichkeiten für eine Individualisierung im Leistungsangebot zu berücksichtigen [135], [136]. Auf der zweiten Ebene erfolgt die Integration des Kunden. Hierbei trägt der Kunde als externe Kraft Informationen bei, die anschließend mit dem vorab definierten Leistungspotential verbunden werden [135]. So wird das Produkt auf die Bedürfnisse des Kunden angepasst und produziert. Hierbei handelt es sich um eine Anpassung oder Entwicklung einzelner Leistungskomponenten, die speziell auf die individuellen Anforderungen des Kunden ausgerichtet sind. Dies stellt den optimalen Ansatz für die Erstellung personalisierter Produkte dar [135].

Eine aktuelle (aus dem Jahr 2022) und thematisch naheliegende Arbeit, da sie ein Vorgehensmodell bzw. „Framework“ für die Entwicklung von individualisierten Produkten mit digitalen Fertigungsverfahren erarbeitet hat und daher einen anderen Kontext als diese Arbeit besitzt, ist die von Ozdemir et al. [49]. Die vorgeschlagene Methodik führt den Entwickler durch den Entwicklungsprozess eines vom Benutzer modifizierbaren Designs und zeigt, wie die Beteiligung des Benutzers bei der Erreichung eines personalisierten Designs erleichtert werden kann. Es wird eine flexible und anpassungsfähige Architektur für das *Seed-Design* und ein interaktiver Prozess der Kunden-Mitgestaltung (Co-Design) vorgeschlagen. Mit *Seed-Design* ist ein Ausgangspunkt, Grund-Design oder eine Basis für das Design gemeint. Es dient als Startpunkt für den weiteren Entwicklungsprozess und kann als Vorlage verstanden werden. Das *Seed-Design* kann durch den Benutzer modifiziert werden, um ein personalisiertes Design zu erreichen. Das Konzept soll ermöglichen, dass der Benutzer aktiv an der Gestaltung des Designs beteiligt wird und ein personalisiertes Ergebnis erhält. Die Entwicklung eines *Seed-Designs*, der Aufbau seines Designraums und die Verwaltung des Lösungsraums mittels eines Designlösungsalgorithmus werden dabei ausführlich dargestellt. Abbildung 34 visualisiert das Vorgehensmodell und das Zusammenspiel zwischen *Seed-Design* und *Co-Design*.

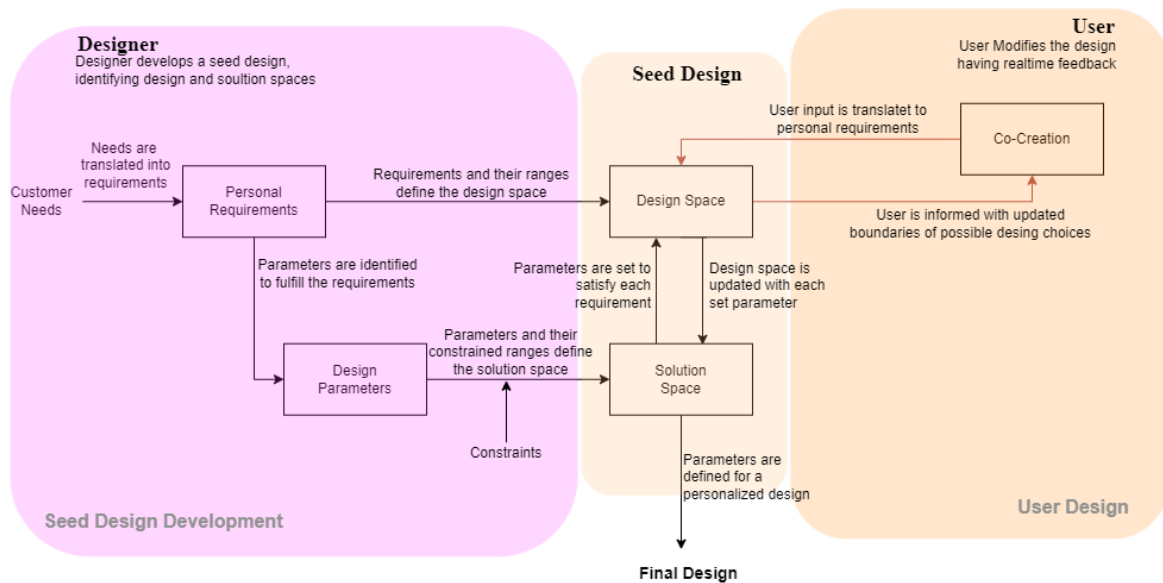


Abbildung 34: Entwicklungsmethodik für individualisierte Produkte mittels digitaler Fertigungsverfahren nach [48].

Diese Methodik (Abbildung 34) besteht aus zwei Phasen. Die erste Phase beschreibt, dass der Designer ein vom Benutzer modifizierbares *Seed-Design* entwickelt. Die zweite Phase besteht darin, dass das *Seed-Design* von jedem Benutzer vervollständigt wird. Das *Seed-Design* kann unterschiedliche persönliche Anforderungen im Designraum erfüllen, die durch unterschiedliche Designparameter in seiner Struktur realisiert werden. Die vordefinierten und garantierten Bereiche der Designparameter bilden den Lösungsraum. Der Entwurfsprozess wird vom Benutzer abgeschlossen, bei dem das Produkt im Designraum personalisiert wird, welches auf den Lösungsraum abgebildet wird. Daher werden die Entwurfsänderungen durch die Anforderungen bestimmt und durch die Designparameter realisiert. Die Interaktion zwischen Design- und Lösungsraum, mit einem Echtzeit-Feedback zur Co-Design-Schnittstelle, wird von einem Designsolutionalgorithmus verwaltet. Ein endgültiger Entwurf wird generiert, wenn alle Parameter im Lösungsraum eingestellt sind. Das Ziel ist es, den Prozess der Generierung personalisierter Produkte zu automatisieren, indem das *Seed-Design* einmal definiert wird und jeder Kunde anschließend die Fertigstellung des Designs vornehmen kann. Diese präskriptive Methodik zielt darauf ab, den Designer bei der Entwicklung eines Grund-Designs (*Seed-Design*) im digitalen Fertigungskontext anzuleiten und die Mitgestaltung durch den Kunden effektiv zu erleichtern, um personalisierte Produkte herzustellen [49].

Digitale Fertigungsverfahren bilden wichtige technologische *Enabler* für die Herstellung von individualisierten Produkten. Daher ist eine Bestandsaufnahme von PEP im Kontext der digitalen Fertigungsverfahren lohnenswert, die im nächsten Kapitel enthalten ist.

2.2.3.3 Digitale Fertigungsverfahren

Wie aus dem Kapitel „Einflussfaktoren des PEP“ zu entnehmen ist, kann die Produktion ein relevanter und entscheidender Kontextfaktor für den PEP sein. Eine mögliche Prozessdarstellung im Kontext der Additiven Fertigung (AM) wird von Yang und Zhao [137] beschrieben. Diese wurde insofern überarbeitet, dass die Methode bei einer bestehenden Konstruktion mehrere Optimierungsschleifen vorgibt. Der erste Schritt ist die Analyse des ursprünglichen CAD-Modells und die Durchführung einer Teilezusammenfassung auf Funktionsebene entsprechend den funktionalen Anforderungen und Leistungsanforderungen. Dieser Schritt wird als Funktionsintegration definiert, wie es Abbildung 35 zeigt. Im zweiten Schritt werden Strukturoptimierungsmethoden auf den neu generierten Designraum angewendet, um eine bessere Leistung wie ein geringeres Gewicht, eine bessere Wärmeableitung oder dynamische Eigenschaften unter den Leistungsanforderungen zu erreichen. Die beiden oben genannten Schritte sollten auch den Prozessbeschränkungen bezüglich Fertigung, Montage und Standardisierung entsprechen. Anschließend werden die Konstruktionslösungen überprüft. Wenn keine Designlösung gefunden wird, geht der Designprozess zur Funktionsintegration zurück und notwendigen Änderungen sollten in diesem Schritt vorgenommen werden. Wurden Entwurfslösungen gefunden, werden diese ausgegeben und das ursprüngliche Produkt wird mit weniger Teilen und besserer Leistung neu gestaltet.

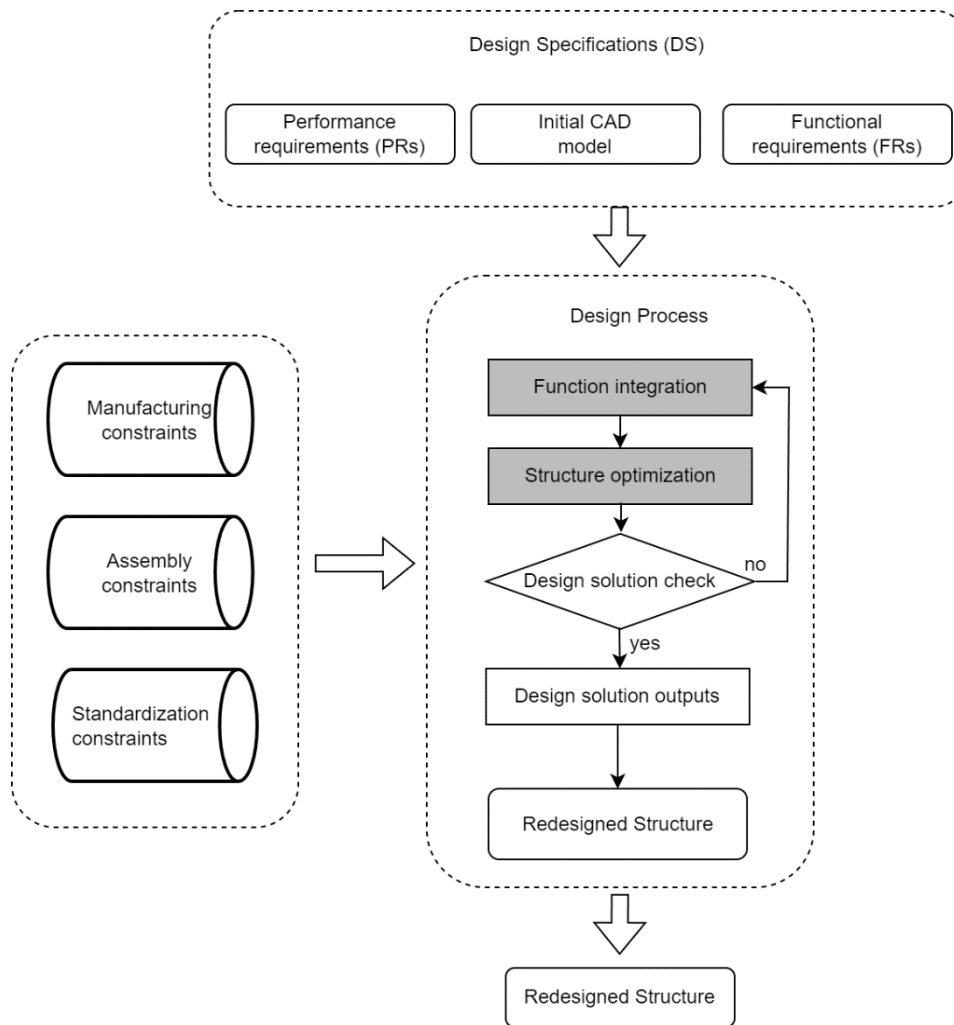


Abbildung 35: PEP im Kontext der Additiven Fertigung nach [136].

Einen weiteren PEP mit dem Kontextfaktor AM beschreibt Leutenecker-Twelsiek [138]. Der Prozess ist in fünf Hauptschritte untergegliedert, die zusätzliche Zwischenschritte beinhalten. Um den Konstrukteur bei der Herausforderung einer frühzeitigen Bestimmung der Bauteilorientierung zu unterstützen, wurde das in Abbildung 36 dargestellte Verfahren entwickelt. Es basiert darauf, den Entwurf des Bauteils in mehrere Konstruktionselemente aufzuteilen und diese separat zu analysieren. Bei dieser Analyse werden die Auswirkungen der Orientierung auf die Qualitätsmerkmale der Designelemente bewertet. Anschließend wird die Relevanz jedes Elements für die Bauteilfunktion bewertet, um die Auswirkungen der Bauteilausrichtung zu quantifizieren. Auf der Grundlage dieser Bewertung wird die Ausrichtung des Bauteils festgelegt. Im ersten Schritt des in Abbildung 36 dargestellten Prozesses wird das Konzept des Bauteils in Designelemente zerlegt. Ein Designelement ist dabei eine einzelne oder eine sinnvolle Kombination von aktiven Flächen, die eine Funktion im Bauteil erfüllen sollen. Als ein Beispiel für ein Konstruktionselement wurden ein Gewinde mit einer Klemmfläche oder die Kontaktflächen eines Anbauteils aufgezeigt (siehe Abbildung 36).

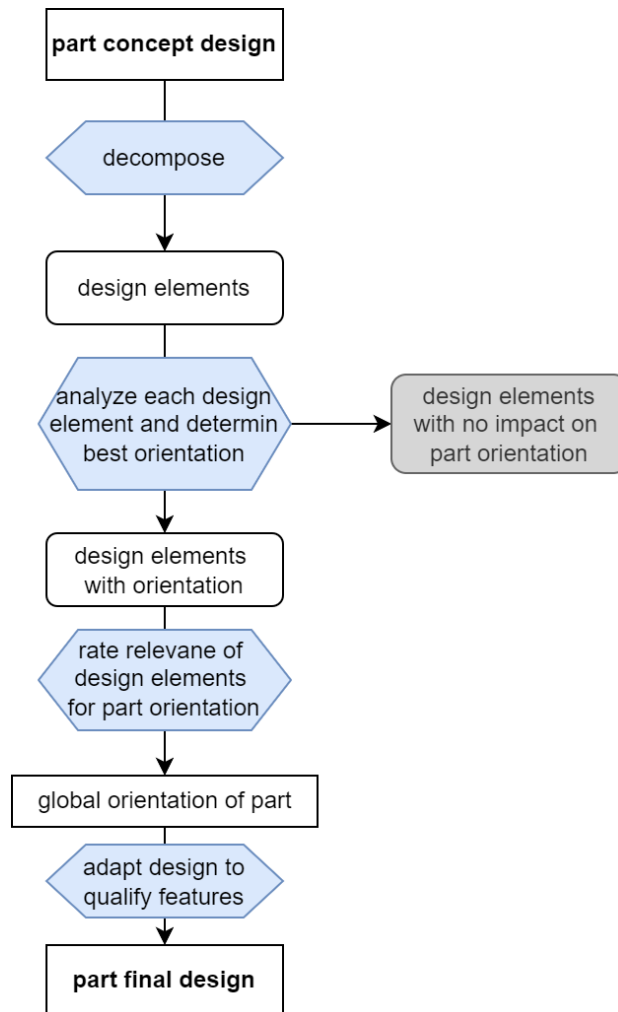


Abbildung 36: Prozess zur Definition der Teileorientierung in der frühen Entwurfsphase nach [131].

Im nächsten Schritt wird beurteilt, ob eine bestimmte Ausrichtung des Designelements einen signifikanten Einfluss auf das Qualitätsmerkmal hat. Ist dies nicht der Fall, kann das Designelement bei der Ausrichtung des Bauteils vernachlässigt werden. Wenn das Element einen Einfluss hat, muss der Konstrukteur die optimale Positionierung des Designelements für das Qualitätsmerkmal bestimmen. Dabei kann es zu Orientierungskonflikten zwischen den verschiedenen Qualitätsmerkmalen kommen, z. B. kann eine Ausrichtung zu einer besseren Oberflächenrauheit führen, während diese für andere Bestandteile die Gefahr des Verzuges ermöglicht. Hier muss der Konstrukteur festlegen, welches Qualitätsmerkmal Vorrang haben soll und damit die Ausrichtung des Designelements bestimmt. Leutenecker-Twelsiek erwähnt zudem, dass eine Überprüfung aller Qualitätsmerkmale für jedes Designelement sehr zeitaufwendig und oft unnötig ist. Eine Reduktion des Umfangs auf Qualitätsmerkmale mit hohem Einfluss in der frühen Entwurfsphase ist durchaus sinnvoll, um den Arbeitsaufwand zu reduzieren. In dieser Studie [138] wurden die Orientierungsprozesse von etwa zwanzig Teilen analysiert, um die erforderlichen Qualitätsmerkmale zu ermitteln. Auf der Grundlage dieser

Analyse wurden in der vorliegenden Arbeit die Qualitätsmerkmale auf die folgenden relevanten Merkmale reduziert: Oberflächenqualität, Maßhaltigkeit, Bauteilverzug, Tragstruktur und Bauhöhe. Dieser Satz von Qualitätsmerkmalen ermöglicht die Bestimmung der Bauteilausrichtung in einer frühen Entwurfsphase, wenn noch kein detaillierter Bauteilentwurf vorliegt. Auf der Grundlage der besten individuellen Ausrichtungen einzelner Elemente wird die Gesamtausrichtung des Bauteils bestimmt. Die Designelemente werden entsprechend ihrer Bedeutung für die Funktion des Bauteils gewichtet. Es ist wahrscheinlich, dass zusätzlicher Aufwand in der Nachbearbeitung erforderlich ist, wenn das Konstruktionselement nicht entsprechend seiner optimalen Ausrichtung positioniert ist. Außerdem ist die Anzahl der in ähnlicher Orientierung liegenden Designelemente von Bedeutung, da der Aufwand für die Nachbearbeitung erheblich steigen kann, wenn deren Ausrichtung nicht berücksichtigt wird. Als letzter Schritt wird empfohlen, dass der Konstrukteur zusätzlich die gesamte Bauteilkonstruktion berücksichtigt und prüft, ob eine Anpassung der Orientierung durch eine Umgestaltung einzelner Konstruktionselemente möglich ist.

Ein weiteres Beispiel von Entwicklungsprozessen für die AM stammt von Kumke et al. [105], [139], welche den VDI 2221-Prozess als Fundament verwendet und als Vorgehensmodell für *Design for Additive Manufacturing* (DfMA) deklariert haben. Folglich halten sich Kumke et al. an die traditionelle Unterteilung der Phasen Planung und Klärung der Aufgabenstellung, Konzeption, Entwurf und Ausführung. Die letzten beiden Phasen werden jedoch in diesem Rahmenwerk konsolidiert, da sie aufgrund der CAD-Nutzung und der Iterationen zwischen diesen Phasen zunehmend vermischt werden (siehe Abbildung 37).

Im ersten Modul wird eine Liste mit Produktanforderungen erstellt. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, in das DfAM-Framework einzusteigen, bspw. durch eine vorläufige Teileauswahl.

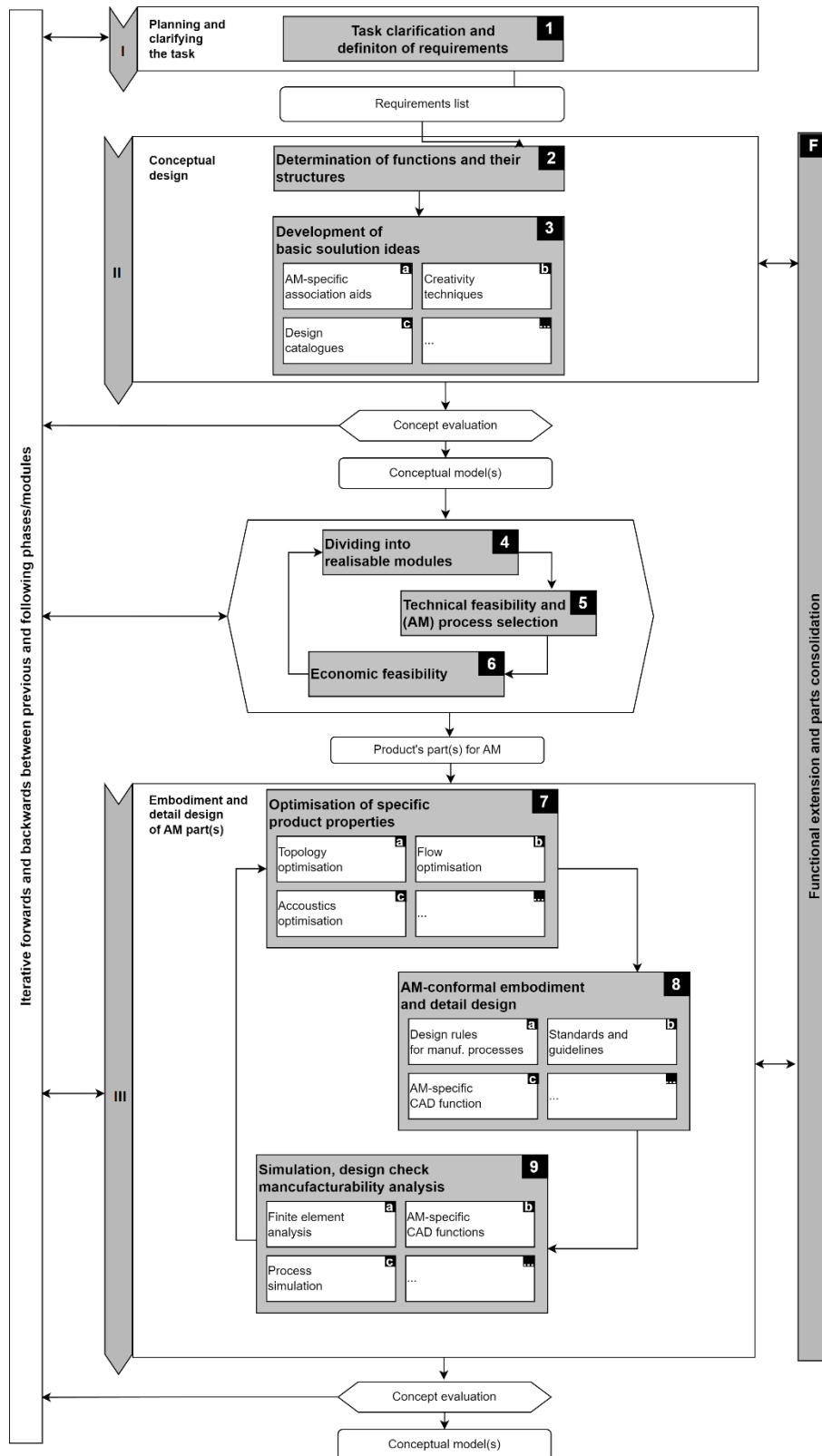


Abbildung 37: DfMA-Framework nach [104].

In der konzeptionellen Designphase (**Module 2 und 3**) werden Funktionsstrukturen auf Basis der Produkthanforderungen bestimmt. Im nächsten Schritt werden grundlegende Lösungsideen entwickelt, die sich insbesondere auf die systematische Nutzung des AM-Designpotentials konzentrieren. Dies kann bspw. durch die Verwendung von Bionics-Katalogen erfolgen. Es

wird der iterative Charakter des Erstellens und Überarbeitens von Ideen betont. Das Ergebnis der konzeptionellen Designphase sind ein oder mehrere konzeptionelle Modelle, abhängig von der Art des Produkts. Basierend auf dem oder den konzeptionellen Modell(en) wird eine modulare Produktstruktur entwickelt. Dies ist der erste Schritt eines Entscheidungstors, das die **Module 4 bis 6** umfasst. Die Teilung in realisierbare Module berücksichtigt sowohl allgemeine AM-Einschränkungen (z. B. maximale Teilgröße) als auch andere Fertigungstechnologien, die für bestimmte Teile des Produkts geeigneter sein können. Anschließend wird die technische und wirtschaftliche Machbarkeit geprüft. Kriterien für die technische Machbarkeitsbewertung beinhalten bspw. den Vergleich der verfügbaren AM-Materialeigenschaften mit den Produktanforderungen oder verfügbare Baukammergrößen. Die wirtschaftliche Machbarkeit wird mit Hilfe mehrerer Kriterien bewertet, einschließlich grundlegender Produktionsmerkmale wie der Losgröße oder Produktkomplexität. Eine frühzeitige wirtschaftliche Bewertung ist hilfreich, um in den folgenden Schritten unnötige Bemühungen zu vermeiden, wenn die Rentabilität unwahrscheinlich erscheint. In der Ausführungsphase (**Module 7-9**) wird die Konstruktionslösung vervollständigt. Im ersten Schritt können bestimmte Produkteigenschaften optimiert werden, z. B. durch Topologieoptimierungen. Anschließend wird das eigentliche AM-konforme Design erstellt, dies kann bspw. mit Hilfe einer AM-Designregelsammlung oder AM-spezifischen CAD-Funktionen geschehen. Dabei kann es notwendig sein, auch konventionelle *Design for everything* (DfX)-Methoden zu berücksichtigen, z.B. *Design for Manufacturing* (DfM)-Richtlinien für Folgeprozesse wie das Fräsen. Der letzte Schritt enthält Teilmodule zur Simulation, Designprüfung und Herstellbarkeitsanalyse. Es können mehrere Iterationen erforderlich sein, um die endgültige Designlösung zu erreichen. Modul F (äußerste rechte Säule) befasst sich mit der Funktionserweiterung und der Konsolidierung von Teilen, die zu den wichtigsten Potenzialen des AM-Designs gehören. Es ist sowohl für die konzeptionelle als auch für die Entwurfs-/Detailphase von Bedeutung, da die Funktionsintegration nicht auf eine dieser Phasen beschränkt ist. In Anlehnung an die Struktur der VDI 2221 enthält der Rahmen eine linke Randspalte für das iterative Vorwärts- und Rückwärtsgehen zwischen Phasen und Modulen. Obwohl der Hauptpfad einen linearen Prozessablauf suggeriert, erfordern die heutigen Entwurfsprozesse ein hohes Maß an Flexibilität. Der Informationsfluss zur linken Seitenleiste wird je nach Entwurfsziel entweder an den Evaluationsgates oder durch spezielle Hinweise innerhalb der Rahmenmodule ausgelöst [139].

Die Arbeit von Künneke et al. [140] ist die letzte angepasste Entwicklungsmethodik, welche in diesem Kapitel betrachtet wird. Diese beschreibt als AM-Konstruktionsmethodik ein weiteres Vorgehen zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile (siehe Abbildung 38). Dabei wird ein bewertungsmethodisches Vorgehen integriert und für jede Phase berücksichtigt. Auch diese Konstruktionsmethodik basiert auf dem Modell von VDI 2221. Der Konstruktionsprozess und das neu entwickelte Bewertungsverfahren von Künneke et al. laufen gleichzeitig ab. Der AM-Konstruktionsprozess kann unabhängig vom Bewertungsverfahren durchgeführt werden, aber das Bewertungsverfahren unterstützt bei der frühzeitigen Bestimmung des Fertigungsverfahrens. Die Motivation für die Erstellung dieser Methodik war vor allem, dass das Fertigungsverfahren erst in der Entwurfsphase bestimmt wird [140]. Dabei wird nach jedem Arbeitsschritt in den Prozess eingegriffen, um zu bewerten, ob das additive Verfahren überhaupt geeignet ist. Künneke et al. haben ein neues Verfahren zur Bewertung der Eignung additiver Fertigungsverfahren entwickelt, das bis hin zum Skizzieren der Prinziplösung nach jedem Arbeitsschritt in den Prozess eingreift, um eine Bewertung durchzuführen. Die Prozessanpassung ermöglicht es, die Lösungsalternative, die additiv gefertigt werden soll (AM-Lösungsalternative), entsprechend dem angepassten Konstruktionsprozess zu entwickeln und zu bewerten.

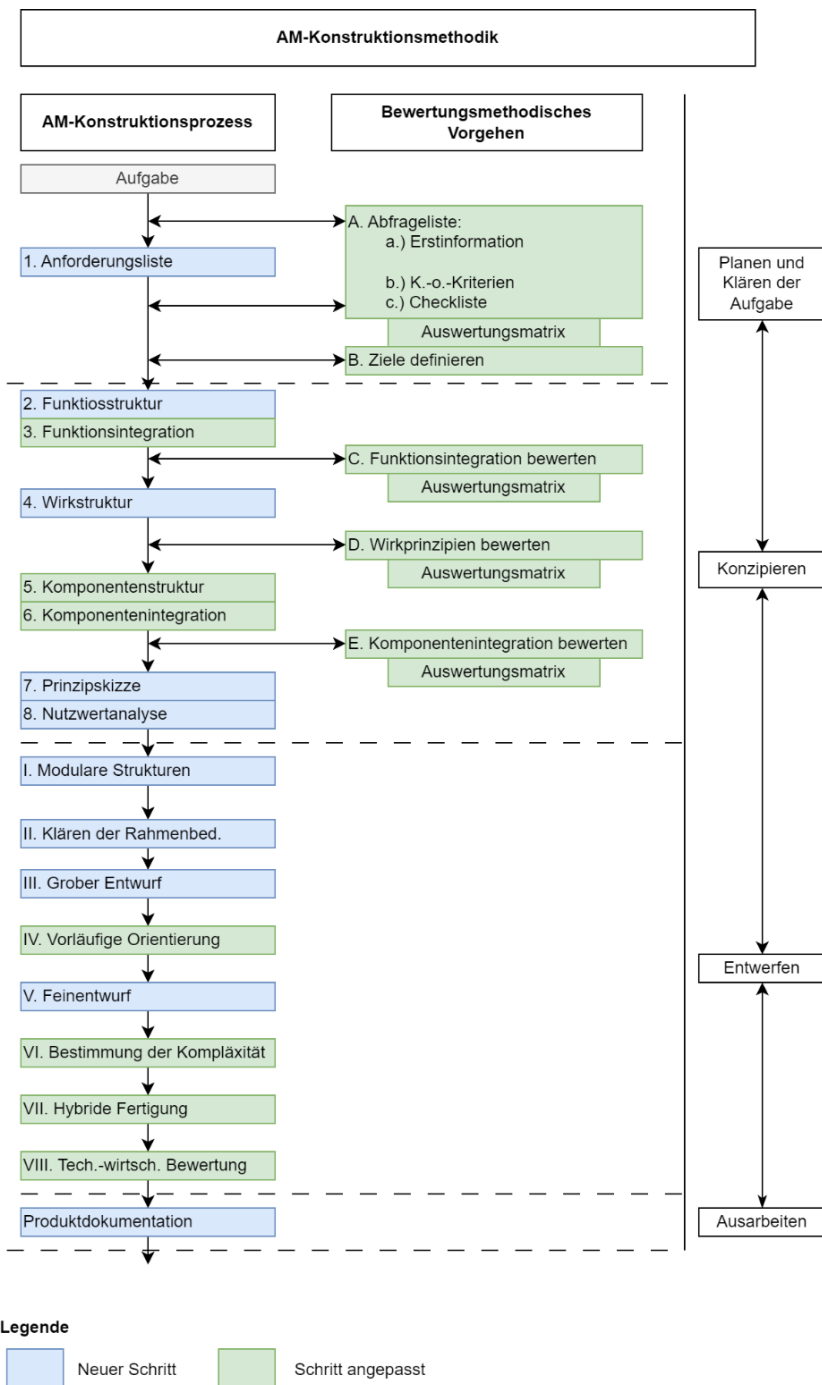


Abbildung 38: Konstruktionsmethodik AM nach [133].

Werden alle erwähnten adaptierten PEP zusammen betrachtet, so werden bestimmte Schwerpunkte deutlich. Bestätigen lässt sich, dass alle Modelle bzw. Prozesse das Ziel haben, bereits in den frühen Entwicklungsphasen Schwachstellen zu erkennen bzw. präventiv zu agieren, sodass Fehlkosten vermieden werden. Dieser „Schwerpunkt“ kann vermutlich für alle adaptierten PEP festgehalten werden. Was jedoch ausschließlich für die MST, die Individualisierung und digitale Fertigungsverfahren hervorsteicht, sind die starke integrative Berücksichtigung der Technologien sowie das Co-Design. Darüber hinaus kann gesagt werden,

dass zwar Prozesse erweitert und angepasst werden, jedoch die Integration der Entwicklungsmethoden eine wichtige Rolle spielt, wie etwa die Technologiebewertung. Prozesse werden von den abstrakten Modellen wie Pahl und Beitz bzw. VDI 2221 oder vom V-Modell abgeleitet und angepasst. Dadurch ist zu erkennen, dass die Grundidee des PEP bestehen bleibt, jedoch die Anwendung von Methoden innerhalb der Prozesse einen großen Unterschied macht. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit auch Produktentwicklungsmethoden (PEM), die jedoch im Kapitel 2.3 behandelt werden und als abschließende theoretische Grundlage dienen. Vorher soll beschrieben werden, wie ein PEP erfasst, eingeführt und optimiert werden kann.

2.2.4 Erfassung und Einführung von Produktentstehungsprozessen

Um eine Methodik strukturiert und systematisch anpassen zu können, erstellte Wach [141] einen Vorgehensplan für Aufbau, Anpassung und Einführung einer Methodik. Dieser beinhaltet fünf Schritte, wobei der dritte Schritt weitere vier Unterschritte beinhaltet. Die ersten beiden Schritte dienen dazu, die Notwendigkeit der Anpassung zu definieren sowie die Akzeptanz der Anpassung bei den Mitarbeitern zu erlangen. Der dritte Schritt beinhaltet die Durchführung eines Pilotprojekts. Dabei sollten folgende Punkte geklärt werden.

- Vielfalt des Entwicklerteams,
- Anforderungen an das Pilotprojekt,
- Betrachtung möglicher Projekte und anschließend
- Auswahl des Pilotprojekts.

Die Vorgehensweise des dritten Schrittes ist die Analyse der Produkterstellung (Ist-Abläufe, Schwachstellen, ...), Strukturierung der Auftragsabwicklung (betriebsspezifische Sachinformationen, Dokumente, ...), Aufbau und Anpassung der Methodik (Standardvorgehenspläne, bekannte Methoden, ...) als Anregung für die Anpassung und der Test der neuen Methodik. Der vierte Schritt beinhaltet Einführungsmaßnahmen, z.B. Schulungsmaßnahmen, der letzte Schritt definiert die Einführung selbst [41], [141]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die Entwicklung eines neuen bzw. angepassten PEP ein Pilotprojekt notwendig ist und dieses genau analysiert und dokumentiert, also erfasst werden muss. Für das Erfassen stellt Ponn [142] in seiner Arbeit einen tabellarischen Überblick von Erfassungsmethoden dar. Dabei bezieht er sich auf diverse Autoren und zeigt die Vor- sowie Nachteile anhand der in Tabelle 7 dargestellten Punkte auf.

Tabelle 7. Methoden zur Erfassung von Entwicklungsprozessen nach [141].

Kategorie	Einzelmethoden	Vorteile und Nachteile
Beobachtung	unstrukturiert vs. strukturiert, begleitend vs. teilnehmend	Vorteil: detaillierte Prozessanalyse, Erfassung in Echtzeit Nachteile: zeitintensiv, geschulte Beobachter notwendig, Gefahr zur Subjektivität
Echtzeiterfassung	Videe-/ Tonbandaufnahme, „lautes Denken“, Logfile-recording	Vorteile: sehr detaillierte Prozessanalyse, Erfassung in Echtzeit Nachteil: hoher Aufwand, nur für kurze Zeiträume geeignet
Befragung	Interview (unstrukturierte vs. strukturiert), Fragebögen	Vorteil: gezielte Ansprache von Themen, keine Störung des Prozesses Nachteile: Lücken, Wahrnehmungsabhängigkeit
Retrospektive Dokumente	Protokolle, Projektberichte, Arbeitsdokumente	Vorteile: umfangreiches Datenmaterial, keine Störung des Prozesses Nachteile: Lücken, Verfälschungen, keine Datenerfassung in Echtzeit

Die **Beobachtung** ist eine der wichtigsten Methoden zur Erfassung von Entwicklungsprozessen, da sie es ermöglicht, Verhaltensweisen, Interaktionen und Prozesse in natürlicher Umgebung zu beobachten und zu dokumentieren [143]. Durch die Beobachtung kann herausgefunden werden, wie sich Menschen in bestimmten Situationen verhalten und wie sich ihr Verhalten im Laufe der Zeit verändert [143]. Dabei können verschiedene Formen der Beobachtung eingesetzt werden, z. B. die systematische und unsystematische Beobachtung, die teilnehmende, moderate und nicht-teilnehmende Beobachtung oder die offene und verdeckte Beobachtung [144], [145].

Es gibt diverse Verfahren, um die Inhalte von Entwicklungsprozessen in **Echtzeit** zu erfassen. Hierzu gehören bspw. Video- oder Tonbandaufnahmen, welche dann sinnvoll sind, wenn Entwicklungsprozesse innerhalb eines begrenzten Zeitraums mit einer hohen Auflösung analysiert werden sollen. Eine Möglichkeit zur Verwendung von Tonbandaufnahmen ist die Anwendung des „lauten Denkens“ der Konstrukteure, welche in der Arbeit von Blessing [146] beschrieben wird. Tang und Leifer [147] nutzten einen videobasierten Ansatz zur Erfassung von Entwicklungsaktivitäten in Gruppen. Im Unterschied zu teilnehmender Beobachtung oder dem lauten Denken ist ihre Methode der Erfassung weniger reaktiv, da Konstrukteure und Beobachter in separaten Räumen agieren und die Kameras so platziert sind, dass sie den Entwicklungsprozess nur unerheblich stören [142]. Allerdings eignet sich diese Art der Prozesserfassung nur für kurze Konstruktionsprozesse in Laborumgebungen mit einzelnen Probanden, da der Aufwand hoch und somit nicht sehr praktikabel ist.

Es gibt verschiedene Arten von **Befragungen**, die durchgeführt werden können. Eine Möglichkeit ist die schriftliche Befragung, bei der Teilnehmende einen Fragebogen mit vordefinierten Antwortmöglichkeiten ausfüllen. Alternativ können mündliche Befragungen durchgeführt

werden, bei denen die Fragen entweder unstrukturiert oder halb- bzw. voll strukturiert gestellt werden. Bei einem unstrukturierten Interview wird nur der allgemeine Themenbereich vorgegeben, während der Gesprächsverlauf frei gestaltet werden kann. Bei einem vollständig oder semi-strukturierten Interview sind die Fragen dagegen genauer vorgegeben, entweder teilweise oder komplett mit einem festgelegten Wortlaut und einer bestimmten Reihenfolge [148], [149].

Bei der **retrospektiven Dokumentation** handelt es sich um eine Methode, die häufig in der Produktentwicklung eingesetzt wird. Bei dieser Methode werden bestehende Dokumente, wie bspw. Protokolle, Pläne, Berichte und E-Mails, rückblickend auf Informationen durchsucht, die für eine spezifische Frage- und Aufgabestellung relevant sind. Im Kontext der PEP erwähnen Stauffer et al. [150], dass die Vorteile insbesondere die einfache Implementierbarkeit, Prozesssicherheit und Menge des Datenmaterials sind. Die retrospektive Dokumentation hat jedoch auch einige Nachteile, die es zu beachten gilt. Einer der größten Nachteile ist, dass die Inhalte der Dokumentation stark von der Wahrnehmung und Erinnerung der protokollierenden Personen abhängig sind [151]. Es kann daher zu Verzerrungen und Unvollständigkeiten in der Dokumentation kommen. Außerdem bietet die retrospektive Dokumentation in der Regel eher Zusammenfassungen als detaillierte Informationen, was eine Einschränkung in der Genauigkeit der Dokumentation darstellt. Je nachdem, wie viel Zeit seit dem Ereignis vergangen ist, können Erinnerungslücken entstehen, welche die Qualität der Dokumentation weiter beeinträchtigen können [151]. Ein weiterer Nachteil der retrospektiven Dokumentation ist, dass sie u. U. ein falsches Bild von einem Ereignis vermitteln kann. Es kann passieren, dass der Bericht ein gut geplantes Vorgehen beschreibt, das ohne größere Zwischenfälle in die Praxis umgesetzt werden konnte, obwohl der reale Prozess in Wirklichkeit von vielen Iterationen und kurzfristig ad hoc geplanten Aktionen geprägt war [150], [151]. Schließlich kann die retrospektive Dokumentation auch von persönlichen Meinungen und Vorurteilen der protokollierenden Personen beeinflusst sein, was zu einer mangelnden Objektivität führen kann.

2.2.5 Vorgehen zur Optimierung von Entwicklungsprozessen

Nach Ehrlenspiel und Meerkamm [41] gilt es vorerst Schwachstellen zu entdecken. Dafür wird eine Analyse der Ist-Situation in der Konstruktion und Entwicklung vorgeschlagen. Jedoch wird gleichzeitig erwähnt, dass neben einer Ist-Situation auch Soll-Größen gegenübergestellt werden müssen. Diese Gegenüberstellung ist jedoch schwierig und wird damit begründet, dass sogar eine genaue Beurteilung des Ist-Zustandes mit statistischen Durchschnittsdaten kaum

möglich ist. Es fehlt also eine genaue Vergleichsgröße (Soll-Größe), um die Ist-Situation der Entwicklung zu vergleichen. Daher wird auf den Kennzahlenkompass vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) [41] verwiesen, welcher einen allgemeinen Stand und Kennzahlen für diverse Unternehmensbereiche vorgeben kann. Einige der Richtgrößen des VDMA sind:

- **Entwicklungs- und Konstruktionskosten:** Bezogen auf die Gesamtkosten sollten die Kosten für die Entwicklung durchschnittlich 10,2% ergeben. Der Durchschnitt besteht aus 6,1% Kosten bei Großserien und 12,7% Kosten bei Einzelfertigung.
- **Personalanteil in Entwicklung und Konstruktion:** Bezogen auf die Gesamtmitarbeiterzahl sollte die Anzahl im Durchschnitt bei 13% liegen. Der Durchschnitt beträgt 6,3% bei Großserie und 17,2% bei Einzelfertigung.
- **Kostenstruktur in Entwicklung und Konstruktion:** 69,1% Personalkosten, 5,8% EDV-Kosten (davon 71,6% für CAD), 4,9% Materialkosten, 4,5% Fremdvergabe, 4,7% Raumkosten und 1,6% Reisekosten.
- **Beschleunigungsfaktor durch CAD:** 1,4 bei Neukonstruktion, 2,3 bei Anpassungskonstruktion und 3,0 bei Variantenkonstruktion

Diese Werte bilden nur Richtwerte und Unternehmen sollten diese als Orientierungshilfe betrachten. Es ist wichtig, die spezifischen Anforderungen jedes Projekts zu berücksichtigen und flexibel zu sein, um auf Veränderungen zu reagieren und innovative Ansätze zu verfolgen. So kann es bspw. durchaus Sinn machen, höhere Entwicklungskosten für ein Projekt mit einem hohen Innovationsgrad zu akzeptieren. Dieser Punkt kann insbesondere für iMST sehr zutreffend sein.

Ferner empfehlen Ehrlenspiel und Meerkamm [41] die Analyse von Schwachstellen durch Interviews von Mitarbeitern, da auftretende Mängel am ehesten den Betroffenen bekannt sind. Diese lässt sich gut mit einer Ist-Analyse kombinieren. Eine grundsätzliche Vorgehensweise zur Rationalisierung bzw. Optimierung und Analyse von Schwachstellen zeigt Abbildung 39.

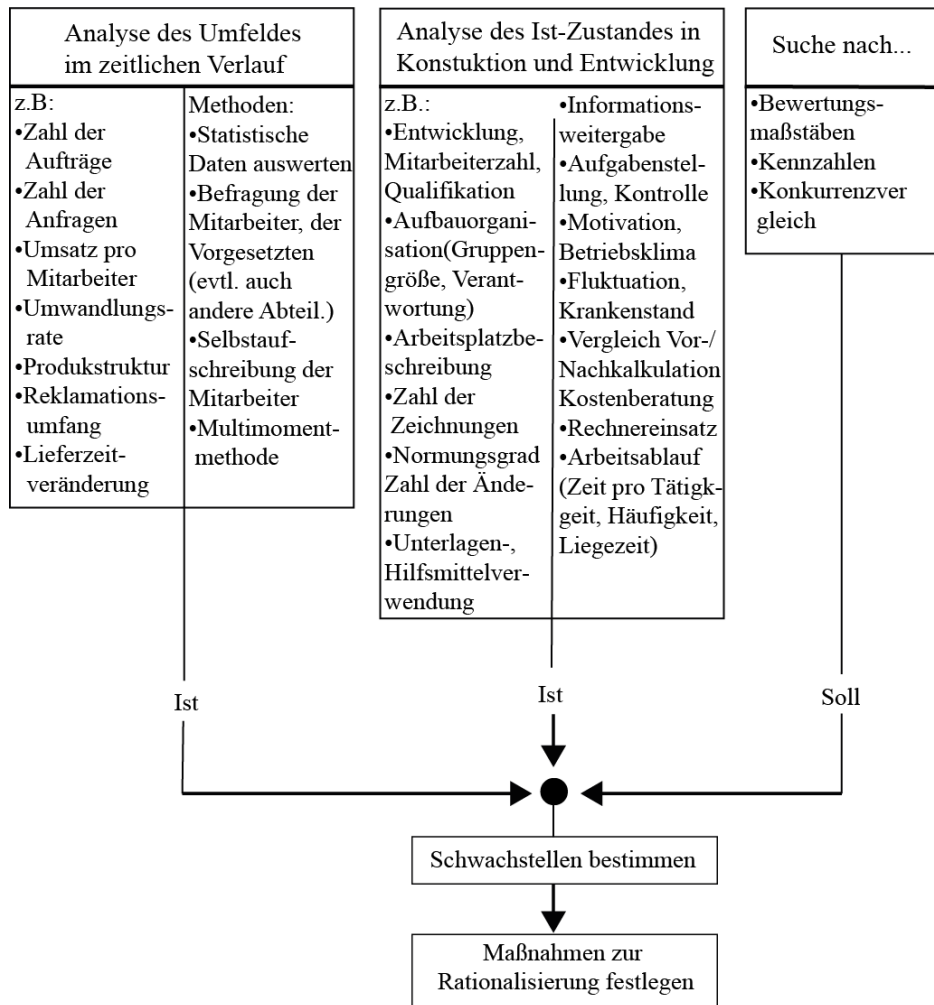


Abbildung 39: Vorgehensweise zur Rationalisierung in der Entwicklung nach [40].

Wenn es darum geht, PEP grundsätzlich zu optimieren bzw. effizienter zu gestalten, also unabhängig davon, ob es offensichtliche Schwachstellen gibt, so ist der Lean-Development-Ansatz eine effektive und effiziente Vorgehensweise [152]. Ward [152] empfiehlt, im Kontext der Produktentwicklung das LAMDA-Prinzip anzuwenden, welches wie folgt definiert wird:

- Look (selber die Prozesse anschauen)
- Ask (nach den wahren Ursachen Fragen)
- Model (die Dinge modellieren)
- Discuss (mit den entsprechend Personen sprechen)
- Act (eigenes Verständnis experimentell testen)

Auch in diesem Ansatz ist die Bestimmung eines Ist-Zustandes obligatorisch [153]. Im Lean-Development wird diesbezüglich von *Current State Map* (CSM) gesprochen. Es wird empfohlen, den Weg der produzierten Informationseinheiten und ihrer Prozessschritte zu

folgen, um einen umfassenden Überblick über den Wertstrom der Produktentwicklung zu erhalten. Hierfür kann ein sogenannter Gemba-Rundgang genutzt werden, der es den beteiligten Personen ermöglicht, die Produktionsstätte zu besichtigen und einzelne Schritte des Wertstroms zu betrachten. Diese Methode kann dazu beitragen, Schwachstellen im Wertstrom zu identifizieren und Verbesserungsmöglichkeiten aufzudecken. Die folgende Abbildung 40 zeigt die CSM.

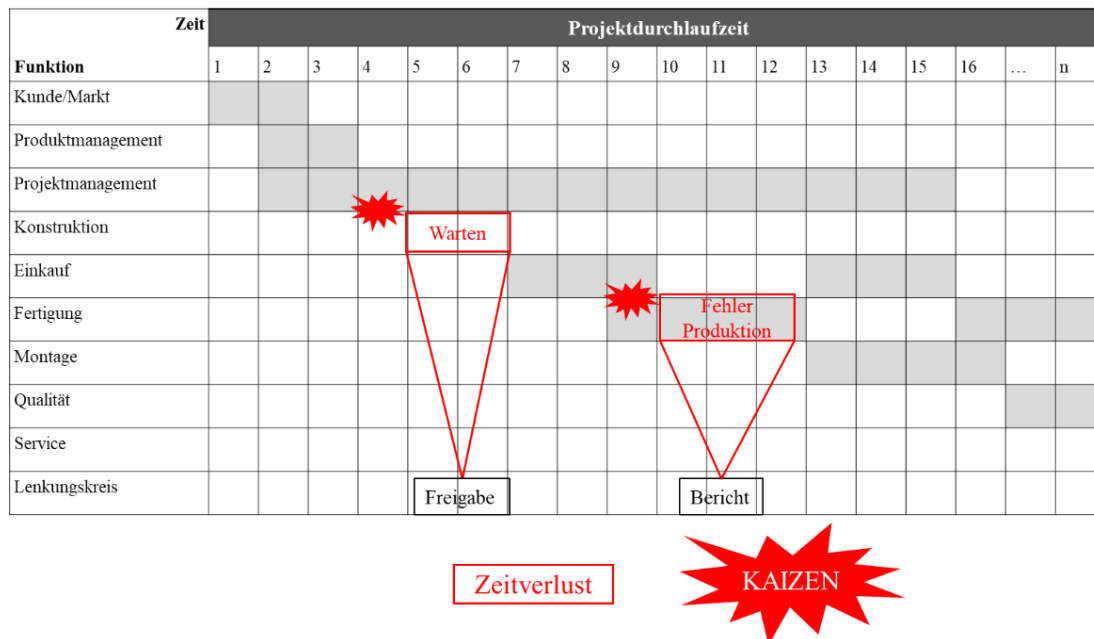


Abbildung 40: Current State Map im Lean Development nach [152].

Hierbei sind die sternförmigen Markierungen entscheidend, da diese die erkannten Verbesserungspotenziale visualisieren. Oft wird vom CSM auch der Wertstromquotient (WQ) als ein Indikator für die Performance als Prozess verwendet. Dieser ist in Formel 4 definiert.

Formel 4: Wertestromquotient zur Performance-Messung von Prozessen nach [153]

$$WQ = \frac{PZ}{DLZ}$$

Dabei steht PZ für Prozesszeit und definiert sich als die Zeit, welche für die tatsächliche Wertschöpfung innerhalb eines Prozesses in Anspruch genommen wird. DLZ wird definiert als die Durchlaufzeit, welche für den Prozess als die insgesamt benötigte Zeit steht (siehe auch Abbildung 41).

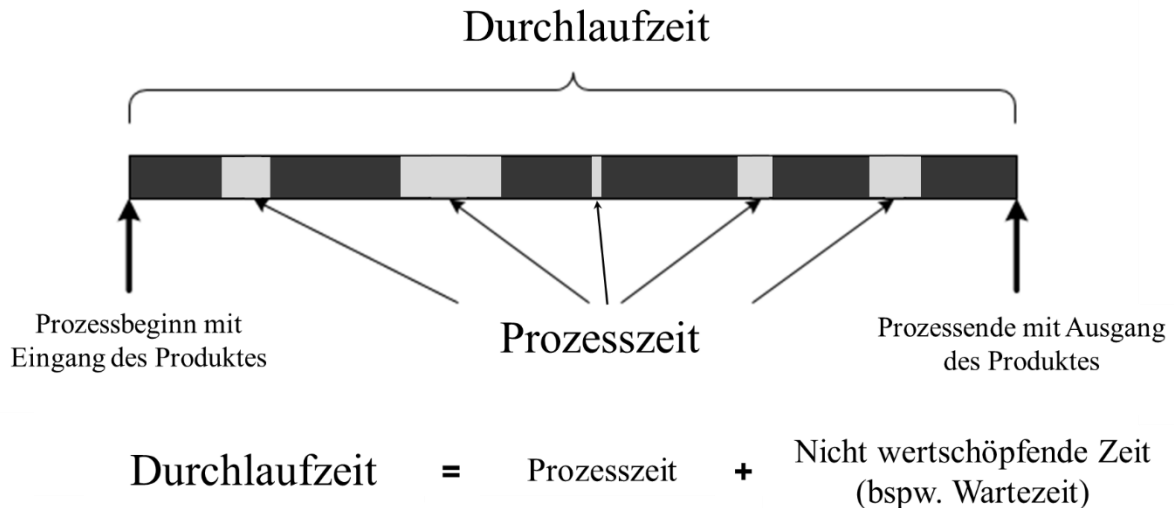


Abbildung 41: Zusammenhang zwischen Durchlaufzeit und Prozesszeit.

2.3 Produktentwicklungsmethoden

2.3.1 Relevanz für den Einsatz von PEM

Unumstritten ist die Wirksamkeit und Notwendigkeit von PEM, die durch überwiegend empirische Studien gezeigt werden konnte [154]–[156], obwohl es erfolgreiche Unternehmen gibt, welche die Nutzung von Methoden möglichst vermeiden, wobei dies auf eine überdurchschnittlich hohe Kompetenz von einzelnen Mitarbeitern zurückgeführt wird [41]. Schwierig zu untersuchen, jedoch praktisch von großer Bedeutung, ist die Fragestellung nach dem Erfolg von kombinierten Methoden [156], [157]. Inzwischen steht Unternehmen eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, um Neuprodukte technisch ausgereift und kaufmännisch erfolgreich bis zur Markteinführung zu entwickeln. Diese Methoden können direkt einzelnen Unternehmensfunktionen zugeordnet werden, bspw. dem Einkauf oder der Forschungs- und Entwicklungsabteilung. Aber auch funktionsübergreifend werden diese genutzt, wie bspw. im Rahmen eines Produktbenchmarks, bei dem die Funktionen Forschung und Entwicklung, Einkauf sowie Controlling gemeinsam Konkurrenzprodukte vergleichen. Des Weiteren werden die Methoden in den unterschiedlichen Prozessschritten innerhalb des PEP eingesetzt. Dabei nutzen die einzelnen Funktionen die Methoden insbesondere dazu, um spezifische Ziele zu erreichen, bspw. die beste technische Lösung in der Produktion oder minimale Kosten im Einkauf [158]. Durch einen strukturierten Einsatz von Methoden in der Produktentwicklung können Unternehmen neue Ideen generieren und ihre Innovationsfähigkeit steigern sowie die Komplexität von Produktneuentwicklungen reduzieren [159], [160].

Aufgrund der Vielzahl an PEM ist eine pauschale Aussage über die Kausalität des Unternehmenserfolgs nicht möglich. Unter anderem deshalb wurden Studien durchgeführt, welche die Nutzung und Häufigkeit von einzelnen PEM in Unternehmen untersucht haben [45], [114] (siehe Abbildung 42).

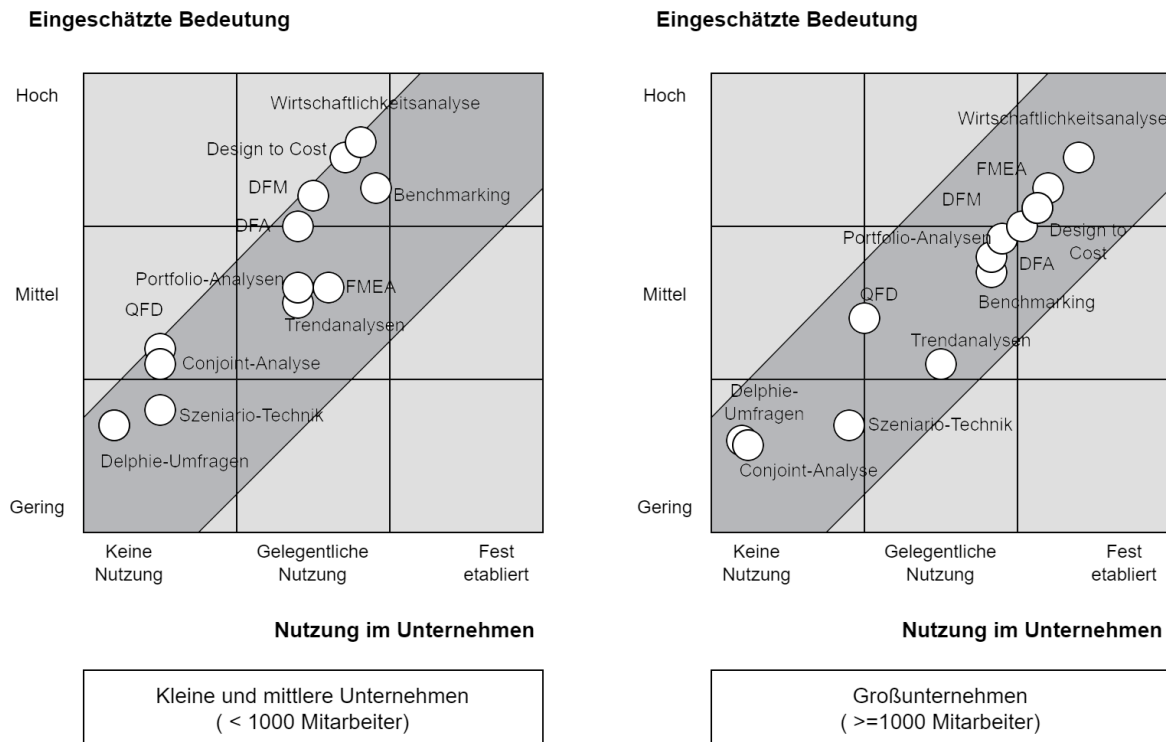


Abbildung 42: PEM nach ihrer Nutzung und Bedeutung nach [44], [113].

Weitere Zusammenhänge und Abhängigkeiten bei der Nutzung von Methoden wurden von Gausemeier [45] wie folgt erwähnt:

- Unternehmensgröße
- Kurz- oder langfristige Ziele
- Strategisch oder operativ

Dabei werden die Methoden auf operativer Ebene häufiger eingesetzt und haben eine größere Bedeutung für Unternehmen haben. Wie aus Abbildung 42 deutlich wird, kann gesagt werden, dass die Wirtschaftlichkeitsanalyse und die DfX-Methoden sowohl für Klein- als auch Großunternehmen die größte Bedeutung haben. Des Weiteren wird im Kontext der Individualisierung erwähnenswert, dass Methoden häufiger in größeren Unternehmen und solchen mit Serienproduktion angewendet werden [8].

Da diese Arbeit das Ziel verfolgt, Methoden bzw. Werkzeuge zu entwickeln und einzusetzen, sind die Gründe, die gegen einen Methodeneinsatz sprechen, wichtig zu erläutern. Hierfür gibt es einige Untersuchungen, die folgende Gründe herausfinden konnten [45], [157], [161], [162]:

- Fehlende Unterstützung durch das Management
- Fehlendes Methodenwissen (keine Erfahrung)
- Zeitmangel
- Kosten für den Methodeneinsatz
- Beharrungsvermögen des Mitarbeiters

Gausemeier [45] konnte zusätzlich durch eine Befragung von 65 Unternehmen noch zeigen, dass Zeitdruck den am häufigsten genannten Grund für eine fehlende Anwendung von Methoden darstellt. Folglich muss beachtet werden, dass Methoden und Werkzeuge intuitiv und unkompliziert für den Anwender bereitgestellt werden. Einen Idealzustand der Nutzerfreundlichkeit von Methoden beschreibt Lindemann [163], in Anlehnung an die EN ISO 9241-110 [163], mit folgenden Aspekten:

- Aufgabenangemessenheit
- Individualisierbarkeit
- Erwartungskonformität
- Selbstbeschreibungsfähigkeit
- Steuerbarkeit
- Fehlertoleranz
- Lernförderlichkeit

Die Hauptgründe, weshalb PEM mittlerweile immer wichtiger werden, sind vor allem die drastische Informationszunahme, erhöhte Vielfalt von Produktvarianten, vermehrte Entstehung von komplexen Systemen, Zeitdruck und Flexibilität in der Produktion [41]. Bereits aus früheren Studien ist bekannt, dass ein Konstrukteur 20 – 30% seiner Zeit in die Informationsbeschaffung investiert [164]. Aufgrund der heutigen Informationsvielfalt lässt sich vermuten, dass die für die Informationsbeschaffung verwendete Zeit weit höher liegen muss. Werden die Charakteristiken von iMST betrachtet, spiegeln sich genau diese Aspekte wider (siehe Abbildung 43). iMST sind aufgrund ihrer domänenübergreifenden Komponenten durchaus komplexe Systeme. Die Produktvariation läuft gegen unendlich, wobei das iMST noch relativ schnell hergestellt werden soll, da Kunden dies zunehmend anfordern. Darüber

hinaus muss die Flexibilität naturgemäß für individualisierte Produkte generell gegeben sein. Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass die Methodenanwendung eine wichtigere Rolle als bei „klassischen“ Produkten spielt.

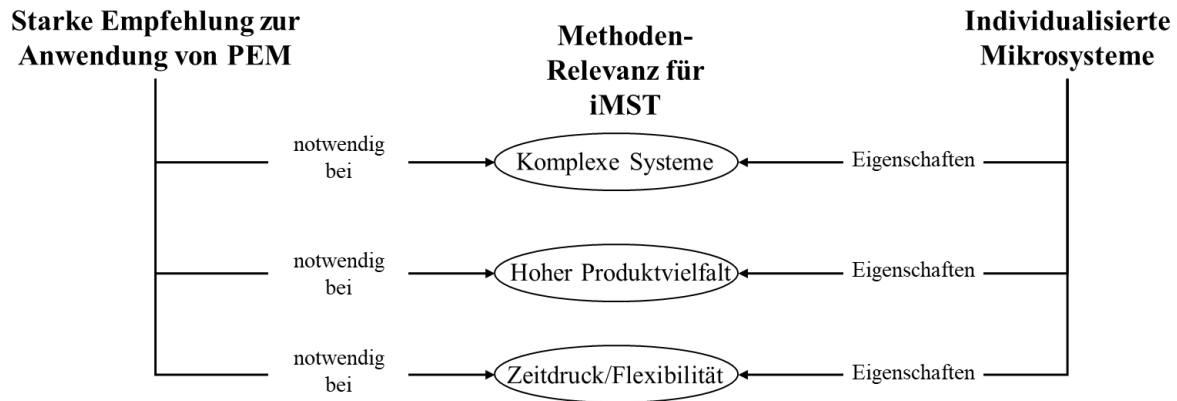


Abbildung 43: Methoden-Relevanz für iMST.

2.3.2 Mögliche PEM zur Qualitätssicherung und Fertigbarkeit

Verschiedene Untersuchungen belegen, dass es eine Vielzahl an PEM gibt, bspw. zeigt die von Graner [158] durchgeführte Arbeit, welche zudem eine systematische Literaturanalyse enthält, dass es ca. 70 PEM gibt, wobei die 70 Methoden aus den ursprünglich identifizierten 534 Methoden anhand von bestimmten Kriterien gefiltert wurden. Je nach Schwerpunkt und primären Aufgaben der Methoden wurden diese in die folgenden sechs Kategorien unterteilt [158]:

1. Kundenintegration, etwa Conjoint-Analyse
2. Forschung und Entwicklung, etwa Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ)
3. Qualität und Logistik, etwa Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)
4. Einkauf, etwa Target Costing
5. Projektmanagement, etwa Critical-Path-Methode
6. Übergreifende Methoden, etwa morphologischer Kasten oder SWOT-Analyse

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass es viele verschiedene Möglichkeiten gibt, Methoden zu kategorisieren. Diese Kategorien können je nach Kontext und Zielsetzung variieren. So ist etwa die Kategorisierung nach den Phasen der Produktentwicklung möglich, wie es bspw. Ulrich und Eppinger [17] oder Pahl und Beitz [112] gemacht haben.

Gerade für iMST können qualitätssichernde und fertigungstechnische Themen bzw. präventive Maßnahmen zur Absicherung der Entwicklungsziele von essentieller Bedeutung sein. Um mögliche PEM für die Produktentwicklungsmethodik von iMST identifizieren und anschließend den PEP zuordnen zu können, wird im Folgenden auf diese genauer eingegangen. Ein Beispiel hierfür gibt Ponn [165], indem qualitätssichernde und fertigungsspezifische Methoden zur Entwicklungsabsicherung dem V-Modell zugeordnet werden (siehe Abbildung 44).

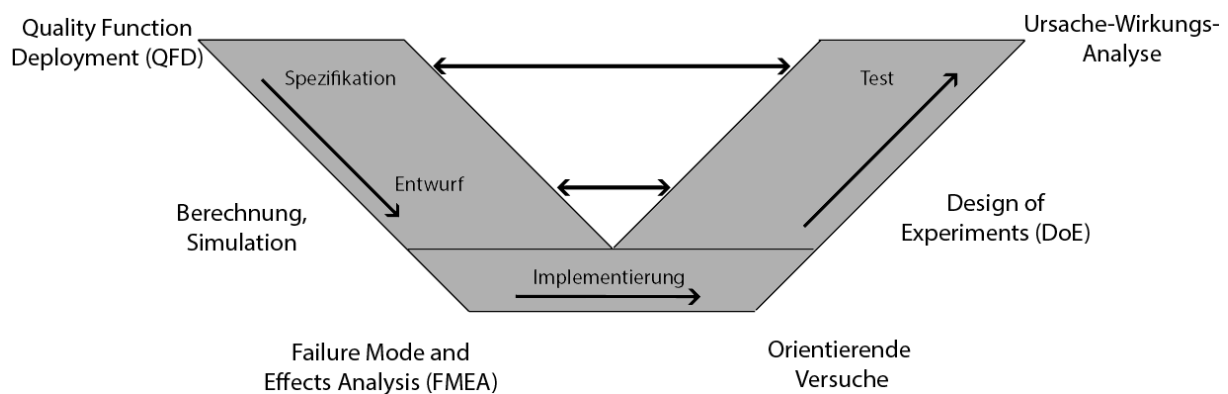


Abbildung 44: V-Modell mit integrierten Methoden zur Zielabsicherung nach [164].

Die **FMEA** ist dabei eine weit verbreitete und in der Industrie sehr bekannte Methode zur Risikobewertung und Fehlervermeidung in der Produktentwicklung (siehe bzgl. der Häufigkeit Abbildung 42). Sie wird häufig eingesetzt, um potenzielle Fehler und Schwachstellen in einem Produkt oder Prozess zu identifizieren und zu bewerten, bevor diese auftreten [166]. Die FMEA-Methode ist in verschiedenen Industriezweigen weit verbreitet, insbesondere in der Automobilindustrie und der Luftfahrtindustrie [167]. Sie wird jedoch auch in anderen Bereichen wie der Medizintechnik, der Elektronikindustrie und der Lebensmittelindustrie eingesetzt.²² Die FMEA-Methode ist in der DIN-25448 Norm festgehalten und wird oft als Teil des Qualitätssicherungsprozesses verwendet. Die Methode bezieht sich auf die systematische Untersuchung von möglichen Ausfallursachen und deren Auswirkungen auf das Produkt oder den Prozess. Die FMEA bietet einen strukturierten Prozess, der von einem interdisziplinären Team durchgeführt wird und aus verschiedenen Schritten besteht, z. B. der Identifizierung von potenziellen Fehlerursachen und deren Folgen, der Bewertung der Schwere der Auswirkungen, der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens sowie der Festlegung von Maßnahmen zur Vermeidung oder Minimierung von Risiken [169]. Durch die systematische Anwendung dieser

²² Siehe bspw. ISO 14971 [168]

Methode können potenzielle Probleme im Vorfeld identifiziert und behoben werden. Zusammenfassend können die folgenden Schritte für die Umsetzung dieser Methoden definiert werden:

1. Produkt bestimmen
2. Funktionen darstellen
3. Fehler analysieren
4. Risiko bewerten
5. Maßnahmen festlegen

Für den vierten Schritt wird die Risikoprioritätszahl (RPZ) berechnet. Diese Zahl ist das Produkt aus Auftrittswahrscheinlichkeit (A), Bedeutung (B) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E in %), wie die folgende Formel 5 zeigt.

Formel 5: Berechnung der Risikoprioritätszahl

$$RPZ = A * B * E$$

Dabei gilt: $RPZ = 1 \rightarrow$ kein Handlungsbedarf; $RPZ = 2 - 50 \rightarrow$ geringer Handlungsbedarf; $RPZ = 51 - 100 \rightarrow$ mittlerer Handlungsbedarf; $RPZ = 101 - 1000 \rightarrow$ hoher Handlungsbedarf

Weitere Methoden zur Qualitätssicherung sind *Design Reviews*, Fehlerbaumanalysen (FTA) und *Quality Function Deployment* (QFD). Darüber hinaus gibt es auch Methoden, die eher quantitativ sind. Zu diesen zählen u. a. die Markov-Theorie, Monte-Carlo-Simulation und das Boolesche Modell [170]. Für die Anwendung der zuletzt genannten Methoden werden mehrere Muster- und Testteile benötigt, sie eignen sich daher grundsätzlich für Serienprodukte.

In Bezug auf die Methode der Fertigbarkeit wird auch von *Design for Manufacturing* (DfM) gesprochen. Diese Methode, welche eher einer grundlegenden Idee entspricht als einer konkreten Vorgehensweise, gehört ebenfalls zu den stark verbreiteten Methoden in der Praxis (siehe Abbildung 42), wobei in diesem Zusammenhang oft der Begriff DfMA (*Design for Manufacturing and Assembly*) verwendet wird. DfMA bezieht sich auf die Integration von DfM und *Design for Assembly* (DFA), um sicherzustellen, dass das Design eines Produkts so gestaltet ist, dass es effizient und kosteneffektiv hergestellt sowie zusammengebaut bzw. montiert werden kann. Ein wichtiger Aspekt von DfM ist die Zusammenarbeit zwischen Designern und Fertigungsexperten, um sicherzustellen, dass das Design eines Produkts auf die Herstellung ausgerichtet ist [171]. Dazu gehört auch die Berücksichtigung von Materialien,

Fertigungsverfahren und den Eigenschaften des Herstellungsprozesses [171]. Es kann also dazu beitragen, die Fertigungskosten zu senken, die Durchlaufzeiten zu verkürzen und die Qualität der Produkte zu verbessern [172]. Aufgrund der bereits erwähnten starken Technologieabhängigkeit für iMST spielt die DfM-Methode eine wichtige Rolle. Unter DfM versteht man auch die Erstellung und Verwendung von Gestaltungsrichtlinien für die jeweiligen Fertigungsverfahren. DfM-Methoden sind für spezifische und einzelne Verfahren wie Spritzgießen, Blechfertigung und 3D-Druck in der industriellen Fertigung bereits verbreitet und gängige Praxis. Dazu werden die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren auf ihre Restriktionen und Möglichkeiten hin analysiert und anschließend versucht, diese in Form einer Checkliste den internen Entwicklern bereitzustellen. Allgemein unterstützende Softwarelösungen bzw. Hilfsmittel sind diesbezüglich kaum bekannt. Daher gibt es für diesen Zweck oft spezielle Lösungen und Anbieter. Das amerikanische Großunternehmen Boothroyd Dewhurst Inc. bietet eine DfMA-Softwarelösung an, die sich auf mehrere Fertigungsverfahren einzeln spezialisiert hat. Hierbei handelt es sich lediglich um mechanische Bauteile, wobei die Montage mitberücksichtigt wird. DfM-Lösungen für zusammenhängende Prozessketten und mechatronische Bauteile wurde in der Forschung noch keine große Aufmerksamkeit geschenkt.

2.3.3 Systematische Auswahl von PEM

Eine ungenaue oder unzureichende Auswahl von Methoden kann den Erfolg der Produktentwicklung negativ beeinträchtigen. Dies kann u. a. auf einen Mangel an Kenntnissen über die verfügbaren Methoden und deren Anwendungsmöglichkeiten zurückzuführen sein [173]. Braun und Lindemann [174] differenzieren drei grundlegende Mechanismen, die bei der Auswahl von Methoden in der Produktentwicklung zum Einsatz kommen können. Diese Mechanismen sind der **methodenordnende Mechanismus**, der **methodencharakterisierende Mechanismus** und der **elementarmethodische Mechanismus**.

Durch die Anwendung des **methodenordnenden Mechanismus** kann eine aufgabenspezifische Methodenauswahl erfolgen, die auf die spezifischen Anforderungen und Ziele des Produktentwicklungsprojekts abgestimmt ist. Dabei wird zunächst die zugrundeliegende Aufgabenstellung analysiert, um ein passendes Ordnungskriterium (z.B. einen Vorgehensschritt) innerhalb einer geeigneten Methodenordnung (z.B. einer Klassifizierung von Methoden nach den Phasen des Produktentwicklungsprozesses) zuzuordnen (siehe Abbildung 45).

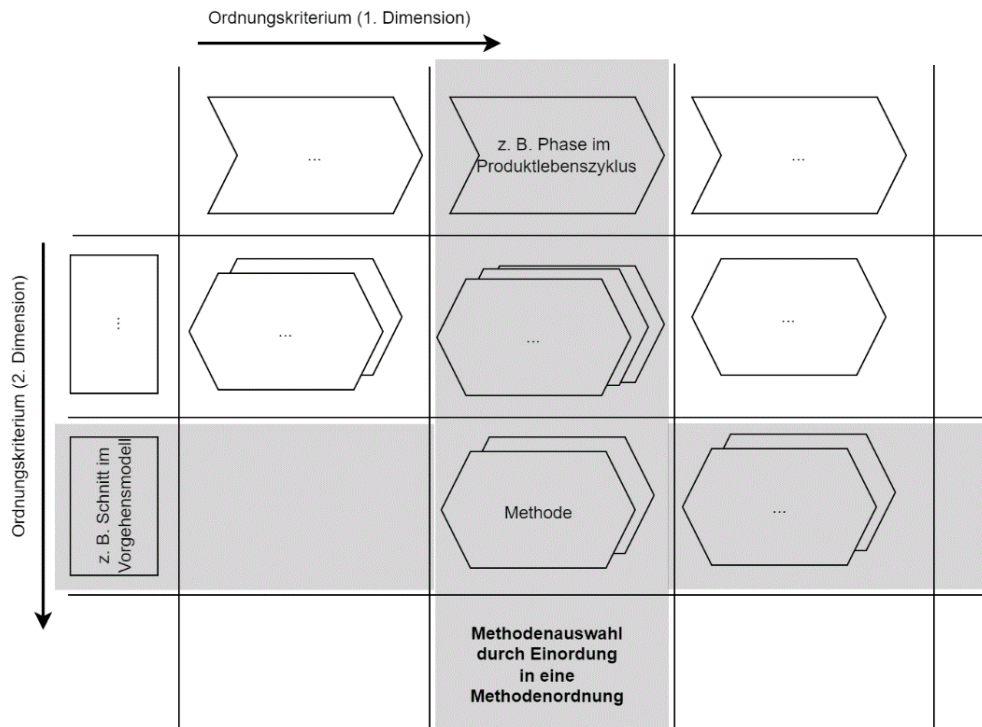


Abbildung 45: Methodenordnender Mechanismus zur Methodenauswahl nach [113].

Da Methodenordnungen oft anhand von aufgabenspezifischen Kriterien erstellt werden, handelt es sich normalerweise um eine aufgabenspezifische Auswahl von Methoden [114].

Der grundlegende Mechanismus des **methodencharakterisierenden Ansatzes** zur Methodenauswahl besteht darin, die Merkmale der Ausgangssituation, in der die Methode eingesetzt werden soll, mit den Merkmalen der verfügbaren Methoden abzugleichen (siehe Abbildung 46).

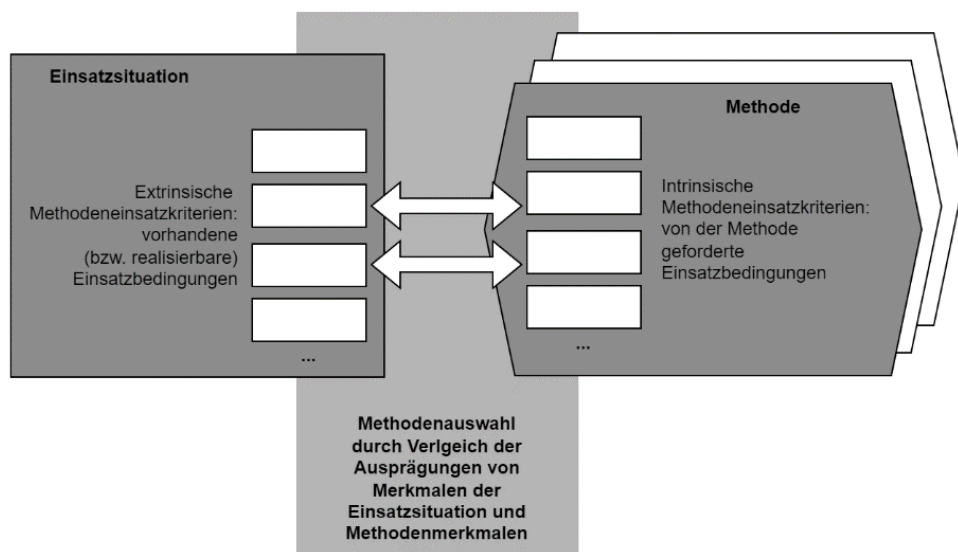


Abbildung 46: Ansatz methodencharakterisierende Mechanismus nach [113].

Hierbei werden die Merkmale der Ausgangssituation anhand von externen Einsatzkriterien, bspw. Markt, Unternehmen, Produkt, ermittelt [114]. Die Merkmale einer Methode werden durch die intrinsischen Kriterien der Methode bestimmt. Diese Kriterien beschreiben die Eignung einer Methode aus der Perspektive der Methode selbst. Intrinsische Kriterien können u. a. Zielsetzung der Methoden, Gültigkeitsbereich der Methoden (Phasen des PEP) und Anwendbarkeit sein [114]. Bei der Anwendung des methodencharakterisierenden Mechanismus zur Methodenauswahl können grundsätzlich alle Einsatzkriterien als Auswahlkriterien verwendet werden. Allerdings sind nicht alle Kriterien gleich geeignet, und je nach Einsatzbereich spielen unterschiedliche Kriterien eine Rolle. Vor allem aufgabenspezifische Kriterien wie die vorhandenen oder erforderlichen Voraussetzungen sowie ressourcenspezifische Kriterien des Methodeneinsatzes werden typischerweise als Auswahlkriterien genutzt.

Der **elementarmethodische Mechanismus** kann bspw. durch das Konzept von Zanker [175] beschrieben werden, indem vorgeschlagen wird, Methoden an eine bestimmte Aufgabenstellung und Randbedingungen anzupassen, sodass Elementarmethoden kombiniert und gleichzeitig die Merkmale der Methoden angepasst werden. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung der Methoden an die jeweilige Aufgabenstellung. Allerdings setzt dieser Ansatz voraus, dass die notwendigen Aktivitäten zur Bearbeitung der Aufgabe identifiziert und die „richtigen“ Elementarmethoden, welche diese Aktivitäten unterstützen, ausgewählt werden. Abbildung 47 verdeutlicht diesen Ansatz.

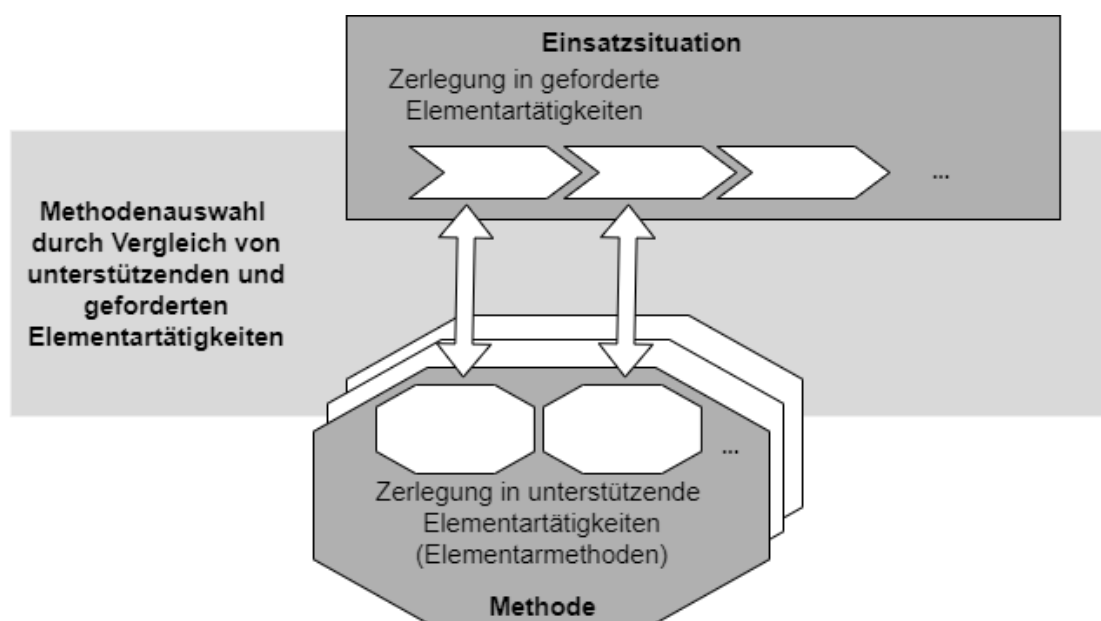


Abbildung 47: Elementarmethodischer Ansatz nach [113].

Des Weiteren wird von Ehrlenspiel und Meerkamm [41] eine Systematik dargestellt, um die optimalen Methoden für den eigenen Zweck auszuwählen. In erster Linie sind Kriterien gegeben, die zur Auswahl von Methoden wichtig sein können (siehe Tabelle 8). Diese Kriterien werden anschließend den Methoden gegenübergestellt und jeweils bewertet. Wichtig ist dabei, dass die Bewertung möglichst objektiv und messbar durchgeführt werden kann.

Tabelle 8. Kriterien zur Auswahl von Methoden nach [40].

Kriterien	Erläuterungen mit Fragen
Leistung der Methode (Zweck, Gültigkeitsbereich)	Bei welchem Prozessschritt ist die Methode nötig oder zweckmäßig (Synthese- oder Analyse-methode)? Welche Eingangs- und Ausgangsinformationen werden benötigt?
Anwendbarkeit und verfügbare Zeit, Kosten	Ist die Zeit für das Lernen der Methoden vorhanden? Sind die Informationen bzw. Kompetenzen vorhanden?
Betriebliche Eignung	Ist die Methode im Unternehmen bekannt? Kann sie alleine oder in Gruppenarbeit eingesetzt werden? Gibt es einen Ansprechpartner für die Methode?
Persönliche Voraussetzungen	Für welchen Mitarbeiter bzw. für welchen Bereich ist die Methode angedacht? Was ist der Hintergrund des Mitarbeiters?
Verfügbare Hilfsmittel	Sind die nötigen Hilfsmittel wie Hard- und Software oder Messeinrichtungen vorhanden?

Angesichts der erläuterten Verfügbarkeit systematischer Auswahlverfahren für PEM kann der vorausgesetzte Schritt erläutert werden, welcher die Sammlung von PEM ist. Die vorliegende Arbeit bezieht sich prinzipiell auf drei spezifische Domänen, Individualisierung, MST und digitale Fertigungsverfahren. Daher werden in den nachfolgenden Kapiteln bekannte PEM für jede dieser Domänen aus der Literatur zusammengetragen.

2.3.4 PEM und Ansätze für die Produktindividualisierung

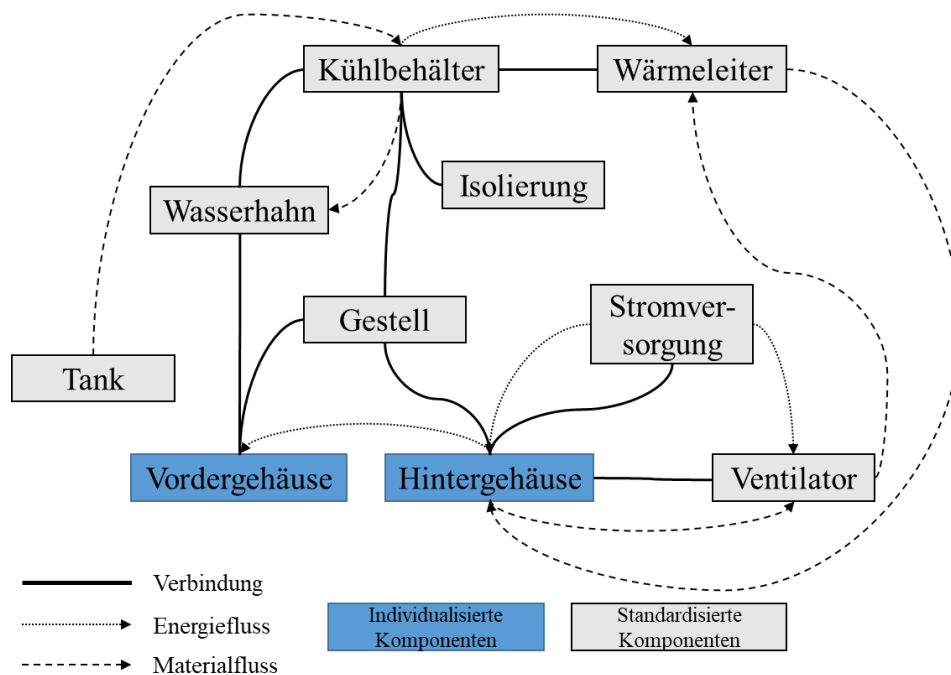
Ein für die individualisierten Produkte generell entwickelter Ansatz innerhalb der Entwicklung ist das sogenannte *User-Centered Design* (UCD). Im Wesentlichen handelt es sich bei UCD um einen Gestaltungsansatz, bei dem der (künftige) Nutzer im Mittelpunkt steht, indem er systematisch in den Entwicklungsprozess eingebunden wird. Dabei werden die Bedürfnisse, Wünsche und Anforderungen von Kunden erfasst und in die Produktentwicklung integriert. Der

Kunde ist dabei in allen Phasen der Systemgestaltung involviert [176]. Für den UCD-Ansatz beschreiben die Erfinder des Ansatzes fünf wesentliche Prinzipien [177]:

1. **Planung:** In dieser Phase werden Aktivitäten im UCD-Prozess für ein System geplant und aufeinander abgestimmt.
2. **Nutzungskontext:** In dieser Phase wird der Anwendungsbereich (Kontext) des potenziellen Nutzers untersucht.
3. **Anforderungserhebung:** In dieser Phase werden die Anforderungen an das Systemdesign von relevanten Quellen (z.B. potenziellen Nutzern) erhoben und in Anforderungen umgesetzt.
4. **Entwurf:** In dieser Phase wird das System entworfen.
5. **Bewertung:** In dieser Phase wird das System evaluiert, um Anregungen für die Neugestaltung zu erhalten (formative Evaluation) oder um seine Wirksamkeit und Benutzerfreundlichkeit zu bewerten (summative Evaluation).

Dieser Entwicklungsprozess sollte nicht als Wasserfallprozess betrachtet werden, bei dem die Phasen abgeschlossen sind und nicht wieder durchlaufen werden müssen. Stattdessen ist der Prozess, wie im dritten UCD-Grundsatz dargelegt, iterativ, und wenn nötig sollten Designer zu früheren Phasen zurückkehren, wenn die Situation dies erfordert [176]. Wenn ein Entwicklungsteam z. B. feststellt, dass eine Anforderung aufgrund der Ergebnisse der formativen Evaluation angepasst werden muss, sollte es nach dem UCD-Ansatz zur Anforderungsphase zurückkehren.

Holle et al. [178] entwickelten Methoden zur Individualisierung, indem sie die Herausforderungen von individualisierten Produkten im Vergleich zu Massenprodukten aufzeigen und entsprechende methodische Maßnahmen ableiteten. Dabei wird von einem dreistufigen Ansatz zur Veränderung der Produktarchitektur innerhalb der Produktindividualisierung gesprochen (siehe Abbildung 48). Diese umfasst die „Modularisierung von individualisierbaren Produktkomponenten“, „Definition einer Rahmenkomponente“ und „Integration von Schnittstellen“. Dies soll dem Kunden ermöglichen, den Lösungsraum zu maximieren und ihm den höchsten Grad an Produktindividualisierung zu bieten.



Kajtaz et al. [179] betonen die Bedeutung einer Anforderungserhebung für personalisierte Produkte und zeigen, wie subjektive Anforderungen des Kunden für die Produktentwicklung erfasst und quantifiziert werden können. Der Ansatz, ein individualisiertes Produkt zu entwerfen und zu entwickeln, ist in Abbildung 49 schematisch dargestellt. Bei diesem Ansatz werden die funktionalen und semantischen Elemente im Designprozess gleichzeitig ausgeführt, wobei das funktionale Design Aktivitäten wie Zertifizierung, maßgeschneiderte Formgebung und Größenbestimmung sowie Materialexploration umfasst, während das affektive/semantische Design die Aspekte des ästhetischen Eindrucks, der semantischen Interpretation und der symbolischen Assoziation im Design behandelt. Diese beiden parallelen Ströme laufen in der Herstellungsphase zusammen, wobei der semantische Designstrom mit dem endgültigen Designkonzept und der funktionale Designstrom mit dem Know-How beiträgt. Obwohl drei unterschiedliche Abschnitte identifiziert werden, sind sie nicht unabhängig. Übertragungen von Konzepten über die gestrichelten Grenzen im Schema sind unvermeidlich. Bei diesem Ansatz basiert die Herstellung auf einem kostengünstigen Werkzeug, das die Zusammenführung von *Prototyping* und Produktion ermöglicht, was zu einer schlankeren Entwicklung führt. Allerdings weist die Methodik auch drei ausgeprägte Korrekturschleifen auf, welche die Entwicklung behindern können, wenn sie nicht richtig koordiniert werden.

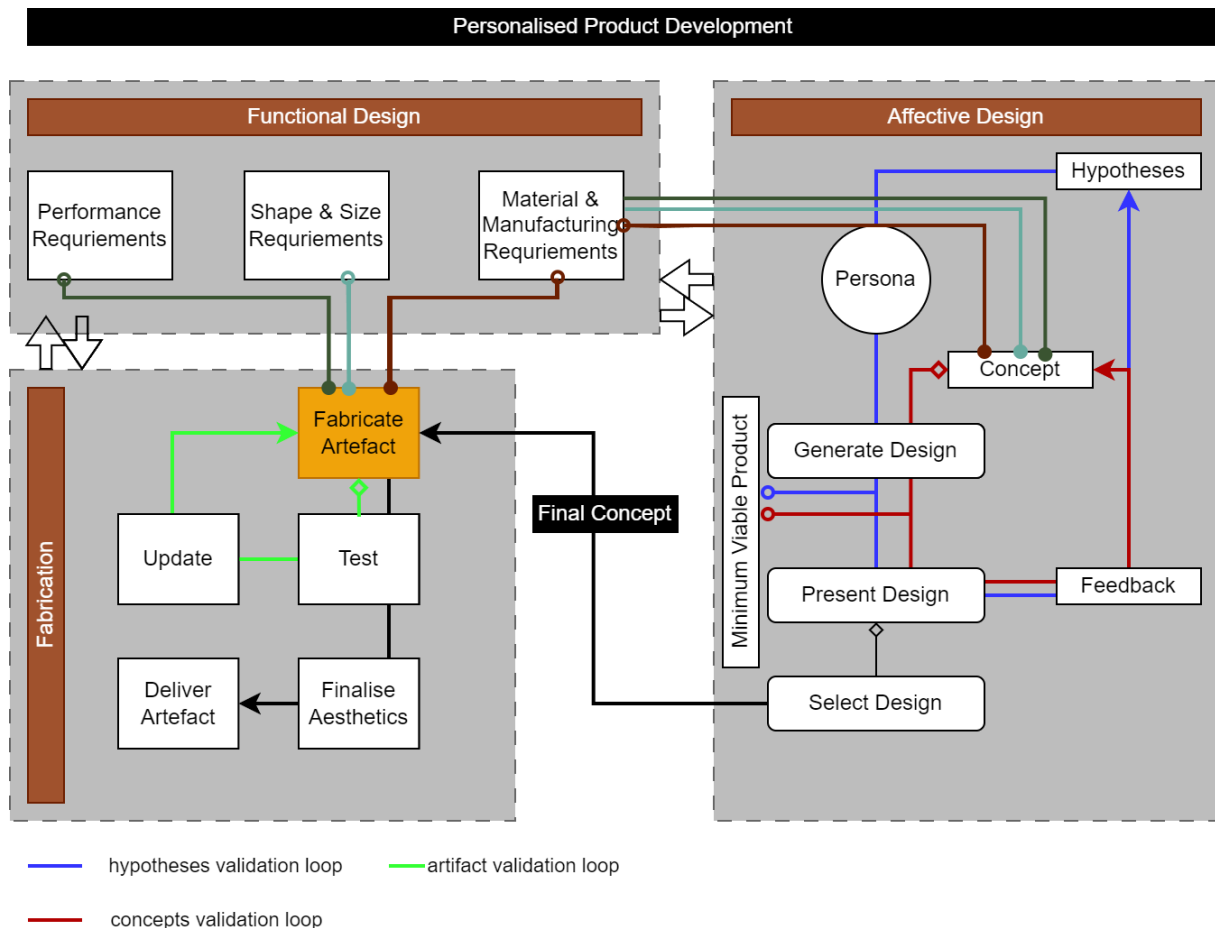


Abbildung 49: Schematischer Ansatz zur Entwicklung eines individualisierten Produktes nach [178].

Beim *Affective Design* geht es darum, ein Produkt so zu gestalten, dass es bestimmte Emotionen bei den Nutzern auslöst. Um dies zu erreichen, werden verschiedene Schritte durchgeführt [179], [180]:

1. **Persona-Hypothesis-Driven Experimentation:** Hierbei wird ein fiktiver Nutzer (Persona) erstellt und verschiedene Hypothesen darüber aufgestellt, welche Emotionen dieser Nutzer bei der Nutzung des Designs empfinden könnte.
2. **Iterative Concept Releases:** Es werden verschiedene Entwürfe (Konzepte) des Designs erstellt und veröffentlicht, um zu sehen, welche Emotionen sie bei den Nutzern auslösen.
3. **Validated Learning:** Durch die Beobachtung der Nutzerreaktionen auf die verschiedenen Entwürfe wird validiert, ob die Hypothesen über die Persona und ihre Emotionen zutreffen.

4. **Affective and Cognitive User Feedback:** Die Nutzer geben Feedback zu ihren Emotionen und ihrer Wahrnehmung des Designs, um zu bestimmen, welche Konzepte die gewünschten emotionalen Reaktionen hervorrufen.

Insgesamt geht es beim *Affective Design* darum, ein Design so zu gestalten, dass es die gewünschten Emotionen bei den Nutzern auslöst, indem iterative Experimente und Nutzerfeedbacks verwendet werden, sodass die Hypothesen über die Nutzer und ihre Emotionen validiert und das Design entsprechend angepasst werden kann.

Innerhalb des *Affective Design* werden zwei Feedback-Schleifen beschrieben, welche für die Methode wichtig sind:

1. **Hypothesenvalidierungsschleife:** Hier werden Annahmen über die Nutzer und ihre Emotionen aufgestellt, diese Hypothesen werden durch iterative Experimente und Nutzerfeedbacks validiert.
2. **Konzeptvalidierungsschleife:** Es wird ein *Minimum Viable Product* (MVP) erstellt, also eine frühe Version des Produkts oder der Lösung, die nur die wichtigsten Funktionen beinhaltet. Diese MVP-Version wird den Nutzern präsentiert und ihr Feedback wird eingesammelt, um das Produkt oder die Lösung weiterzuentwickeln.

Weiterhin werden in diesem Ansatz innerhalb der Produktion auch Korrekturschleifen vorgeschlagen, die mittels additiver Fertigung möglichst günstig gehalten werden sollen. Jedoch ist dieses Vorgehen insbesondere für sehr komplexe Produkte wie iMST ungünstig und ineffizient.

Ein weiterer Ansatz, der sich direkt auf die Individualisierung des Produkts bezieht, findet sich bei Baumberger [66]. Dabei wurde das Ausmaß der Individualisierung bzw. der Individualisierungsgrad in Abhängigkeit der Konstruktionsarten und des Vorbereitungsgrades gesetzt und so das Leistungsspektrum abgeleitet (siehe Abbildung 50).

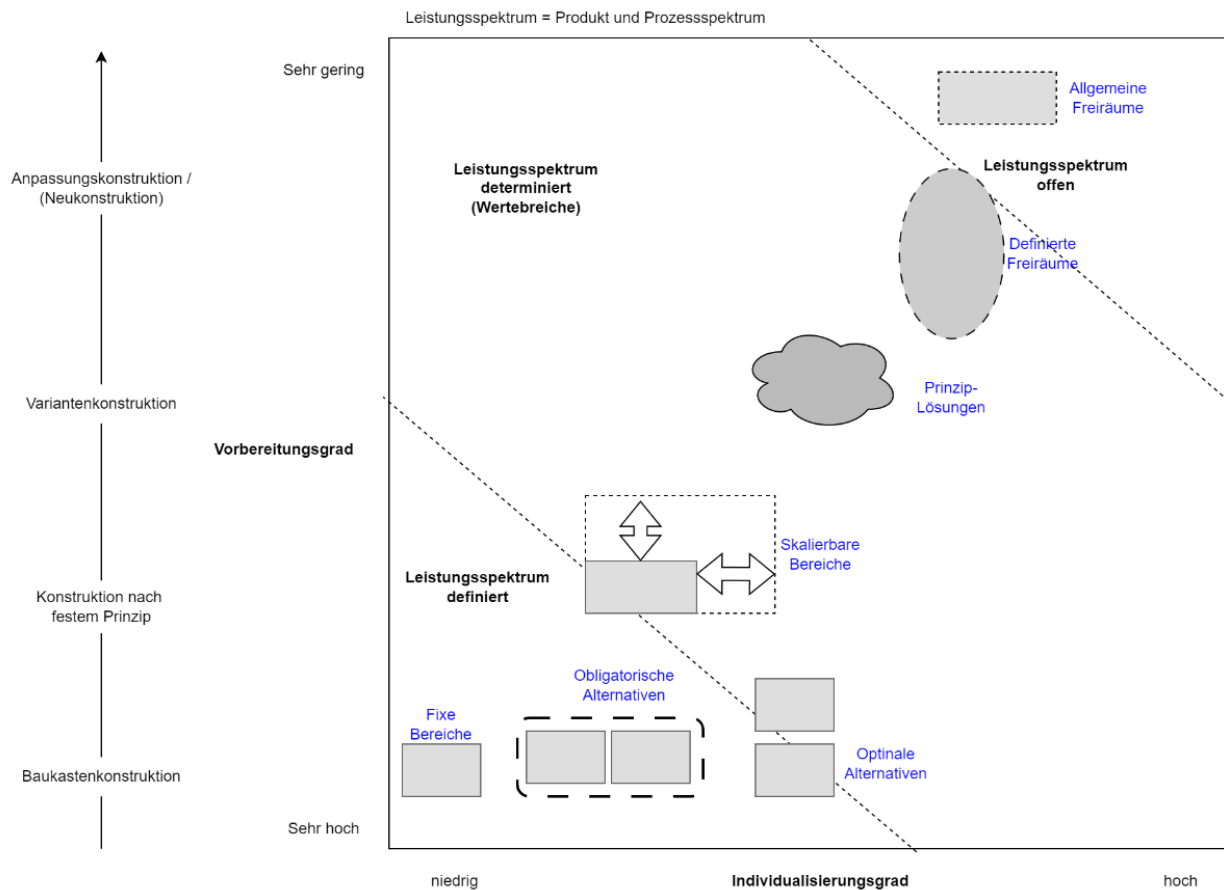


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen Konstruktionsarten und Individualisierungsgrad nach [65].

Dies dient der Klassifikation und Planung bei kundenindividuellen Produkthanfragen. Somit ist es eine mögliche Methode für die strategische Produktplanung. Eine weitere methodische Hilfestellung bietet das Metastrukturmodell, welches inhaltlich ebenfalls der Abbildung 50 entnommen werden kann. Mit der Abbildung 51 wird das Modell durch die Beispiele deutlicher. Das Metastrukturmodell ist vor allem bei der Produktstrukturplanung eine Hilfestellung [57], [66] und kann somit eine wichtige Grundlage für die Planung von kundenspezifischen Entwicklungsprozessen schaffen. Darüber hinaus kann diese Methode als Inspiration während der Ideenfindung dienen, da jegliche Möglichkeiten zur Individualisierung aufgezeigt werden.

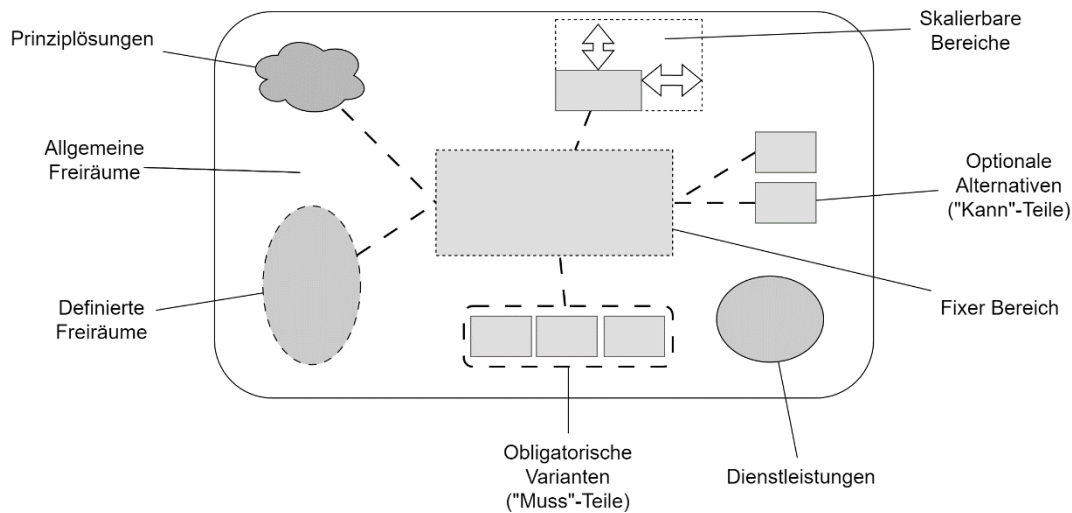


Abbildung 51: Metastrukturmodell für individualisierte Produkte nach [56], [65].

Es wurden einige Methoden zur Entwicklungsunterstützung von individualisierten Produkten vorgestellt, sodass spezifische Methoden für die MST bzw. die räumlichen Schaltungsträger aufgezeigt werden können. Auf diese Weise kann ein Fundament für eine effizientere Entwicklung bezüglich der iMST aufgebaut werden.

2.3.5 Spezifische Entwicklungsmethoden für räumliche Schaltungsträger

Für die Phasen der Entwicklung gibt es speziell für MID-Produkte entwickelte Methoden und Werkzeuge, die in diesem Kapitel dargestellt werden. Wichtig ist, dass mindestens für jede Phase eine Methode erläutert wird. Als Referenzprozess wird das bereits vorgestellt MID-Vorgehensmodell nach Kaiser herangezogen (siehe Abbildung 30). Dementsprechend werden die folgenden Methoden und Werkzeuge in den Unterkapiteln vorgestellt:

- **MID-Planer** für die Phasen „Planen und Klären der Aufgabe“, „Produkt konzipieren“ und „Fertigungsprozess konzipieren“
- **MID-Konstruktionskatalog** für die Phase „Produkt konzipieren“
- **Restriktionscheckliste und Eigenschaftskarte der MID-Verfahren** für die Phase „Fertigungsprozess konzipieren“
- **3D-CAD-Tools** MCAD und ECAD für die Phase „3D-Elektronik entwerfen“

Für die Grundsatzentscheidung zur Verwendung eines MID-Bauteils und somit den Entwicklungsphasen vorgelagert, gibt es von Pöhlau [181] eine Sammlung an Entscheidungskriterien. Diese können aus der Abbildung 52 entnommen werden.

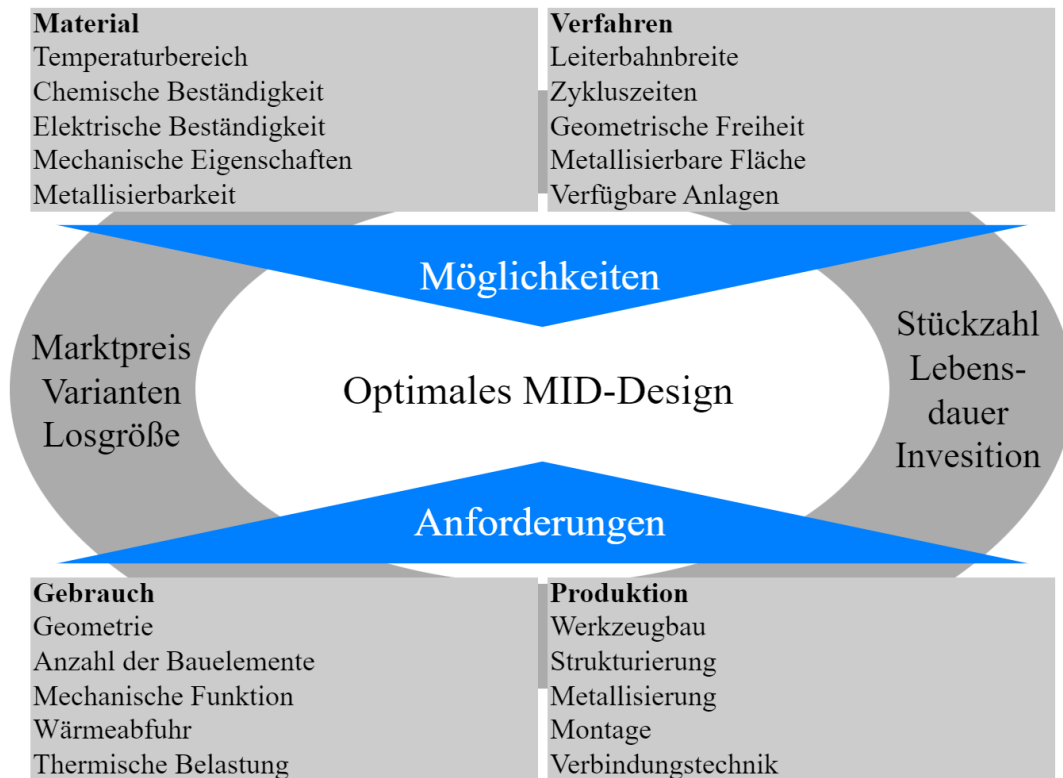


Abbildung 52: Entscheidungskriterien für die MID-Technik nach [180], [79].

Diese Kriterien helfen den MID-Entwicklern, die Anforderungen an das Produkt in Übereinstimmung mit den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den Eigenschaften des Materials und des Herstellungsprozesses zu bringen, um ein möglichst kostengünstiges Produkt zu schaffen, das die geforderte Funktion optimal erfüllt [181]. Um dies zu erreichen, benötigt der Entwickler eine Vielzahl von Informationen. Obwohl heutzutage viele Daten verfügbar sind, sind die Zusammenhänge oft unklar, insbesondere in Bezug auf die Auswirkungen der Konstruktion und der Wahl der Fertigungstechnologie auf die Gesamtkosten [181].

2.3.5.1 MID-Plan

Der *MID-Plan* wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes von Jürgehake [86] entwickelt und geprüft. Es handelt sich dabei um eine Planungsunterstützung zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Entwicklung von MID-Produkten. Beginnend mit der Eingabe der Produktspezifikation des Anwenders wurde eine Schnittstelle mit der WebMIDIS-Datenbank aufgebaut (siehe Abbildung 53). Diese Datenbank soll gewährleisten, dass die Daten

immer aktuell sind. Die Pflege des WebMIDIS wird von der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V. koordiniert. Anschließend werden die Daten aus der Produktspezifikation und Datenbank mit analytischen Methoden zusammengeführt und bewertet. Resultierend sollte eine Wahrscheinlichkeit zur Machbarkeit und eine Wirtschaftlichkeitsberechnung beziffert werden, die der Anwender als Output in der graphischen Benutzeroberfläche (GUI) sehen kann.

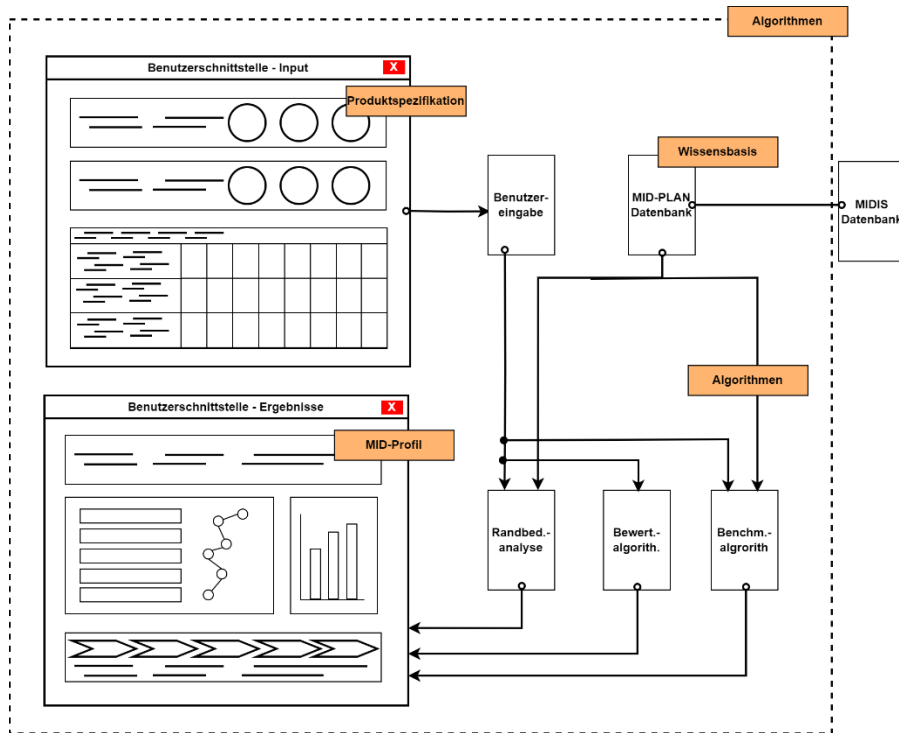


Abbildung 53: Konzeptioneller Aufbau des „MID-Plan“ nach [85].

In der Ergebnisauswertung erhält der Benutzer zwei wichtige Informationen: Zum einen das MID-Profil des Produktkonzepts, das die verschiedenen Kriterien und Merkmale des Produkts beschreibt. Zum anderen werden die spezifischen Prozessschritte, welche für die Produktion des Produkts erforderlich sind, ermittelt und ausgegeben. Diese Informationen dienen als Grundlage für die Entwicklung der Prozesskette, die im nächsten Schritt stattfindet. Mit den Ergebnissen aus der Ergebnisauswertung kann der Benutzer die verschiedenen Prozessschritte in der richtigen Reihenfolge anordnen, um die Produktion des Produkts effizient und erfolgreich durchzuführen. Zusammenfassend werden dem Benutzer also in der Ergebnisauswertung wichtige Informationen bereitgestellt, die als Grundlage für die weitere Entwicklung des Prozesses dienen. Jedoch ist eine individuelle Anpassung der Datenbank nicht gegeben, sodass individuelle und sehr spezielle Abfragen mit hoher Wahrscheinlichkeit unberücksichtigt bleiben. Zudem ist dieses Werkzeug webbasiert, wodurch unternehmensspezifische Anwendungen und Entwicklungsprozesse nicht betrachtet werden können. *MID-Plan* dient

somit überwiegend dazu, jedoch nicht ausschließlich, potentielle Kunden von MID-Produkten zu unterstützen. Ein genaues Testen des *MID-Plan* ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen, da das *MID-Plan* auf der Webseite „midplan.de“ aus unbekannten Gründen nicht mehr funktioniert.

2.3.5.2 MID-Konstruktionskatalog

Der MID-Konstruktionskatalog ähnelt einem morphologischen Kasten und hat prinzipiell den gleichen Zweck wie ein morphologischer Kasten. Der MID-Konstruktionskatalog ist eine Zusammenstellung von verschiedenen Möglichkeiten zur Implementierung von mechanischen und elektronischen Funktionen in MID-Bauteilen [80]. Er enthält eine Vielzahl von Lösungsvarianten, aus denen der Entwickler bzw. Konstrukteur diese Varianten auswählen kann, um eine effektive und wirtschaftliche Umsetzung der gewünschten Funktionen zu identifizieren (siehe Abbildung 54). Dieser Katalog dient als Sammlung von bewährten Ansätzen und Lösungen, die zur Realisierung von MID-Funktionen eingesetzt werden können. Durch die Nutzung des MID-Konstruktionskatalogs können Entwickler Zeit und Ressourcen sparen, da sie nicht jedes Mal von Grund auf neue Lösungen entwickeln müssen [82], [155]. Stattdessen können sie auf die bewährten Lösungsvarianten zurückgreifen und diese bei Bedarf anpassen und weiterentwickeln. Auch wenn diese Methode an erster Stelle der Produktkonzeption dient, kann diese ebenfalls zur Ideenfindung oder Bauteiloptimierung eingesetzt werden.

Lösung Funktion		Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7
Elektrische MID-Funktionen	El. Energie transportieren	Leiterbahn	Antenne					
	Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Stecker	Kontaktfeder	Direktsteckprinzip	Kontaktfläche	Einpressstift	SMD-Stecker	Kontakthügel
	El. Bauteile kontaktieren (AVT)	Lötverbindung	Klebeverb.	Bondverb.			Flip-Chip Lötver.	Flip-Chip Klebv.
	Elektromagn. Felder schirmen	Schild	Gitter					
	Vor hohen Strömen sichern	Sicherung						
	Stromkreis schließen / öffnen	Schnappschalter	Silikonschalter					
Mechanische MID-Funktionen	Bauteile tragen	2 ½ D	n x 2D	Schalenstruktur	3D			
	Kraft übertragen	Schnappverb.	Sägezähne	Zahnrad	Klemmverb.	Steckverb.	Schiebverb.	
	Vor Umwelteinflüssen schützen	Gehäuse	Vergießen	Lackierung	Umspritzen			
	Thermische Energie leiten	Metall, Fläche	Kühlrippen	Heizstruktur				
	Bauteile stabilisieren	Versteifungen	Abstandhalter	Vergießen				
	Bauteile markieren	Barcode	Referenzpunkt	Farben	Beschriftung			
	Baugruppe kontaktieren	Zylinder	Bohrung					

Abbildung 54: MID-Konstruktionskatalog nach [78].

2.3.5.3 Restriktionscheckliste und Eigenschaftskarte der MID-Verfahren

Sowohl der *MID-Plan* als auch der MID-Konstruktionskatalog haben insbesondere den Zweck, die optimale Auswahl von diversen Fertigungsverfahren zu identifizieren. Da eine Hauptanforderung an iMST die optimale Auswahl von Fertigungsverfahren ist, spielen diese Methoden eine zentrale Rolle.

Die von Peitz [182] erstellte **Restriktionscheckliste** beschreibt die Produktmerkmale des Designs, die nötigen Eigenschaften und Ausprägungen sowie deren Bewertung (siehe Tabelle 9). Insgesamt gibt es acht Merkmale, die eine MID-Prinziplösung kennzeichnen.

Tabelle 9. Restriktionscheckliste nach [181].

Merkmal	Eigenschaften der Prinziplösung (Ausprägung)	Anforderung (Bewertung)
Leiterbahnführung	- Metallisierung in einer Ebene (gut zugänglich)	1
	- Räumliche Metallisierung (auf einer Seite)	3
	- Metallisierung auf allen Seiten	5
Flächige Metallisierung	- Keine Flächen, nur Leiterbahnen	1
	- Kleinere Flächen (ca. 1-3 cm ²)	3
	- Große Flächen (ab 10 cm ²)	5
Kleinste Leiterbahnbreite	- 350 µm	1
	- 150 µm	3
	- 80 µm	5
Maximale Stromstärke	- Geringe Ströme (unter 2 A)	1
	- Mittlere Ströme (4-6 A)	3
	- Sehr hohe Ströme (über 8 A)	5
Kunststoff	- Der Kunststoff ist frei wählbar	1
	- Auswahl eingeschränkt (z.B. Lötbarkeit)	3
	- Kunststoff ist fest vorgegeben	5
Varianten	- Keine	1
	- Teile des Leiterbahnlayouts sind unterschiedlich	3
	- Das gesamte Leiterbahnlayout ist unterschiedlich	5
Losgröße	- Über 100.000 Stück	1
	- 10.000 – 100.000 Stück	3
	- Weniger als 5000 Stück	5
Kosten	- Geringer Kostendruck	1
	- Mittlerer Kostendruck	3
	- Hoher Kostendruck (jeder Cent zählt)	5

Die Merkmale, welche eine MID-Prinziplösung ausmachen, sind in der linken Spalte aufgelistet. Jedes Merkmal hat mehrere Ausprägungen. Jede Ausprägung hat dabei unterschiedliche Anforderungen an das MID-Verfahren. Diese Anforderungen wurden in der rechten Spalte auf einer Skala von 1 (niedrige Anforderung) bis 5 (hohe Anforderung) von Peitz bewertet. Das heißt, ist eine Ausprägung mit 5 bewertet, so kann gesagt werden, dass die Herausforderungen hoch sind. Die Merkmale des Produkts legen fest, welche Anforderungen an die Herstellung gestellt werden (Checkliste für Restriktionen des Produkts). Das MID-Verfahren Laserdirektstrukturierung muss in der Lage sein, diese Anforderungen zu erfüllen. Wenn die Anforderungen des Produkts für einige Merkmale höher sind als die Fähigkeiten des MID-Verfahrens, gibt es zwei Optionen: Es kann zu einem anderen MID-Verfahren gewechselt werden, das die höheren Anforderungen erfüllt (z. B. 2K-Spritzguss, wenn die Leiterbahnführung zu komplex für die Laserdirektstrukturierung ist), oder das Produktkonzept muss überarbeitet werden. Oft müssen Kompromisse gefunden und sowohl das Fertigungs- als auch das Produktkonzept angepasst werden, um eine Übereinstimmung zu erreichen. Dies zeigt, wie eng die Wechselwirkung zwischen Produkt- und Prozesskonzeption ist. Für iMST müssen weitere Fertigungsverfahren berücksichtigt werden, wodurch die Auswahl komplexer wird.

Peitz [182] beschreibt ebenfalls die Eigenschaften der MID-Verfahren mit Hilfe von Eigenschaftskarten. Diese Karten enthalten eine Beschreibung des Prozessablaufs, eine Bewertung des Verfahrens anhand von acht Merkmalen und eine kurze Beschreibung der verschiedenen Ausprägungen von Merkmalen. Die Eigenschaftskarte in Abbildung 55 ist ein Beispiel für die MID-Verfahrenseigenschaften.

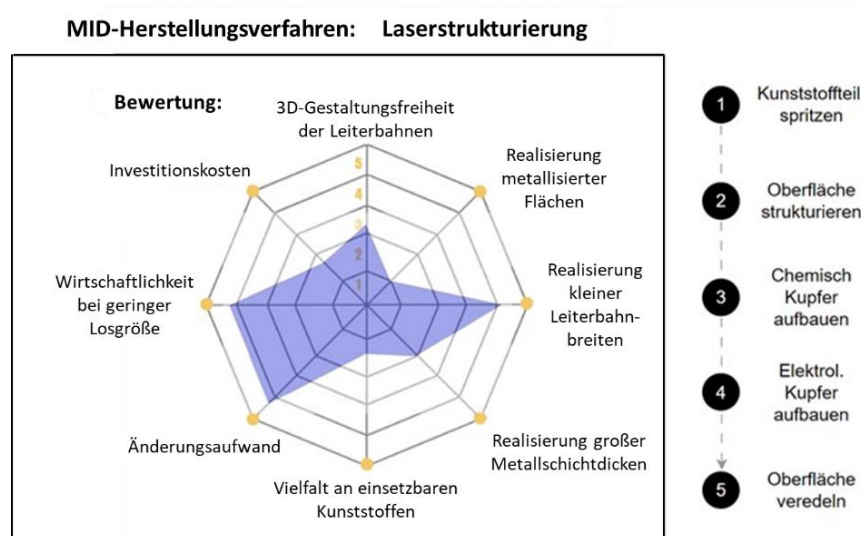


Abbildung 55: MID-Eigenschaftskarte nach [181].

Insgesamt gibt es vier verschiedene Eigenschaftskarten, welche für die MID-Verfahren Laserstrukturierung, Zweikomponentenspritzguss, Heißprägen und Folienhinterspritzen erstellt wurden. Diese Karten dienen der Auswahl des geeigneten Herstellprozesses für eine MID-Prinziplösung. Zunächst wird ein Merkmalsprofil des Produkts als Spinnendiagramm erstellt und anschließend mit dem Eigenschaftsprofil des MID-Verfahrens verglichen. Durch die Überlagerung beider Profile wird die Merkmalerfüllung jeder Verfahrenseigenschaft überprüft. Wenn bspw. das Produkt eine sehr komplexe Leiterbahnführung aufweist, kann dieses Merkmal direkt mit der Verfahrenseigenschaft „3D-Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen“ verglichen werden. Eine hohe Schnittmenge zwischen dem Eigenschaftsprofil des MID-Verfahrens und dem Merkmalsprofil des Produkts zeigt, dass das Verfahren für die Herstellung am besten geeignet ist. Mithilfe der Eigenschaftskarten können die Merkmale des Produkts auf anschauliche Weise mit den Eigenschaftsprofilen der verschiedenen MID-Verfahren verglichen werden. Diese Methode ermöglicht eine fundierte Entscheidung und ist auch für Entwickler ohne viel Erfahrung einfach zu verstehen [133].

2.3.5.4 3D-CAD-Programme

MID-Bauteile zeichnen sich durch ihre domänenübergreifende Natur aus, was bedeutet, dass die Herstellung von MID-Komponenten das Zusammenspiel zwischen *Mechanical Computer Aided Devices* (MCAD) und *Electronical Computer Aided Devices* (ECAD) erfordert. Speziell für die MID-Technik wurden daher Werkzeuge wie das Tool MIDCAD und NEXTRA[®] entwickelt.

Das von Zhuo [183] entwickelte MIDCAD ist ein Plug-In-Programm für Pro/E Wildfire, das die interne Datenstruktur erweitert und so ein Modell für MID-Produkte erstellt. Das Programm enthält eine Bauteilbibliothek, aus der Bauteile anhand einer Netzliste ausgelesen werden können. Das Routing erfolgt manuell oder automatisch, wobei die direkten Verbindungen der einzelnen Pins als farbige Linien dargestellt werden. Das Programm ermöglicht auch die Erkennung von MID-typischen Merkmalen wie Durchkontaktierungen und die parametrische Volumenmodellierung von Leiterbahnen. Insgesamt soll MIDCAD das Design von MID-Komponenten erleichtern und ermöglicht eine effiziente und präzise Fertigung. Jedoch fand MIDCAD keine Verbreitung im Markt und ist daher kommerziell nicht verfügbar. Weiterhin muss bspw. die Netzliste aus einem ECAD-Tool wie Eagle importiert werden, wodurch die Nutzung von zwei Tools (ECAD und MCAD) nötig ist.

Ein kommerziell verfügbares CAD-Tool für MID ist die Software NEXTRA[®]. Im Vergleich zu MIDCAD bietet NEXTRA[®] die Möglichkeit, *Electronic Design Automation* (EDA)-Tools direkt zu integrieren [80]. Dabei werden die Schaltungen übernommen und können auf einen räumlichen Schaltungsträger projiziert werden. Wesentlich ist die Verschmelzung zu einem integrierten Modell, indem ein 2D-ECAD-Layout auf die dreidimensionale Oberfläche einer 3D-MCAD-Konstruktion aufgetragen wird [184]. Folglich muss der Import von ECAD und MCAD Modellen in NEXTRA[®] noch durchgeführt werden. Da es hier vordergründig um die Integration geht, müssen weiterhin ECAD und MCAD-Tools verwendet werden, sodass im Entwicklungsprozess nicht ausschließlich mit einem CAD-Tool konstruiert werden kann. Für die Entwicklung von iMST kann dies eine wichtige Rolle spielen, da im Sinne des *Rapid Manufacturing* eine „schnelle“ Herstellung im Markt erwartet wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die CAD-Tools speziell für die MID-Verfahren gut geeignet sind. Kommen jedoch weitere Anwendungsfälle und Technologien hinzu, wie z.B. AM, so können Anforderungen von AM nicht abgedeckt werden. Deshalb sind für die Entwicklung und Herstellung von iMST neue Recherchen bzw. neue CAD-Tools relevant.

3 Wissenschaftliche Fragestellung

Die Herstellung eines iMST erfordert grundsätzlich immer eine Neukonstruktion und impliziert somit, dass die Herausforderungen und die nötige Leistung vom Entwickler höher sind als bei einer Anpassungs- und Variantenkonstruktion. Bei der Neukonstruktion müssen immer neue Aufgaben und Probleme gelöst werden, und unter anderem deshalb empfiehlt sich bei der Neukonstruktion ausnahmslos ein diskursives Vorgehen [112]. Gleichzeitig wird aber durch die gegenwärtigen digitalen Fertigungsverfahren schnelle und kostengünstige individualisierte Produkte erwartet. Da ein Mikrosystem oft eine systemrelevante Funktion erfüllt, wird auch eine hinreichende Zuverlässigkeit vorausgesetzt. Folglich sollte ein iMST schnell, kostengünstig und zuverlässig hergestellt werden, um Wettbewerbsvorteile zu erlangen und neue Märkte zu erschließen. Die in der Literatur bekannten und etablierten Vorgehensmodelle können den Anforderungen von iMST nur bedingt gerecht werden. Die klassischen PEP beschreiben und empfehlen, unter anderem zur Sicherstellung der Qualität und zur Replizierbarkeit, mehrere Iterationen und Tests [185]–[188], welche unter Umständen den Anforderungen eines iMST nicht gerecht werden könnten. Insbesondere die Replizierbarkeit

ist durch die werkzeuglose Herstellung von iMST kaum möglich, die jedoch für bestimmte Anwendungsfälle gesetzlich erfordert wird.

Im Allgemeinen wird die Konstruktion durch die Möglichkeiten und Restriktionen des eingesetzten Fertigungsverfahrens beeinflusst [189]. Für die Herstellung von iMST wird eine Vielzahl an Fertigungsverfahren benötigt, und aufgrund der Individualisierung eignen sich digitale Prozessketten zur Herstellung von iMST, da sie eine hohe Gestaltungsfreiheit bieten [190]. Jedoch erfordert dies ein umfangreiches Wissen über die Herstellungsprozesse und die damit einhergehenden Design-Regeln [191]. Erstens muss ein Fertigungsprozess konzipiert werden, wo unterschiedliche Fertigungsverfahren identifiziert werden, um eine optimale Prozesskette zu bestimmen und deren dazugehörige Restriktionen, wie bspw. die Gestaltungsrichtlinien. Zweitens gibt es kein allgemeingültiges Werkzeug, welches die Auswahl an Fertigungsverfahren für die Herstellung von iMST unterstützt. Drittens gibt es ein generelles Wissensdefizit über die Design-Regeln von digitalen Fertigungsverfahren [192]–[194].

Zusammengefasst lassen sich drei Spannungsfelder im PEP bei iMST identifizieren (siehe Abbildung 56). Dabei wurde der PEP für die MST als Referenz herangezogen:

1. Eine klassische Absicherung der Eigenschaften ist aufgrund der Individualisierung nicht möglich.
2. Die Produktion findet, aufgrund des erst genannten Punktes, bereits schon mit der Systemausarbeitung statt.
3. Da die Technologieauswahl für iMST eine große Rolle spielt, muss diese methodisch unterstützt werden und eventuell separat betrachtet werden.²³

²³ Dieser Punkt bezieht sich weniger auf einen Prozess, sondern verdeutlicht vielmehr, dass es an einer Methode mangelt, die in einen Prozess integriert werden muss. Im V-Modell wurde als unterstützende Methode die Simulation empfohlen (siehe Abbildung 56).

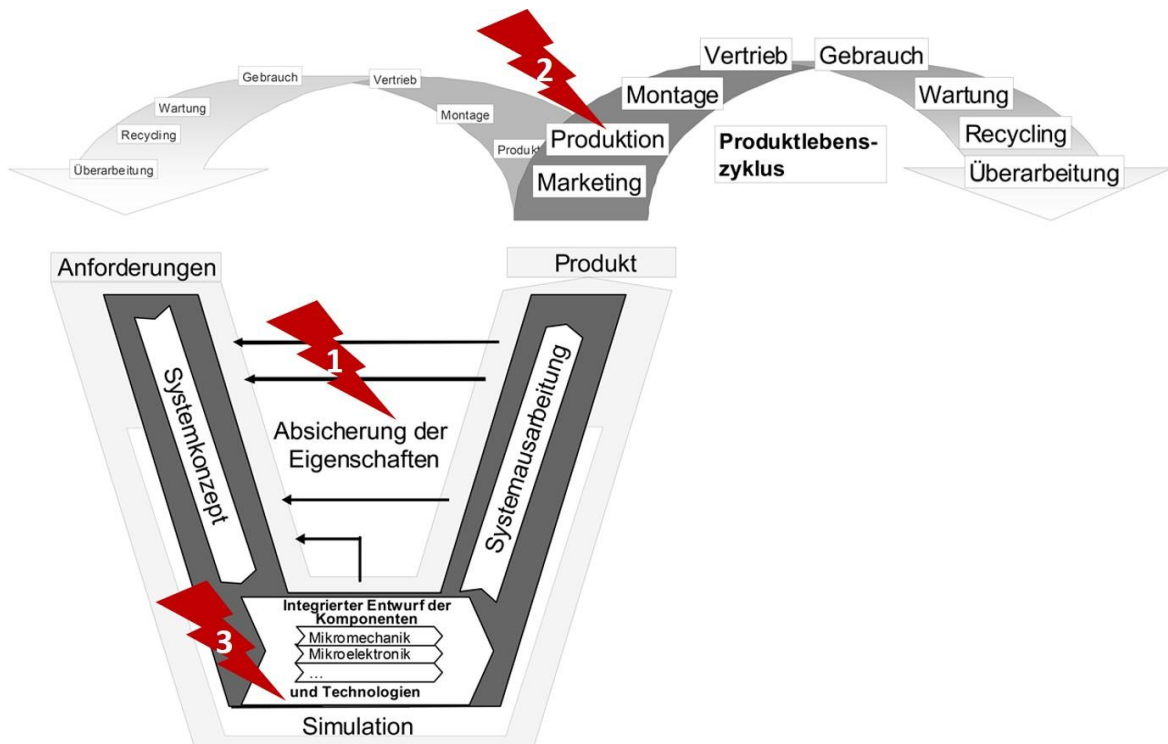


Abbildung 56: Problemstellung der Arbeit - PEP für die Mikrosystemtechnik nach [21].

Unter Berücksichtigung der 3 Spannungsfelder lassen sich insgesamt zwei Forschungsfragen aus der Prozess- und Methodenebene definieren:

1. Was sollte in den etablierten und traditionellen PEP geändert werden, um eine höhere Effizienz bei der Entwicklung und Herstellung von iMST zu erreichen?
2. Wie und mit welchen Methoden oder Werkzeugen kann die Entwicklung von iMST unterstützt werden?

Anhand der Problemstellung und der Forschungsfragen lässt sich die folgende Hypothese aufstellen:

„Um in der Mikrosystemtechnik individualisierte Produkte effizient herzustellen, ist unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Fertigbarkeit eine neue Produktentwicklungsmethodik erforderlich.“

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen PEP mit den dazugehörigen und geeigneten Entwicklungsmethoden zur effizienten Herstellung von iMST zu erstellen. Die Robustheit eines PEP minimiert Nacharbeitstätigkeiten [195] und fördert dadurch langfristig die effiziente Herstellung von iMST. Der PEP soll auf einer abstrakten Ebene (Makroebene) dargestellt

werden, da sonst aufgrund der Komplexität des PEP die Anwendbarkeit für iMST und Generalisierbarkeit nicht sichergestellt werden kann. Für einen erfolgreichen Prozess und somit ein erfolgreiches Produkt ist die Komplexität²⁴ des PEP von entscheidender Bedeutung [28]. Folglich ist der Anspruch, den PEP relativ unkompliziert und als Referenz für möglichst viele iMST anwenden zu können. Die Methoden und Werkzeuge sollen den entsprechenden Phasen des PEP zugeordnet werden. Bei Bedarf sollen auch Werkzeuge neu entwickelt werden, die an Gegebenheiten und Anforderungen von iMST angepasst sind und zur effizienten Herstellung beitragen. Dafür ist es notwendig, über die Literatur hinaus die konkreten Anforderungen innerhalb des Entwicklungsprozesses von iMST zu analysieren. Folglich ist das untergeordnete Ziel, möglichst viele Entwicklungsprojekte von iMST in Erfahrung zu bringen. Der PEP soll Wissenschaftlern in den Feldern der Produktentwicklung und MST sowie Produktmanagern und Geschäftsführern neue Ansätze und Möglichkeiten für die Einführung von iMST bieten.

Um diese Ziele zu erreichen, ist die Vorgehensweise so, dass sowohl retrospektive als auch prospektive Entwicklungsprojekte berücksichtigt werden. Das heißt, es werden bereits abgeschlossene und zu der aufgestellten Hypothese zielgerichtete Entwicklungsprojekte bzw. Studien berücksichtigt und durchgeführt. Die abgeschlossenen Entwicklungsprojekte von iMST sollen mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse analysiert und kategorisiert werden. Ziel dabei ist es, ein vertieftes Verständnis über die Thematik aufzubauen und zu erkennen, ob eine Produktkategorisierung für iMST möglich und sinnvoll ist. So wäre bspw. die Erstellung eines PEP für bestimmte Produktkategorien realisierbar. Darüber hinaus sollen mehrere Fallstudien durchgeführt werden. Die erste Fallstudie, als teilnehmende Beobachtung, soll dazu dienen, konkrete und praktische Handlungsfelder innerhalb des PEP zu analysieren. Die zweite Fallstudie soll mittels Experteninterviews Daten aus der Praxis erheben. Diese Studien sollen möglichst validiert werden. Ebenso sollen Tests und Versuche für vorhandene Lösungen durchgeführt werden. Abschließend sollen die generierten Daten in einem neuen PEP synthetisiert werden (siehe auch Abbildung 58).

Das Forschungsdesign und der Aufbau der Arbeit ist an Blessing und Chakrabarti [197] angelehnt. In der Vergangenheit wurden Bedenken geäußert, dass die Methoden und Verfahren der Forschung in der globalen Forschungsgemeinschaft der Produktentwicklung nicht einheitlich sind [197], [198]. Mit dem Ziel, verbesserte Forschungsergebnisse durch einen

²⁴ Schuh et al. definieren die Komplexität im Kontext der Produktentwicklung als eine Systemeigenschaft, die sowohl durch die Anzahl und Art der Beziehungen, als auch durch Anzahl und Art der Elemente bestimmt wird [196].

systematischeren und einheitlicheren Forschungsansatz zu erzielen, haben Blessing und Chakrabarti eine Forschungsmethodik für die Produktentwicklung entworfen, die als *Design Research Methodology* (DRM) bezeichnet wird. Die Abbildung 57 zeigt das Forschungsdesign dieser Arbeit auf Basis von DRM. Zusätzlich wurden die zugeordneten Kapitel, Analyse und Synthese sowie Ziele integriert.

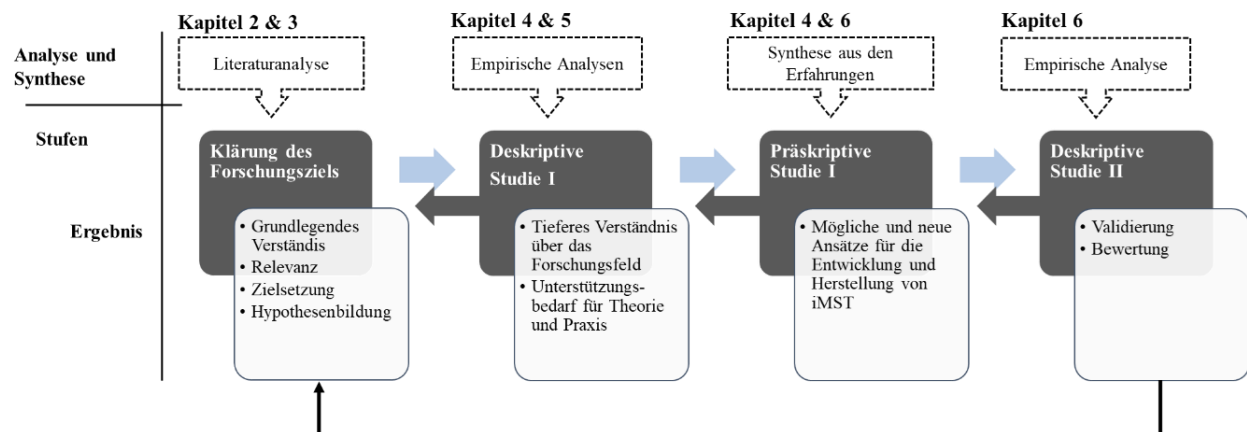


Abbildung 57: Forschungsdesign dieser Arbeit nach der DRM nach [196].

Die typische Vorgehensweise des DRM erfolgt sequenziell von links nach rechts. Allerdings sind auch oft die notwendigen Rückgriffe während der Bearbeitung möglich. So wurde bspw. innerhalb des dritten Kapitels eine Methodik entwickelt (präskriptive Studie), die zeigen konnte, dass weitere deskriptive Studien nötig sind. Dadurch gelangt man wieder in die Stufe der deskriptiven Studie I.

Die inhaltliche Vorgehensweise zeigt die Abbildung 58.

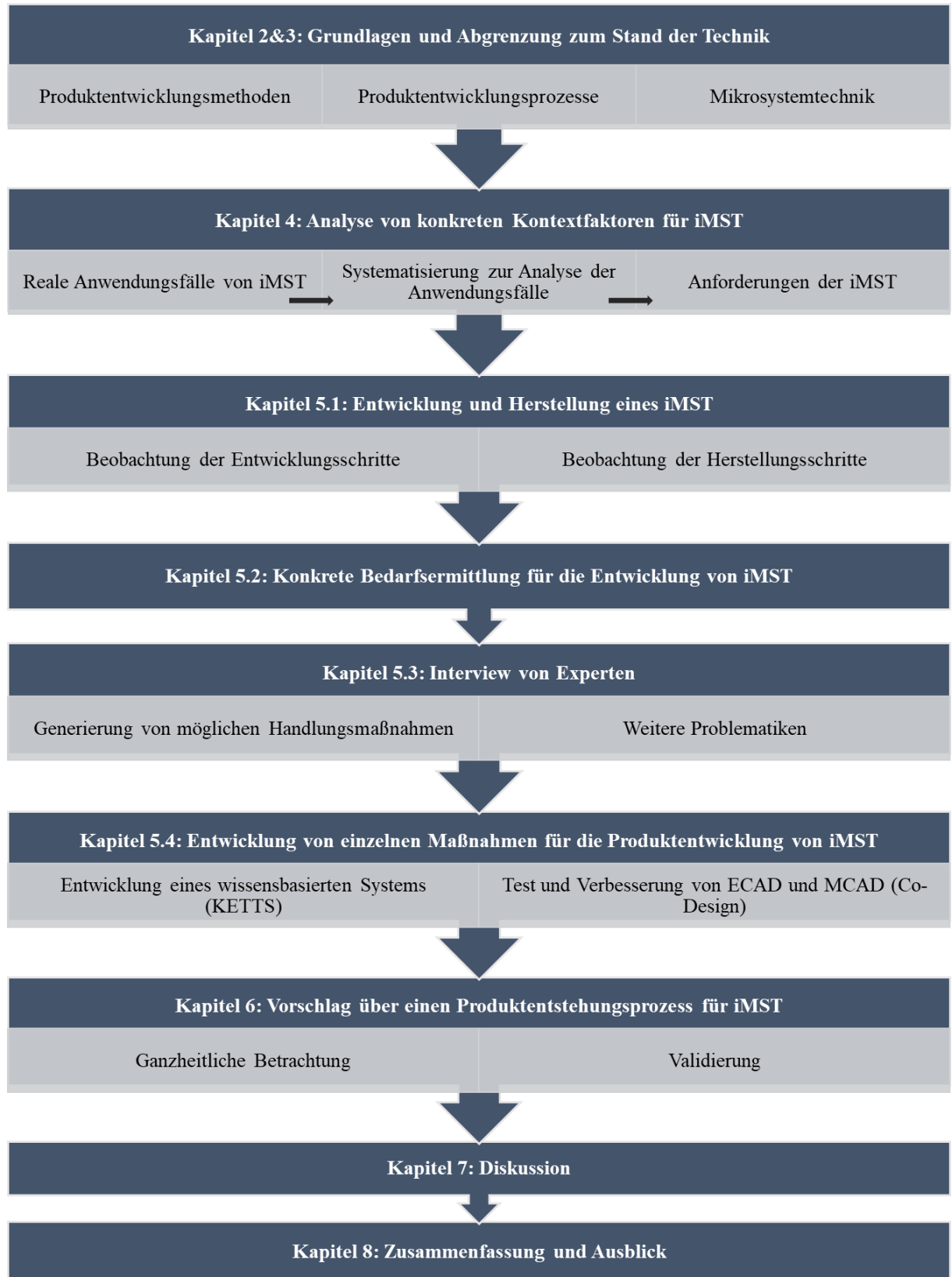


Abbildung 58: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit.

4 Methodik zur Erstellung von Kontextfaktoren anhand von Use-Cases

Wie bereits im Kapitel 2.2.2 aufgezeigt, ist die Analyse und Identifikation von Kontextfaktoren für den PEP eine wesentliche Voraussetzung, um einen geeigneten adaptierten PEP zu entwickeln. Allerdings ist dies gleichzeitig auch eine große Herausforderung. Aus der Literaturanalyse konnte gezeigt werden, dass es gewisse Möglichkeiten gibt, Kontextfaktoren für den eigenen Fall zu finden. So wurde das Modell von Reitmeier [128] zur Analyse von Kontextfaktoren erläutert. Jedoch hat dies mehr den Zweck, Kontextfaktoren innerhalb der eigenen Situation und dem eigenen Unternehmen zu analysieren. Dadurch ist eine Vorgehensweise für die Wissenschaft, die den Anspruch erhebt, mehrere und gleichzeitig spezifischere Fälle zu berücksichtigen, nicht vollumfänglich gegeben. Darüber hinaus verlangt das Modell eine maximale Datenerhebung (Politik, Markt, etc.), sodass es für die wissenschaftliche Anwendung sehr aufwendig und unkomfortabel ist. Die anderen Möglichkeiten, Kontextfaktoren zu finden, sind, im Gegensatz zum Modell von Reitmeier, sehr einfach und praktikabel. Jedoch bieten diese lediglich eine Liste von gesammelten Kontextfaktoren an, wodurch keine Systematik und Vorgehensweise gegeben ist, auch wenn eine konkrete Vorgehensweise nicht die Absicht der Autoren war. Insbesondere aus den oben genannten Gründen wird in diesem Kapitel eine Systematik entwickelt und umgesetzt, die dazu dient für diverse Anwendungsfälle Kontextfaktoren zu identifizieren. Gleichzeitig werden diese im Rahmen einer Befragung bewertet, sodass Gewichtungen für die Kontextfaktoren innerhalb der einzelnen Use-Cases gebildet werden können. Die Methodik ermöglicht es, Kontextfaktoren auch außerhalb der eigenen Organisation zu identifizieren. iMST sind naturgemäß sehr spezifisch und können dadurch nicht diesen einen Kontextfaktor besitzen. Insbesondere, wenn ein möglichst allgemeingültiger PEP entstehen soll, ist eine derartige Methodik notwendig, da sie unabhängig von der eigenen Organisation diverse Anwendungsfälle berücksichtigt und mit einer Abstraktionsregel soweit reduziert, dass Kontextfaktoren identifiziert werden können. Bevor die Methodik vorgestellt wird, werden diverse Anwendungsfälle beschrieben, die als Input-Quelle für die Methodik dienen. Diese kamen sowohl durch primäre als auch sekundäre Datenerhebungen zu Stande. Weiterhin handelt es sich bei den gesammelten Anwendungsbeispielen teils um tatsächlich umgesetzte iMST, aber auch geplante, die noch nicht hergestellt werden konnten.

4.1 Anwendungsfälle für iMST

4.1.1 Otoplastik zur Messung des Blutdrucks

Herz-Kreislauf-Erkrankungen stellen in den entwickelten Ländern die am häufigsten auftretende Todesursache dar. Eine Messung eines erhöhten Blutdrucks kann bereits im Voraus auf eine ernsthafte Erkrankung hinweisen. Leider gibt es derzeit keine zuverlässige und nicht-invasive Methode, um den Blutdruck kontinuierlich zu überwachen.

Das Ziel der Otoplastik (siehe Abbildung 59) ist es, eine dauerhafte und nicht-invasive Messung des Blutdrucks im Ohr zu ermöglichen. Hierfür wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung im Ohr“ (MikroBO) [199] [200] neue mikrosystemtechnische Sensoren und Aktoren entwickelt, die gemeinsam mit der Steuer- und Auswerteeinheit in einem miniaturisierten System optimal zusammenarbeiten. Um die gesetzlichen Anforderungen der Medizinprodukte zu erfüllen, sollte die Otoplastik mindestens die Risikoklasse IIa der EU-Medizinproduktverordnung erfüllen. Medizinprodukte der Klasse IIa können bspw. Geräte zur Verabreichung von Medikamenten, diagnostische Testkits, Implantate, Hörgeräte oder bestimmte medizinische Instrumente sein. Bei der Entwicklung und Herstellung bestand die Herausforderung darin, die messtechnischen Anforderungen der medizinischen Anwendung in dem engen und geschützten Raum des Ohrs zu erfüllen, für die momentan verfügbare Mikrosensoren und -aktoren nicht ausreichen. Weitere Herausforderungen waren der individuelle Leiterbahndruck sowie die AVT zur Anbindung der Sensorkomponenten.



Abbildung 59: Otoplastik als iMST für eine permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung im Ohr [199].

4.1.2 Retrofit-Sensorik zur Durchführung einer Verzahnungsprüfung

Ein in Deutschland ansässiges Industrieunternehmen mit ca. 30 Mitarbeitern bietet das folgenden Leistungsspektrum an:

- Entwicklung und Herstellung von Werkzeugen und Maschinen für den Bau von Abgasanlagen
- Sonderlösungen für die Windkraftindustrie
- Sonderlösungen für verschiedenste Verkettungs- und Handlings-Aufgaben
- Fertigung diverser Einzelteile und Kleinserien
- Vermessung von Kontrollvorrichtungen und Fertigungsteilen mit einer Zeiss-Messmaschine
- Verzahnungsprüfmaschinen mit diversen optionalen Erweiterungen

Eine Kernkompetenz des Unternehmens ist die Verzahnungsprüfung, die sowohl aus einer Zweiflankenwälzprüfung als auch einer Einflankenwälzprüfung besteht. Wie die Abbildung 60 zeigt, wird der Prüfling angetrieben und das Abrollrad fährt mit einem definierten Federdruck auf Zweiflankenkontakt mit dem Prüfling. Durch geometrische Fehler oder Beschädigungen am Prüfling bewegt sich der Prüfschlitten mit dem Abrollrad um die Länge Δa . Dieser Ausschlag wird für die Geometrieprüfung mit einem linearen Wegaufnehmer aufgezeichnet. Für die Geräuschprüfung ist ein Schwingungsaufnehmer auf dem Prüfschlitten montiert. Gewünscht ist dabei eine optische Prüfung mit einer angepassten Sensorik statt einer Geräuschprüfung mit einem Abrollrad. Die Vorteile wären: kontaktlose und verschleißfreie Prüfung. Abrollräder müssen nicht ständig gewartet bzw. erneuert werden. Bei der optischen Messung muss eine sehr hohe Messgenauigkeit gewährleistet werden ($\pm 1\mu\text{m}$). Die Prüfzeit sollte bei ca. 10-15s liegen. Darüber hinaus müssen die Sensoren äußere Störgrößen wie Vibration und Staub standhalten, da die Kunden die Versuchsanlagen in unterschiedlichsten Werken und Fabrikhallen verwenden. Die Auswertung der optischen Messung könnte man mit den Parametern des Prüflings direkt vergleichen und die Abweichung am Computer anzeigen lassen.

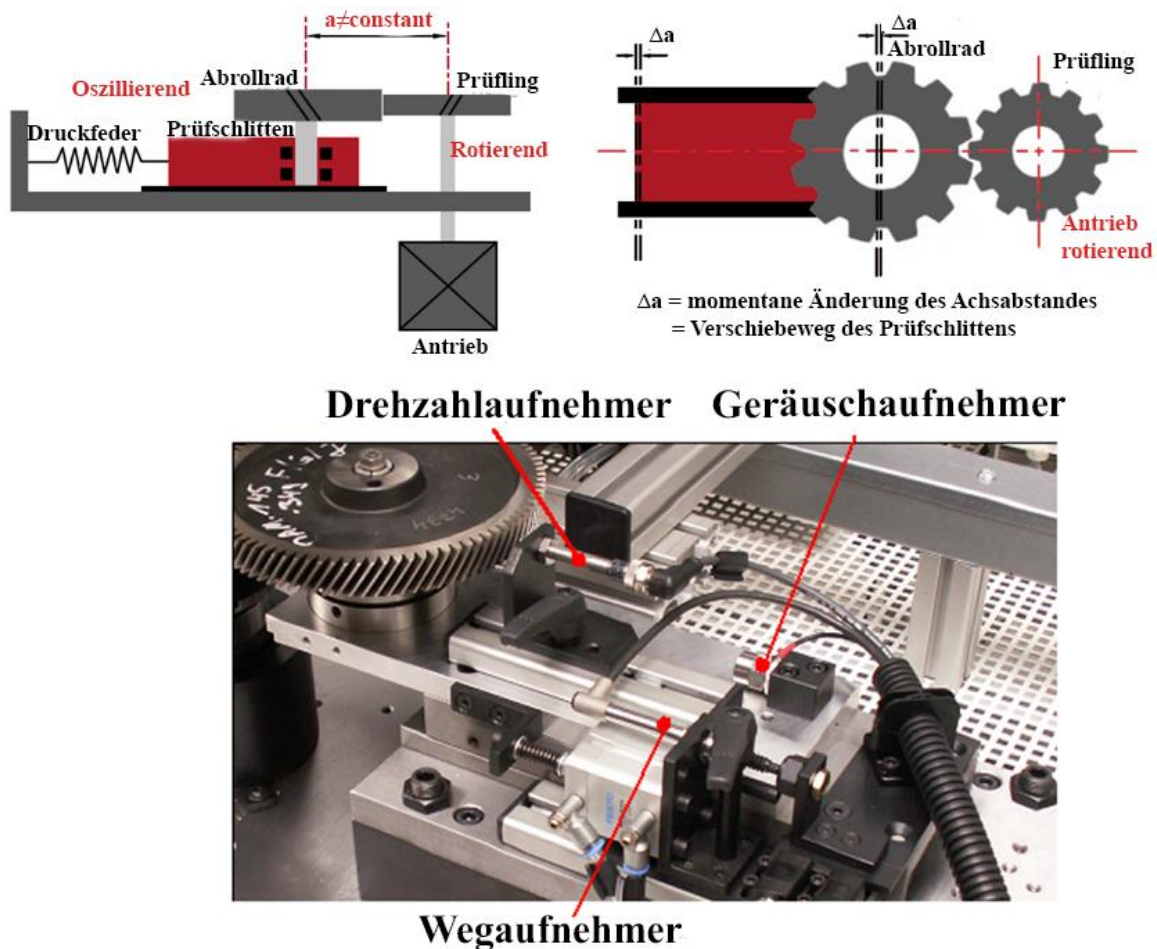


Abbildung 60: Funktionsskizze einer Zahnprüfung. In Kooperation mit Linnenbrink Technik Warburg Maschinenbau GmbH.

4.1.3 Räumliche Sensorik zur Messung von Lichtstrahlen

Die Räume eines Gebäudekomplexes sollen durch Sensorsysteme ausgerüstet werden. Das Sensorsystem soll einfach nachzurüsten und unauffällig in der Gestalt sein (siehe Abbildung 61). Zudem sind in unterschiedlichen Räumen verschiedene Messgrößen zu erfassen. Der Lichtsensor soll so ähnlich wie möglich wie das menschliche Auge reagieren, sodass durch dessen Verwendung eine möglichst natürliche Steuerung und Regelung, bspw. von Rollläden, sichergestellt wird. Um Störungen zu vermeiden und einen reibungslosen Stromkreis zu erreichen, soll ein Kondensator zur Glättung und Störungsbeseitigung von elektrischen Signalen als elektrischer Energiespeicher eingesetzt werden. Der Kunde wird kurz vor dem Fertigungsprozess mit einbezogen und äußert seine Vorstellungen hinsichtlich der Bestückung des Sensors. Durch die Vorgaben bezüglich Sensorform und Material handelt es sich hier um ein Produkt, welches nur in geringem Maß individualisiert werden kann. Durch seine kompakte Bauform fällt das Sensorsystem kaum auf. Dabei kann das iMST insofern individualisiert werden, als verschiedene Merkmale, ein einzelnes Merkmal oder alle Merkmale angepasst

werden. Aus der Anzahl der anpassbaren Merkmale ergibt sich der Grad, in dem das Produkt vorbereitet werden kann, bevor der Kunde in den Entwicklungsprozess integriert werden muss. Die möglichen anpassbaren Merkmale sind:

- Form/Design (in diesem Beispiel: 4x4x4 mm)
- Material (in diesem Beispiel: LCP)
- Leiterbahnstruktur (in diesem Beispiel: Cu/Ni/Au)
- Bestückung (in diesem Beispiel: Lichtsensor, Kondensator, Widerstand)

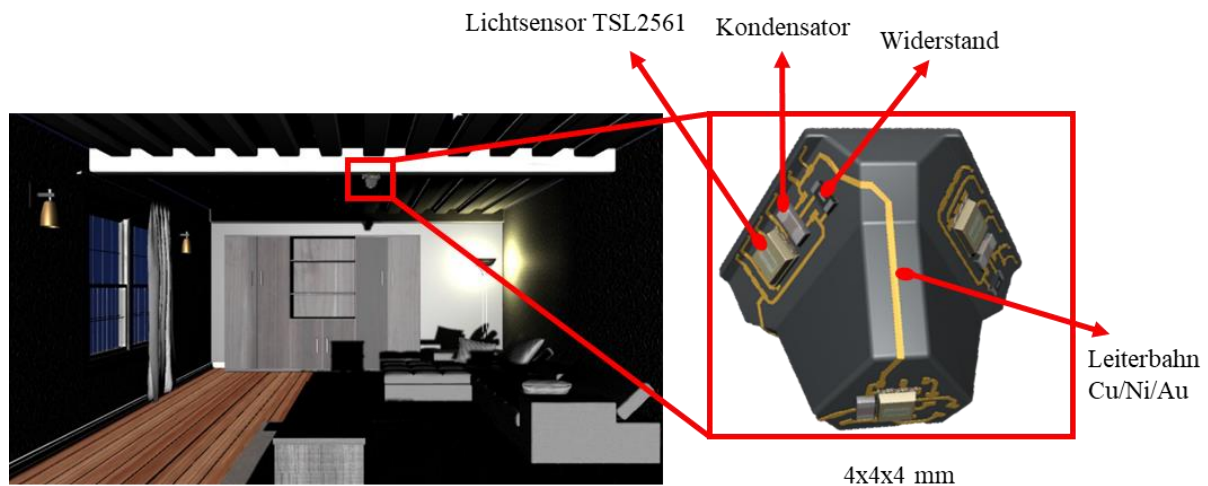


Abbildung 61: iMST als Lichtsensor.

4.1.4 Sensoren für spezielle Schiffscontainer

In diesem Use-Case geht es darum, dass ein Unternehmen, welches die Logistikbranche bedient, hochsensible und präzise Sensoren benötigt, um Produkte während des Transports zu überwachen. Das Unternehmen ist auf den Transport von flüssigen oder gasförmigen Produkten wie bspw. Chemikalien, Ölen oder Lebensmitteln spezialisiert und muss sicherstellen, dass die Produkte während des Transports innerhalb eines bestimmten Temperatur- und Feuchtigkeitsbereichs gehalten werden und eine bestimmte Neigung nicht überschreiten, um ihre Qualität und Sicherheit zu gewährleisten.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, benötigt das Unternehmen individuelle Sensorsysteme, die in der Lage sind, den Transportbehälter in Echtzeit zu überwachen. Einerseits benötigt es Sensoren, die die Neigung und die Bewegung des Behälters genau messen können, um

sicherzustellen, dass das Produkt während des Transports nicht ausläuft oder beschädigt wird. Andererseits benötigt es auch Sensoren, die in der Lage sind, die Konzentration von CO₂, Sauerstoff und Feuchtigkeit im Transportbehälter zu messen, um sicherzustellen, dass die Produkte unter optimalen Bedingungen transportiert werden. Die Sensoren müssen energiearm sein, weil sie in der Regel nur batteriebetrieben realisiert werden können. Da sie in Losgröße 1 benötigt werden, müssen sie sehr individuell und speziell angepasst werden können.

4.1.5 Messtechnik für Testfahrzeuge

Deutsche Automobilhersteller setzen auf elektrifizierte Ottomotoren, um die Effizienz und den Fahrkomfort zu optimieren. Der Integrierte Starter-Generator (ISG) ist eine Schlüsselkomponente dieser Technologie. Schnelle Strom- und Spannungsmessungen sind entscheidend für die optimale Applikation des ISG. Der ISG ist ein leistungsstarker Elektromotor, der zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe montiert ist. Er kann den Anlasser und die Lichtmaschine ersetzen und ermöglicht Hybrid-Funktionen wie das Boostern, Rekuperieren, Lastpunktverschiebung, Segeln sowie Start/Stop. Der Motor kann so sanft gestartet werden, dass der Fahrer nur über den Drehzahlmesser bemerkt, dass der Motor gerade aktiv ist. Um die optimalen Parameter für diese Startvorgänge zu ermitteln, müssen Strom und Spannung am Eingang des Inverters gemessen werden. Um möglichst nahe am Inverter zu messen, wird der Stromsensor direkt zwischen der Vorsicherung und dem ISG installiert [201]. Das Messmodul und das Gateway befinden sich im Beifahrerfußraum (siehe Abbildung 62). Dabei unterscheiden sich je nach Fahrzeug und Komponenten im Innenraum die freien Bauräume zur Messung. Durch umfangreiche Kompaktlösungen und neue Entwicklungen können Sensoren und Messmodule in individuellen und kleinen Bauräumen integriert werden. Dabei werden unter anderem auch die Sensoren auf ultradünne Flexprint-Trägerfolie aufgebracht, um anwendungsspezifische Geometrien und Einsätze in beengten Räumen realisieren zu können [202].

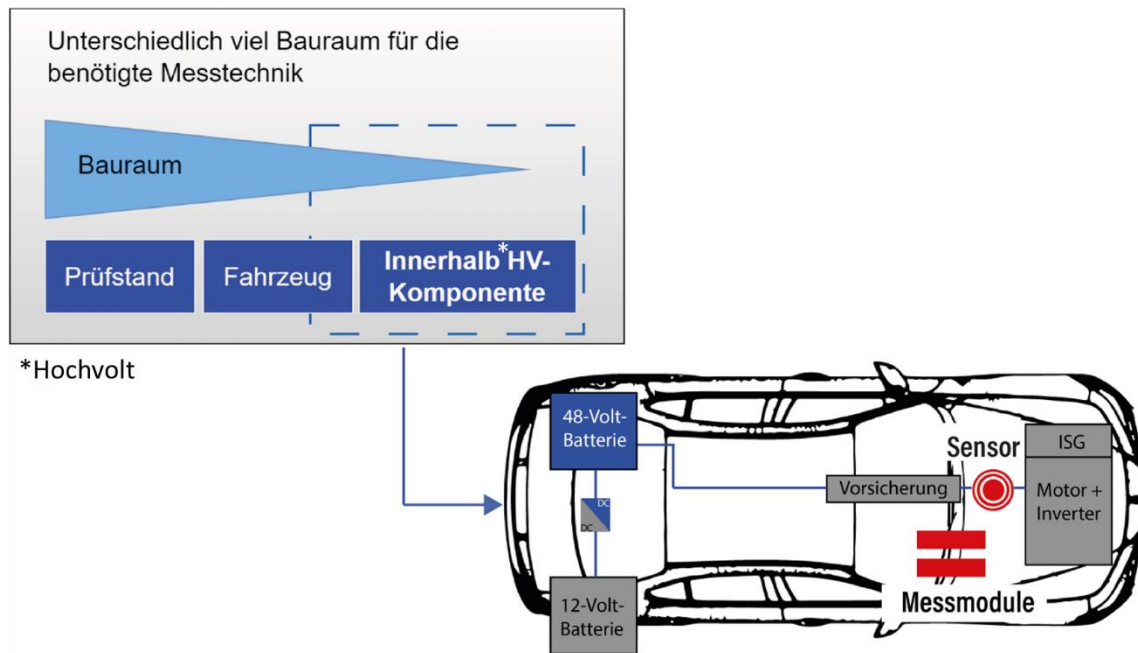


Abbildung 62: Messung eines Testfahrzeuges in engen Bauräumen.

4.1.6 Intelligente Steckverbinder als MVP

Bei diesem Anwendungsbeispiel handelt es sich um einen elektrischen Steckverbinder mit eingangsseitigen Kontakten sowie einem Gehäuse, das kundespezifisch und individuell mit einem additiv gefertigten Werkzeugeinsatz entwickelt wurde. Das Unternehmen ist sich über weitere und spezifischere Anforderungen noch unklar und möchte daher ein MVP entwickeln, wodurch der sog. Lead-User weitere Anforderungen geben kann. Folglich wird das Produkt in sehr kleinen Losgrößen benötigt. Die bekannten Anforderungen sind, dass der „Smart-Connector“ (siehe Abbildung 63) eine Überwachungs- und Sensorfunktion übernehmen soll. Hierfür muss die elektrische Schaltung neben der Sensoreinrichtung auch über eine Steuereinrichtung verfügen. Die Steuereinrichtung sorgt dafür, dass einerseits die zu überwachenden Parameter des Steckverbinders bzw. der Signale innerhalb des Steckverbinders analysiert und andererseits in geeigneter Weise drahtlos oder kontaktbehaftet an eine außerhalb des Steckverbinders liegende Auswerteeinrichtung weitergegeben werden können. Hierfür muss der Steckverbinder über eine moderne Kommunikationseinrichtung verfügen; in diesem Fall wurde ein Bluetooth-Modul integriert. Die übertragenen Signale können dann von einer geeigneten Empfängereinrichtung empfangen und ausgewertet werden. Die Individualisierung des intelligenten Steckers soll insofern gegeben sein, dass der Sensor austauschbar ist und die Geometrie sowie die Leiterbahnen je nach Anforderung und Anwendung angepasst werden können.

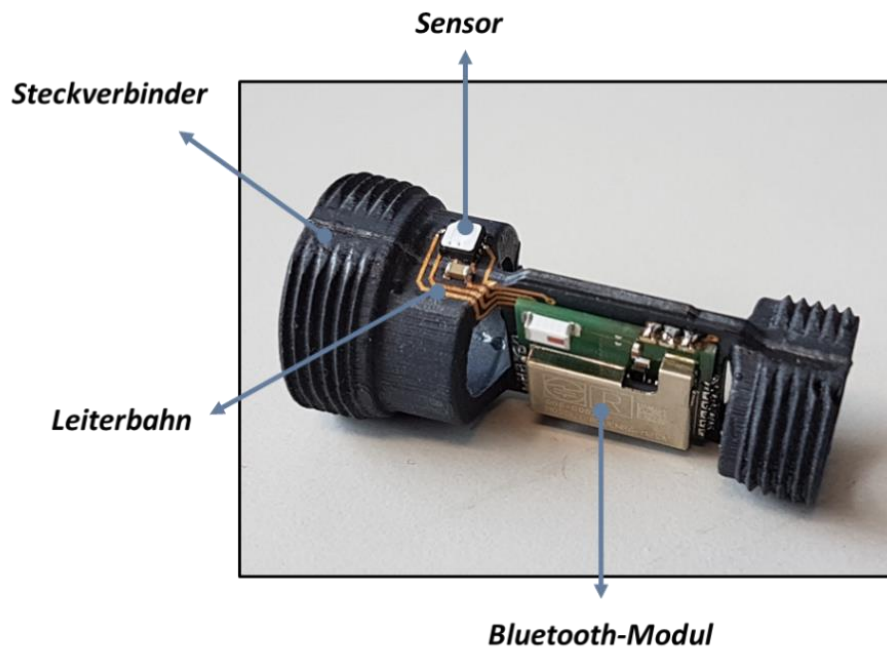


Abbildung 63: Intelligenter Stecker als MVP.

4.1.7 Mundmouse für Menschen mit Behinderung

In dem letzten Anwendungsfall geht es um Personen, die lediglich durch Computerhilfsmittel ihre soziale Aktivität beibehalten und mit der Gesellschaft interagieren können. Hierfür entwickelt ein Unternehmen eine spezielle Mundmouse, die es erlaubt, wie der Name schon sagt, mit dem Mund die Mouse zu bewegen (siehe Abbildung 64). Des Öfteren sind bei diesen Personen die Bewegungen bis zu den Mundwinkeln sehr eingeschränkt. Somit können sie sich kaum an standardisierte Mundmäuse anpassen. Folglich sollten diese Produkte klein und flexibel herzustellen sein. Dies ist jedoch nach dem heutigen Stand auf dem Markt nicht gegeben. Seither wird die in Abbildung 64 gezeigte Lösung verwendet, die jedoch vor allem aufgrund der Größe nicht flächendeckend für alle Zielgruppen eingesetzt werden kann. Folglich ist ein Anwendungsbeispiel für ein iMST in Planung, bei welchem bspw. die Miniaturisierung des Joysticks durch die MID-Technik realisiert werden soll. Durch die MID-Technik können nicht nur Komponenten eingespart werden, sondern auch gleichzeitig weitere Funktionalitäten integriert werden. So können etwa durch die Integration von Sensoren am Mundstück die Schläuche eliminiert und die Atmung durch CO₂ Sensoren gemessen werden, die bei den betroffenen Personen von großer Bedeutung sein können. Hierbei ist es auch wichtig, die medizintechnischen Produktklassen zu berücksichtigen, was bei der aktuellen Lösung nicht der Fall ist.

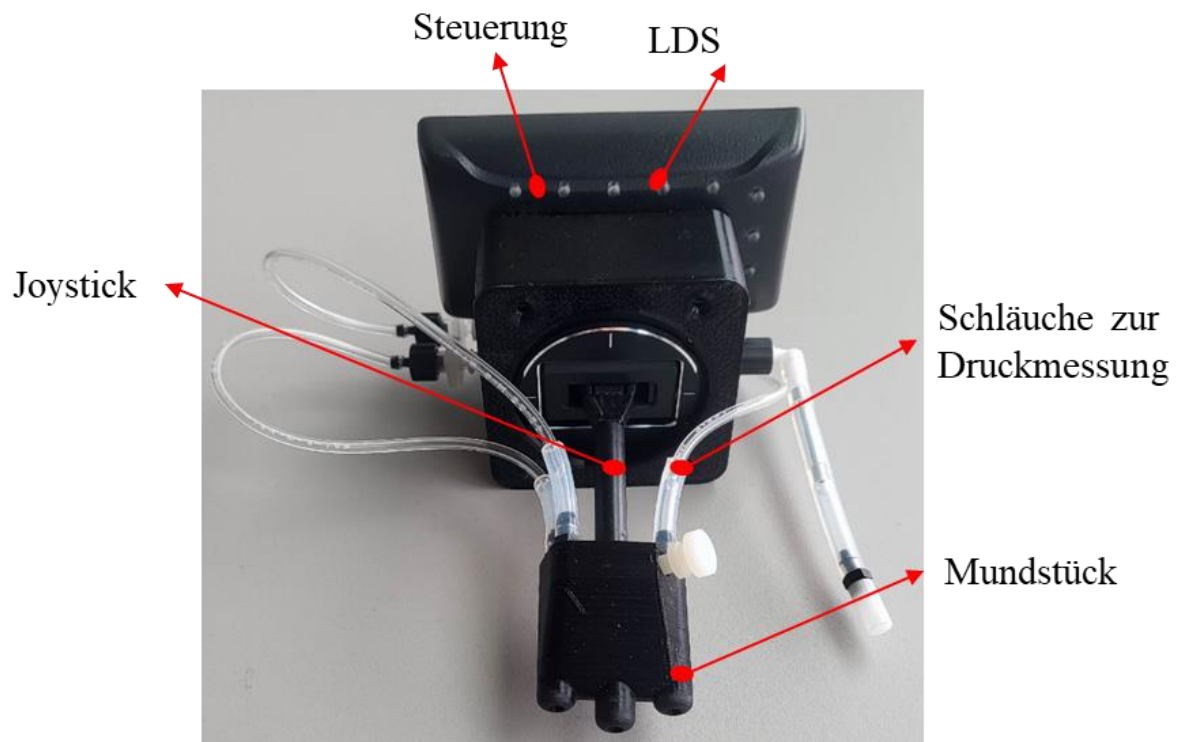


Abbildung 64: Zu optimierende Mundmouse mit der MID-Technik.

4.2 Systematisierung der Use-Cases

Da die gesammelten Anwendungsfälle textbasiert sind, ist die Verwendung von qualitativen Analysetechniken geeignet [203]. Dabei ist bei der qualitativen Forschung das Wesentliche, dass die Texte paraphrasiert und anschließend kodiert bzw. kategorisiert werden [148], [204]. Für den Schritt der Paraphrasierung müssen „Paraphrasierregeln“ festgelegt werden. Diese Regeln beinhalten unter anderem, wertende Äußerungen und redundante Begriffe zu entfernen und nur das inhaltlich Relevante zu berücksichtigen [148]. Im Folgenden werden die einzelnen Anwendungsfälle paraphrasiert aufgezeigt und mit PUC x („Paraphrasierter Use-Case“) betitelt.

PUC 1: Biokompatible Otoplastik mit einer Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung am Ohr. Richtlinie 90/385/EWG mit Risikoklasse IIa. Dies ist hilfreich für eine belastungsfreie Langzeitmessung des Blutdrucks und stellt damit einen Fortschritt für die Diagnose und Therapie von Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen dar.

PUC 2: Überwachung und Umrüstung von speziellen Versuchs- und Messanlagen für Zahnräder mittels Sensorik. Dabei existieren viele Störgrößen wie Vibration und Staub. Für den optischen Sensor wird eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit gefordert.

PUC 3: Erfassung von Temperatur, Feuchtigkeit oder Lichteinstrahlung mit richtungsbezogener Sensorinformation. Individuelle Raumsituation kann optimal über einen individualisierten Sensorträger erfasst werden. Variation der Grundgestalt des Sensorträgers soll in einem vorgegebenen Bereich realisiert werden.

PUC 4: Messung der Neigung für spezielle und hochsensible Schiffscontainer sowie Echt-Zeit-Überwachung von CO₂, Sauerstoff-Konzentration und Feuchtigkeit im Kühlcontainer.

PUC 5: Dezentrale Spannungs- und Energiemessung eines Testfahrzeugs mit vielen Störgrößen am Motor oder an der Batterie. Dabei sollte das Sensormodul möglichst klein sein.

PUC 6: Temperatur- und Feuchtemessung für einen M8-Stecker. Die Daten werden über ein Standard-Bluetooth-Modul auf ein mobiles Endgerät verschickt. Dabei handelt es sich um einen Prototyp, welcher später in die Massenfertigung gehen soll.

PUC 7: Miniaturisieren und Funktionalisieren von biokompatiblen Produkten für die Computersteuerung (Richtlinie 90/385/EWG mit Risikoklasse IIa) mit Sensoren zur Messung von Druck und CO₂.

Als nächster Schritt folgt die Reduktion bzw. die Codierung. Nach Mayring [148] gibt es keine bestimmte Regel, die besagt, auf welche Art und Weise codiert werden soll. Es wird lediglich empfohlen, die Codierung anhand der Fragestellung durchzuführen. In diesem Fall erfolgt die qualitative Inhaltsanalyse nicht direkt dafür, um Methoden und Prozesse herzuleiten, wie die Fragestellung der Arbeit impliziert, sondern vielmehr dafür, eine Vorarbeit durch das Ermitteln der Kontextfaktoren zu leisten. Mit diesen Kontextfaktoren kann dann anschließend die Fragestellung direkt angegangen werden.

Da es keinen Standard zur Kodierung gibt, wird nun ein Codierleitfaden speziell für Anwendungsfälle vorgestellt. Diese soll also einen Klassifizierungsansatz darstellen. Ziel ist es somit, die Anwendungsfälle, die aus verschiedenen Merkmalen bestehen, zu klassifizieren. Dabei kann von einer „Taxonomie“ gesprochen werden, wodurch komplexe Sachverhalte nach bestimmten Kriterien abstrahiert werden können [205]. Um diesen Abstraktionsprozess vollziehen zu können, müssen also die paraphrasierten Use-Cases in ihren Merkmalen gesplittet werden. Dies wirft die Frage auf, welche Attribute bzw. Merkmale für die Abstraktion verwendet werden können. Da es sich um Anwendungsfälle handelt, sollten die typischen Merkmale eines Anwendungsfalls verwendet werden. Diese Merkmale lassen sich aus der allgemeinen Definition eines Anwendungsfalls ableiten. Jacobson [206] gilt als der Pionier von Anwendungsfallmodellierungen. Er definiert einen Anwendungsfall als eine Menge von Möglichkeiten, ein System zu nutzen, um ein bestimmtes Ziel für einen bestimmten Benutzer zu erreichen. Im Rahmen dieser Definition kann ein Anwendungsfall auch als eine Abfolge von Interaktionen innerhalb eines Systems zwischen einem oder mehreren Akteuren interpretiert werden. Dabei hat der Anwendungsfall den Zweck, einen Mehrwert für mindestens einen der Akteure zu generieren. Daraus lassen sich drei Merkmale für einen Anwendungsfall ableiten, nämlich „Abfolge von Interaktionen“, „Akteure“ und „System“. Wendet man diese Attribute auf die analysierten Anwendungsfälle von iMST an, ergeben sich drei spezifische Attribute zur Kategorisierung der Anwendungsfälle. Diese sind:

- „Anwendungsbereich“ hergeleitet von „Akteure“
- „Funktion“ hergeleitet vom „Interaktionsablauf“
- „Produkt“ hergeleitet von „Systemen“

Am Beispiel des ersten Use-Cases wird die Herleitung der Merkmale in Abbildung 65 visualisiert.

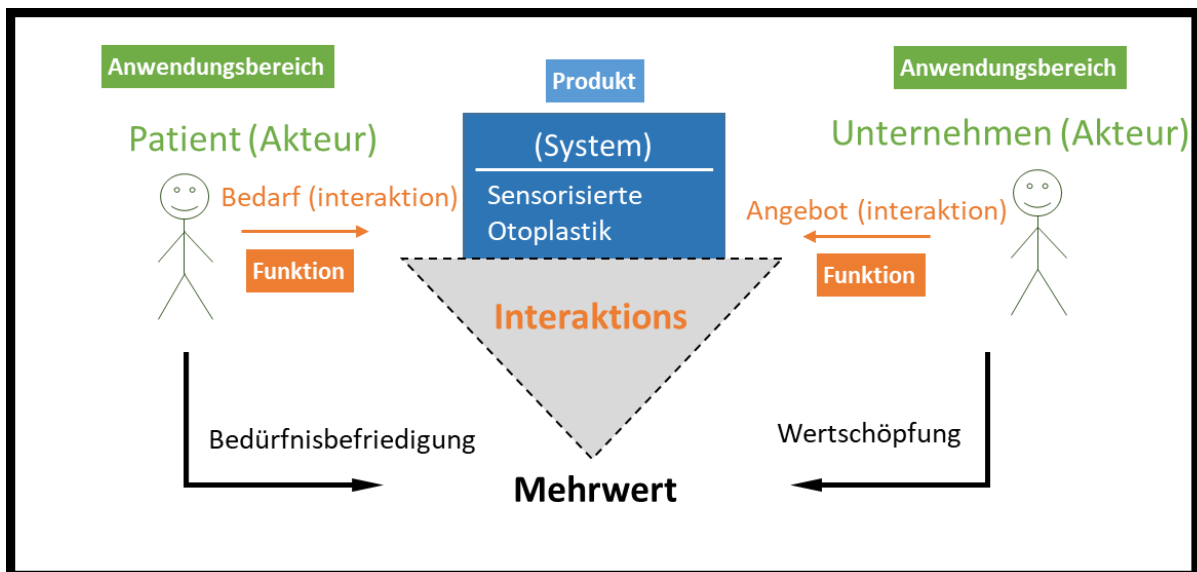


Abbildung 65: Herleitung spezifischer Merkmale zur Kategorisierung der Anwendungsfälle von iMST.

Entsprechend der erläuterten Vorgehensweise sind die Akteure „der Patient“ und das „Unternehmen“, das System die „sensorisierte Otoplastik“ und die Abläufe sind die Interaktionen „Bedarf“ und „Angebot“. Auf diese Weise ist es möglich, die Reduktion bzw. Abstraktion der PUC systematisch durchzuführen. Dieser Schritt wird mit der folgenden Tabelle 10 durchgeführt. Dabei wurden die PUC aufgelistet und entsprechend wie oben erläutert abstrahiert.

Tabelle 10: Abstraktionsprozess der PUC mit den hergeleiteten Merkmalen.

Paraphrasierte Use-Cases	Reduktion 1	Reduktion 2
Biokompatible Otoplastik mit einer Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung am Ohr. Richtlinie 90/385/EWG mit Risikoklasse IIa. Dies ist hilfreich für eine belastungsfreie Langzeitmessung des Blutdrucks und stellt damit einen Fortschritt für die Diagnose und Therapie von Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen dar	Individuelle und funktionelle Orthesen an Risikopatienten zur Messung der Vitalität.	- Medizintechnik - Hoch individualisiertes MST - Dauerhafte Messung am menschlichen Körper
Überwachung und Umrüstung von speziellen Versuchs- und Messanlagen für Zahnräder mittels Sensorik. Dabei existieren viele Störgrößen wie Vibration und Staub. Für den optischen Sensor wird eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit gefordert.	Nachrüstung mit Sensoren für Sondermaschinen zur präzisen Vermessung mechanischer Komponenten.	- Sondermaschinen - Individualisierte Produkte mit MST - Vermessung von Maschinenelementen
Erfassung von Temperatur, Feuchtigkeit oder Lichteinstrahlung mit richtungsbezogener Sensorinformation. Individuelle Raumsituation kann optimal über einen individualisierten Sensorträger soll erfasst werden. Variation der Grundgestalt des Sensorträgers soll in einem vorgegebenen Bereich realisiert werden.	Sensorlösungen für Smart Home/Büro zur Messung von Umweltparametern.	- Endverbraucher - Individualisierte Produkte mit MST - Messung von Umweltparametern
Messung der Neigung für spezielle und hochsensible Schiffscontainer sowie Echt-Zeit-Überwachung von CO ₂ , Sauerstoff-Konzentration und Feuchtigkeit im Kühlcontainer.	Smarte und intelligente Schiffscontainer zur Analyse von Umweltdaten.	- Transport und Logistik - Individualisierte Produkte mit MST - Messung von Umweltparametern
Dezentrale Spannungs- und Energiemessung eines Testfahrzeugs mit vielen Störgrößen am Motor oder an der Batterie. Dabei sollte das Sensormodul möglichst klein sein.	Leistungsmessung eines Aggregats in einem Testfahrzeug innerhalb der Vorserienentwicklung.	- Automobilindustrie - Individualisierte Produkte mit MST - Messung des realen Istwertes von Arbeitsmaschinen
Temperatur- und Feuchtemessung für einen M8-Stecker. Die Daten werden über ein Standard-Bluetooth-Modul auf ein mobiles Endgerät verschickt. Dabei handelt es sich um einen Prototyp, welcher später in die Massenfertigung gehen soll.	Intelligente Industriesteckverbinder als Prototyp oder MVP	- Industrie - Individualisierte Produkte mit MST - Messung von Umweltparametern
Miniaturisieren und Funktionalisieren von biokompatiblen Produkten für die Computersteuerung (Richtlinie 90/385/EWG mit Risikoklasse IIa) mit Sensoren zur Messung von Druck und CO ₂ .	Individuelle und funktionelle Produkte für Risikopatienten zur Messung der Vitalität und Computersteuerung	- Medizintechnik - Hoch individualisiertes MST - Messung des menschlichen Körpers und Steuerung anderer Systeme

Tabelle 10 zeigt sowohl eine maximal notwendige Detailsicht für die PUC als auch eine abstrahierte Sicht durch die Reduktion 1 und 2, die eine Grundlage für die Kategorisierung der gesammelten Anwendungsfälle bildet. Bestätigend ist zu sehen, dass das Merkmal „System“ immer ein iMST ist, da die zu Beginn gesammelten Daten Anwendungsfälle für iMST sind.

Nun ist es auch möglich, Anforderungen einfacher zu sammeln und den jeweiligen Anwendungsfällen zuzuordnen. Die Produkt- und Fertigungsanforderungen gehören zu den wichtigsten Einflussgrößen für einen PEP und damit auch zu den wichtigsten Kriterien für die Erstellung eines PEP [129], [207], [208]. Um diese Anforderungen zu generieren, wurden im Rahmen eines Workshops Befragungen von Personen durchgeführt, die an den Anwendungsfällen beteiligt waren bzw. Interesse hatten. Diese Befragung und die daraus generierten Anforderungen werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

4.3 Anforderungen an iMST

Für die jeweiligen Anwendungsfälle wurden jeweils 1-2 Personen, die entweder aus der Forschung oder Industrie stammen, identifiziert. Das Sampling war insofern einfach, als Personen ausgesucht wurden, die in den Anwendungsfällen direkt oder indirekt involviert waren. Somit haben die Teilnehmer die passende Erfahrung zu Aussagen über die möglichen Anforderungen. Dabei wurde, im Rahmen eines Workshops, die offene Frage gestellt: „Welche Anforderung ist für Sie am relevantesten ist und warum?“ Von insgesamt 7 Personen wurden die folgenden Anforderungen abgeleitet:

- Kosten
- Schadensfolgen/Zuverlässigkeit
- Fertigungszeit
- Hohe Losgröße/Produktionsprogramm

Um eventuelle Gemeinsamkeiten innerhalb der unterschiedlichen Use-Cases zu identifizieren, wurden diese Anforderungen bewertet. Hierfür wurden Bewertungskriterien erstellt, die sich aus den Begründungen für die Relevanz der Anforderung ergeben haben. Die Kriterien wurden in Tabelle 11 definiert.

Tabelle 11: Bewertungskriterien der Anforderungen für iMST.

Kriterien-Liste	Erläuterung/Skala
Relevanz Fertigungszeit [FZ]	Hoch: ≤ 2 Monate, Mittel: 3-6 Monate, Gering: 7-12 Monate
Auswirkungen bei Versagen/Schadensfolgen [SF] (Zuverlässigkeit)	Hoch: Personenschaden, Mittel: hoher Sachschaden, Gering: geringer Sachschaden
Relevanz der Kosten [K]	Hoch: Mikrosystem ist der wesentliche Kostenfaktor des Endprodukts, Mittel: Mikrosystem steht im gleichen Kostenverhältnis wie das Endprodukt, Gering: Mikrosystem ist wesentlich günstiger als das Endprodukt
Produktionsprogramm – Losgröße [PP]	Hoch: große Losgröße > 500 St., Mittel: mittlere Losgrößen >21-500 St., Gering: kleine Losgröße 1-20 St.

● = Hoch ◐ = Mittel ○ = Gering

Erläuterungen der Kriterien bzw. Anforderungen spielen auch deshalb eine wichtige Rolle, da dadurch der Beurteilungsfehler mit der Tendenz zur Mitte aufgehoben wird. Durch diese Methodik konnten nun Anforderungen sowie deren Wichtigkeit erhoben werden. Entsprechend sollten im letzten und fünften Schritt die bewerteten Anforderungen in den Reduktionsprozess integriert werden. Dadurch wird eine mögliche Bildung von Produktgruppen für iMST anhand von Anwendungsfällen geprüft. Diese Integration von PUC und bewerteten Anforderungen wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

4.4 Use-Case-basierte Methodik

Abbildung 66 zeigt das Schema und den logischen Ansatz der Methodik. Mit dieser können Produktgruppen charakterisiert sowie schnell und einfach zurückverfolgt werden. Diese sind z.B. dadurch gegeben, dass die Kosten und die Losgröße für eine bestimmte Produktgruppe eine eminente Rolle spielen. Die Merkmale der analysierten Produktgruppen sind wichtige Einflussfaktoren bzw. Kontextfaktoren für den PEP. Diese Methodik kann also dabei helfen, die Erstellung eines PEP mit den relevanten Kontextfaktoren zu definieren. Zudem basiert die Methodik auf Anwendungsfällen, wodurch die Praxistauglichkeit gewährleistet wird.

Paraphrasierte - Use-Case	Reduktion 1	Reduktion 2	Bewertung der Kriterien				Kategorie
Anwendungsbereich	Produkt	Funktion	Abstraktionslevel				Produktgruppe
			FZ	SF	K	PP	
Biokompatible Otoplastik mit einer Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung am Ohr. Richtlinie 90/385/EWG mit Risikoklasse IIa. Dies ist hilfreich für eine belastungsfreie Langzeitmessung des Blutdrucks und stellt damit einen Fortschritt für die Diagnose und Therapie von Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen dar.	Individuelle und funktionelle Orthesen an Risikopatienten zur Messung der Vitalität.	- Medizintechnik - Hoch individualisiertes MST - Dauerhafte Messung am menschlichen Körper	●	●	○	○	Produktgruppe A (= Kombination 1)
Überwachung und Umrüstung von speziellen Versuchs- und Messanlagen für Zahnräder mittels Sensorik. Dabei existieren viele Störgrößen wie Vibration und Staub. Für den optischen Sensor wird eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit gefordert.	Nachrüstung mit Sensoren für Sondermaschinen zur präzisen Vermessung mechanischer Komponenten.	- Sondermaschinen - Individualisierte Produkte mit MST - Vermessung von Maschinenelementen	○	●	●	●	Produktgruppe B (= Kombination 2)
Erfassung von Temperatur, Feuchtigkeit oder Lichteinstrahlung mit richtungsbezogener Sensorinformation. Individuelle Rumsituation kann optional über einen individualisierten Sensorträger soll erfasst werden. Variation der Grundgestalt des Sensorträgers soll in einem vorgegebenen Bereich realisiert werden.	Sensordlösungen für Smart Home/Büro zur Messung von Umweltparametern.	- Endverbraucher - Individualisierte Produkte mit MST - Messung von Umweltparametern	●	○	●	○	Produktgruppe C (= Kombination 3)
Messung der Neigung für spezielle und hochsensible Schiffscontainer sowie Echt-Zeit-Überwachung von CO ₂ , Sauerstoff-Konzentration und Feuchtigkeit im Kühlcontainer.	Smarte und intelligente Schiffscontainer zur Analyse von Umweltdaten.	- Transport und Logistik - Individualisierte Produkte mit MST - Messung von Umweltparametern	○	●	●	○	Produktgruppe D (= Kombination 4)
Dezentrale Spannungs- und Energiemessung eines Testfahrzeugs mit vielen Störgrößen am Motor oder an der Batterie. Dabei sollte das Sensormodul möglichst klein sein.	Leistungsmessung eines Aggregats in einem Testfahrzeug innerhalb der Vorserienentwicklung.	- Automobilindustrie - Individualisierte Produkte mit MST - Messung des realen Istwertes von Arbeitsmaschinen	○	●	●	○	Produktgruppe E (= Kombination 5)
Temperatur- und Feuchtemessung für einen M8-Stecker. Die Daten werden über ein Standard- Bluetooth-Modul auf ein mobiles Endgerät verschickt. Dabei handelt es sich um einen Prototyp, welcher später in die Massenfertigung gehen soll.	Intelligente Industriesteckverbinder als Prototyp oder MVP	- Industrie - Individualisierte Produkte mit MST - Messung von Umweltparametern	○	●	●	●	Produktgruppe F (=Kombination 6)
Miniaturisieren und Funktionalisieren von biokompatiblen Produkten für die Computertomierung (Richtlinie 90/385/EWG mit Risikoklasse IIa) mit Sensoren zur Messung von Druck und CO ₂ .	Individuelle und funktionelle Produkte für Risikopatienten zur Messung der Vitalität und Computersteuerung	- Medizintechnik - Hoch individualisiertes MST - Messung des menschlichen Körpers und Steuerung anderer Systeme	○	●	●	○	Produktgruppe G (=Kombination 7)

Produktionsprogramm [PP] Fertigungszeit [FZ] Schadensfolgen [SF] Kosten [K]

Abbildung 66: Induktive Kategorisierung aller analysierten iMST-Anwendungsfälle unter Berücksichtigung von Anforderungen zur Bildung von Produktgruppen.

4.5 Validierung der Methodik anhand eines neuen Use-Case

In diesem Kapitel soll ein neuer Anwendungsfall ausgesucht werden, für den mit der vorgestellten Methode Kontextfaktoren abgeleitet werden. Damit soll die Methodik validiert werden.

In dem folgenden Use-Case geht es um einen von den Entwicklern sog. „individualisierten Sensor“, welcher im Bereich der Automatisierungstechnik eingesetzt wird. Dabei geht es um einen induktiven Näherungssensor, der auf ein additiv gefertigtes Gehäuse integriert wird (siehe Abbildung 67). Das Produkt wurde in Kooperation mit Fraunhofer IPA, Arbug und Balluf entwickelt und gefertigt. Hierzu verwendeten sie den teilkristallinen Kunststoff PBT, der bisher noch nicht im 3D-Druck eingesetzt wurde. Der 3D-Druckprozess ermöglichte die Integration von elektronischen Komponenten wie Spulen, Platinen und Steckern. Die Entwickler stellten mehr als 30 Demonstratoren her, um deren Leistungsfähigkeit und Robustheit zu testen.

Das Hauptanwendungsfeld der beschriebenen Technologie liegt in der Automatisierungstechnik und Industrie, insbesondere im Bereich der Robotik und Fertigung, wo Sensoren zur Erkennung und Überwachung von metallischen Objekten und deren Positionierung eingesetzt werden. Die individualisierten Sensoren ermöglichen eine bessere Anpassung an unterschiedliche Umgebungen und Anwendungen [209].



Abbildung 67: Individualisierter Sensor in den unterschiedlichen Fertigungsstufen: CAD-Konzept (oben links), nach der Integration der elektronischen Komponenten (oben rechts) und als fertiges Produkt (unten). Fraunhofer IPA (2022).

Werden die gesammelten und oben aufgeführten Informationen nun in die Methodik eingesetzt, können die Kontextfaktoren sowie die Wertung identifiziert werden, wie Abbildung 68 zeigt.

Paraphrasierte - Use-Case	Reduktion 1	Reduktion 2	Bewertung der Kriterien				Kategorie
Area of application	Product		Abstraktionslevel				Produktgruppe
Function			FZ	SF	K	PP	
Induktiver Näherungssensor mit individualisiertem Gehäuse aus teilkristallinen Kunststoff PBT. Dieser soll für diverse Roboterarmfänger mit spezifischen Geometrien eingesetzt werden. Das Produkt soll die Erkennung und Überwachung von metallischen Objekten und deren Positionierung gewährleisten.	An Roboter angepasstes Gehäuse und standardisierter Sensor zur Messung von anderen metallischen Bauteilen	- Automatisierungstechnik - Individualisiertes Gehäuse mit Sensor - Messen von Objekten	●	●	●	●	Produktgruppe G (= Kombination 8)

Abbildung 68: Validierung der Methodik zur Identifikation von Kontextfaktoren.

4.6 Implikationen der Ergebnisse

Es konnten sieben Anwendungsfälle mithilfe der Methodik bearbeitet und ein weiteres für die Validierung eingesetzt werden. Die Anwendungsfälle wurden paraphrasiert und nach einer bestimmten Logik abstrahiert. Anschließend wurden die einzelnen Anwendungsfälle mit definierten bzw. skalierten Kriterien bewertet. Es galt zu untersuchen, ob iMST anhand von gewichteten Anforderungen zu generalisieren sind. Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine hohe

Heterogenität innerhalb der Anwendungsfälle von iMST besteht. Alle Anwendungsfälle unterscheiden sich in Bezug auf die Relevanz der Anforderungen. Auch innerhalb der gleichen Branche gibt es keine identische Anforderungsverteilung. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass die Charakteristik der Produktindividualisierung naturgemäß sehr heterogen und spezifisch ist. Folglich wurden keine Produktgruppen mit mehr als einem Use-Case innerhalb der iMST identifiziert.

Aus den Bewertungen der Anforderungen kann entnommen werden, dass die Kosten das wichtigste Kriterium darstellen, wobei im Bereich der Medizintechnik die Kosten als gering bis mittel relevant bewertet wurden. Weiterhin zeigt sich, dass es Anwendungsfälle gibt, bei denen eine Losgröße größer als 1 eine Rolle spielt. Es gibt also Anwendungsfälle, die vorerst in Losgröße 1 auf den Markt gehen, jedoch das langfristige Ziel haben, in die breite Masse zu gehen. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass beim Faktor Zeit ebenfalls unterschiedliche Anforderungen bestehen. Während zu Beginn davon ausgegangen werden kann, dass individualisierte Produkte schnell hergestellt werden, wie bspw. bei der Bestellung von additiv gefertigten Bauteilen, gibt es durchaus Anwendungsfälle, bei denen 3 – 12 Monate für die Fertigungszeit veranschlagt werden können. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass iMST eben keine „normalen“ individualisierten Produkte sind, sondern hier die technische Funktionalität im Vordergrund steht und dadurch eine gewisse Entwicklungszeit akzeptiert wird. Nicht überraschend ist die Tatsache, dass iMST, die innerhalb der Medizintechnik verwendet werden, hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit erfüllen müssen. Aber auch die anderen Anwendungsfälle, bis auf einen, schreiben der Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle zu. Es kann durchaus die Aussage getroffen werden, dass für iMST die Kosten und die Zuverlässigkeit essentielle Anforderungen sind. Zudem kann aus den Anwendungsfällen die Erkenntnis gezogen werden, dass der individualisierte Bereich überwiegend die Leiterbahnen und das Substrat beinhaltet. Damit einhergehend spielt die Werkstoffauswahl eine wesentliche Rolle und somit auch die potenziellen Fertigungsverfahren. Eine weitere Erkenntnis aus den Anwendungsfällen ist, dass bei allen Use-Cases bis auf einen die MID-Technik und digitale Fertigungsverfahren wie Drucktechnik und additive Fertigung verwendet wurden. Dies bestätigt die zu Beginn dieser Arbeit erwähnte Annahme, dass diese Technologien ein hohes Potenzial für iMST aufweisen.

Da diese Methodik keine konkreten Maßnahmen oder Prozesse untersucht hat, sollen im nächsten Kapitel mit empirischen Daten mögliche Maßnahmen und Prozesse für eine effiziente Entwicklung von iMST identifiziert werden. Durch die Generierung von Kontextfaktoren,

Maßnahmen (Methoden) und Prozessen wird ein solides Fundament für die Entwicklung eines PEP für iMST gelegt.

5 Methodik zur Erstellung einer integrierten Produktentwicklung für die MST

In diesem Kapitel werden die Daten generiert und systematisiert, die für einen ganzheitlichen PEP notwendig sind. Um möglichst repräsentative Schwachstellen eines Entwicklungsprozesses für iMST identifizieren zu können, beginnt dieses Kapitel mit einem Pilotprojekt. Das Ziel der Ist-Analyse des Pilotprojekts ist es, die Schwachstellen und somit Verbesserungspotenziale des Entwicklungsprozesses zu bestimmen. Wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, empfiehlt sich bei der Rationalisierung innerhalb der Konstruktion und Entwicklung eine Analyse des Ist-Zustandes für genau diesen Zweck. Für den Verbesserungsprozess wird der Lean-Development-Ansatz als Referenz verwendet. Die Modellierung und Beobachtungsergebnisse des Pilotprojekts werden ebenfalls in diesem Kapitel aufgezeigt. Für die Modellierung werden die Methoden und Inhalte aus dem Kapitel 2.2.1 berücksichtigt. Weiterhin ist aus Kapitel 2.2.5 bekannt, dass zur Identifikation von Schwachstellen eine Befragung der Betroffenen unumgänglich ist. Schließlich wird in diesem Kapitel der Optimierungsprozess umgesetzt wie in Abbildung 69 dargestellt.



Abbildung 69: Optimierungsprozess als Grundlage des PEP von iMST.

5.1 Pilotprojekt „Smart-Connector“

5.1.1 Ausgangssituation und Anforderungen

Bei der Auswahl des Pilotprojekts wurde darauf Wert gelegt, dass es sich um ein anspruchsvolles Entwicklungsprojekt handelt. Dabei soll es den in Kapitel 4 identifizierten Anforderungen genügen und einen hohen Individualisierungsgrad aufweisen. Wie aus Abbildung 66 entnommen werden kann, ist der vorgestellte und bewertete Anwendungsfall „Smart-Connector“ (siehe Kapitel 4.1.6) relativ anspruchsvoll. Für die Entwicklung und Herstellung hat er den Anspruch, dass diese möglichst kostengünstig erfolgen, er soll später in die Serie gehen, und die Fertigungszeit und Zuverlässigkeit haben mindestens eine mittlere Bedeutung. Der Kunde möchte das Produkt als MVP nutzen, da er sich noch nicht sicher ist, welche genauen Features wirklich relevant sind. Für den Kunden bedeutet ein MVP, dass das Produkt bereits kundentauglich ist, jedoch nur soweit, dass der Lead-User das entsprechende Feedback geben kann.

Die konkreten Anforderungen des Kunden beinhalten einen elektrischen Steckverbinder mit eingangsseitigen Kontakten sowie ein Gehäuse, das kundenspezifisch und individuell angepasst werden kann. Daher wurde das Produkt mit einem additiv gefertigten Werkzeugeinsatz produziert. Der Grund für den Spritzgussprozess mit additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen liegt darin, dass damit der Herstellprozess für die spätere Serientauglichkeit gewährleistet werden kann. Da das Bauteil auch bestückt werden muss, sollte es möglichst keine Gratbildungen aufweisen. Zudem handelt es sich noch um einen Bauteil, welches eine Geometrie mit Hinterschnitten aufweist. Somit müssen Schieber additiv gefertigt werden. Es müssen also die Anforderungen des Bauteils sowie die Besonderheiten und Restriktionen des Fertigungsprozesses, im Sinne des DfM, stark berücksichtigt werden (siehe Abbildung 70).

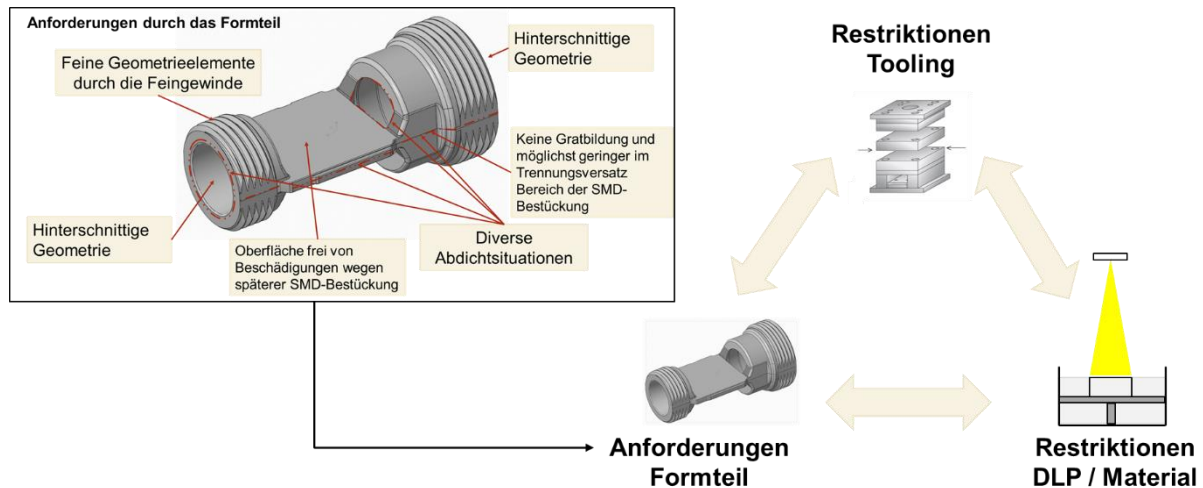


Abbildung 70: Zusammenspiel zwischen Anforderungen des Bauteils und Restriktionen des Fertigungsprozesses.

Die Restriktionen des ausgewählten Fertigungsprozesses sind unter anderem:

- Geringere Genauigkeiten der Absolutmaße und der Formtreue
- Geringere Oberflächengüte - insbesondere bei Geometrieelementen mit versetzten Schichten (Stufen) und in Bereichen mit Stützgeometrien
- Geringere mechanische Eigenschaften sowie Schwindungen des Werkzeugeinsatzes
- Geringe Wärmeleitfähigkeit, hohe Isolationswirkung des Bauteils

Die Komplexität wird dadurch erhöht, dass der *Rapid-Tooling*-Prozess unter Verwendung von Schiebern ein weitgehend unerforschtes Gebiet darstellt. Dies manifestiert sich in einem Mangel an Erfahrungswerten, welcher auch durch die aktuelle Fachliteratur belegt wird [210]. Dieser Mangel an Erfahrung stellt jedoch ein typisches Merkmal bei der Entwicklung von individualisierten Produkten generell dar.

Die folgenden zwei Kapitel beschreiben ausführlich die beobachteten Entwicklungs- und Fertigungsschritte. Um die Objektivität dieser Beobachtung zu gewährleisten, wurde eine moderate Teilnahme vorgezogen, da diese Art der Beobachtung eine gute Kombination aus Engagement und notwendiger Distanz ermöglicht [145]. Da dieses Projekt vom Land Baden-Württemberg gefördert wurde, war den Teilnehmern bekannt, dass die Ergebnisse öffentlich präsentiert werden. Jedoch waren sie nicht darüber informiert, dass die Entwicklungsschritte für das iMST-Projekt beobachtet werden. Aufgrund dieses Umstandes kann die Beobachtung als verdeckt eingestuft werden, wodurch das Beobachtungsparadoxon umgangen wird und eine Verhaltensänderung der Teilnehmer vermieden wird [211].

Die Schwerpunktsetzung der Beobachtung richtete sich auf die Entscheidungen, Vorgehensweisen und Herausforderungen der am PEP beteiligten Entwickler sowie auf die verwendeten Werkzeuge und Instrumente. Darüber hinaus wurden die zeitlichen Aspekte der Prozessschritte sorgfältig in Betracht gezogen und systematisch protokolliert. Beim Protokollieren wurde darauf geachtet, dass die in Abbildung 5 gezeigten Elementen eines Prozesses berücksichtigt werden. Darüber hinaus wurde ein besonderes Augenmerk auf Korrekturschleifen gelegt, da diese eine Kernproblem des PEP ist.

5.1.2 Beobachtung der Entwicklungsschritte

Abbildung 71 zeigt auf einer abstrakten Ebene die Entwicklungsschritte, die beobachtet und protokolliert werden konnten.

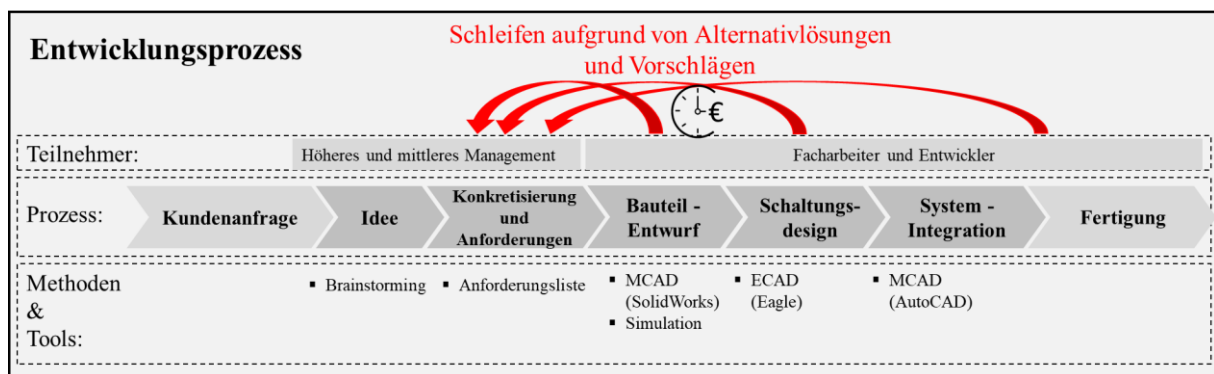


Abbildung 71: Entwicklungsprozess des Pilotprojekts.

Die **Kundenanfrage** begann mit einem relativ unkonkreten Wunsch des Kunden. „*Wir möchten als Hersteller von Steckverbindern am Ort des Geschehens messen.*“, hieß es vom Geschäftsführer und technischen Leiter. Da dieser Wunsch mit den strategischen Geschäftsfeldern des Herstellers übereinstimmt, fand ein Termin für die **Ideensammlung** statt. Mittels Brainstorming konnte dann die oben erwähnte Idee generiert werden. Jedoch war man sich nicht sicher, ob das technisch so funktioniert. Um die technische Machbarkeit prüfen zu können, sind **konkrete Anforderungen** notwendig. Diese wurden dann schriftlich übermittelt. Die wichtigsten Anforderungen zeigt Tabelle 12.

Tabelle 12: Anforderungen des „Smart-Connectors“

Anforderungen:
M8-Gewinde für industrielle Anwendungen
Für 4-adrige Stecker
Echtzeitmessung
Visualisierung über mobile Endgeräte
IP-Schutzklasse 67 und IP69K wasserdichte Lösung
Versorgungsspannungsbereich: 4-36V
Hohe Strombelastbarkeit: +/- 15A
Betriebstemperaturbereich: -40°C bis +85°C
Absoluter Luftdruckbereich: 300-1100 mbar
Absolute Feuchtigkeitsgenauigkeit: 5-95%
Konfigurierbarkeit der Funktionalitäten
Serientauglichkeit
Entwicklungszeit 3-6 Monate
Losgröße 1 - 10

Diese Anforderungen wurden an die Konstruktion übergeben. Dabei stellte sich die Frage, weshalb die Anforderungen nicht gleich an die Konstruktion und Layout-Designer vermittelt werden, damit die elektronischen Komponenten auch gleich bewertet und berücksichtigt werden können, wodurch Zeitersparnisse entstehen können, ganz im Sinne des SE. Es wurden zwar Vorabinformationen versendet, jedoch kann eine genaue Bewertung durch einen Layout-Designer nur dann durchgeführt werden, wenn das Formteil modellhaft visualisiert ist und zur Verfügung steht, denn der Layout-Designer muss die Flächen, die zu bestücken und mit Leiterbahnen zu versehen sind, genauestens kennen. Diese Vorgehensweise ist deshalb so wichtig, da es sich hier um 3D-Bauteile handelt und die Leiterbahnführung, bspw. der Pitch, im Bereich der MST sehr eng sein kann (50 – 100 µm). In diesem Fall waren es 300 µm, die noch über einen Radius (500 µm) verlaufen, wodurch die Machbarkeit weiter erschwert wird (siehe Abbildung 72). Das heißt, es muss vorerst das Bauteil bzw. Formteil entworfen werden, da dies das Substrat bzw. das Fundament und somit die geometrischen Grenzen bildet, auf

denen bzw. auf deren Basis die Elektronik aufgebaut werden kann. Diese geometrischen Grenzen sind über schriftliche Anforderungen schwer nachzuvollziehen.²⁵

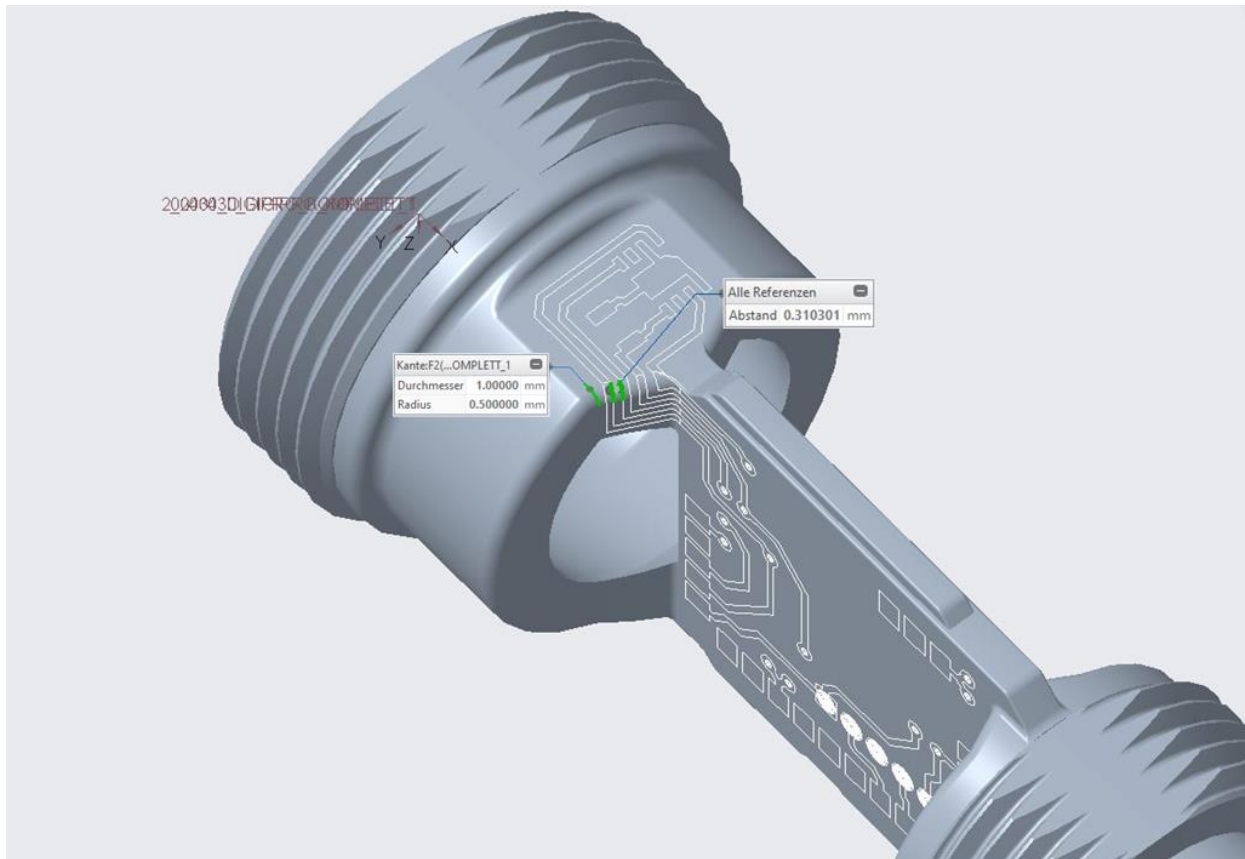


Abbildung 72: Parameter Leiterbahndesign mit Radius und engem Space.

Die vorerst separate und sequentielle Betrachtung der Mechanik und Elektronik ist auch dadurch bedingt, dass die Schaltpläne in 2D entworfen werden (siehe Abbildung 73). Da das Bauteil mittels Spritzguss und einem additiv gefertigten Werkzeugeinsatz hergestellt werden soll, waren die Erfahrungswerte relativ gering.

²⁵ Hierfür empfiehlt sich, die Dissertation von Börsting [111] zu betrachten, da sich diese mit Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik beschäftigt.

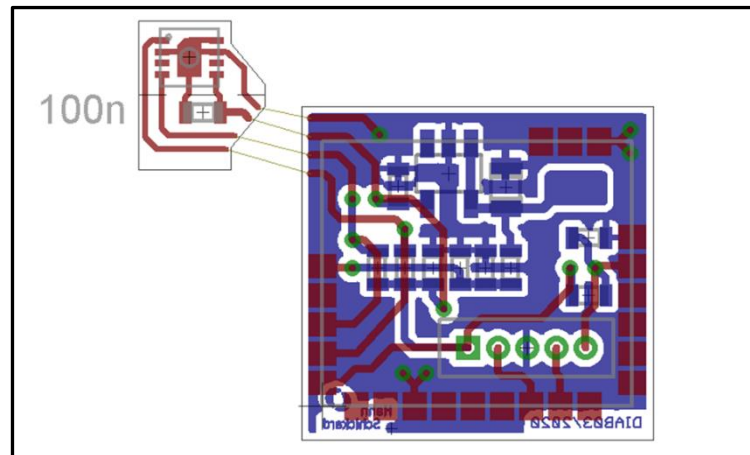


Abbildung 73: Bestückungsplan 2D-Layout.

Somit musste auch eine Simulation durchgeführt werden. Die Simulation ist auch dafür hilfreich, mögliche Bindenähte zu identifizieren, die die Integration der elektronischen Komponenten stören könnten. Daher zeigt die Abbildung 74 unterschiedliche Einspritzpunkte (siehe in Rot), die die Bindenähte beeinflussen.

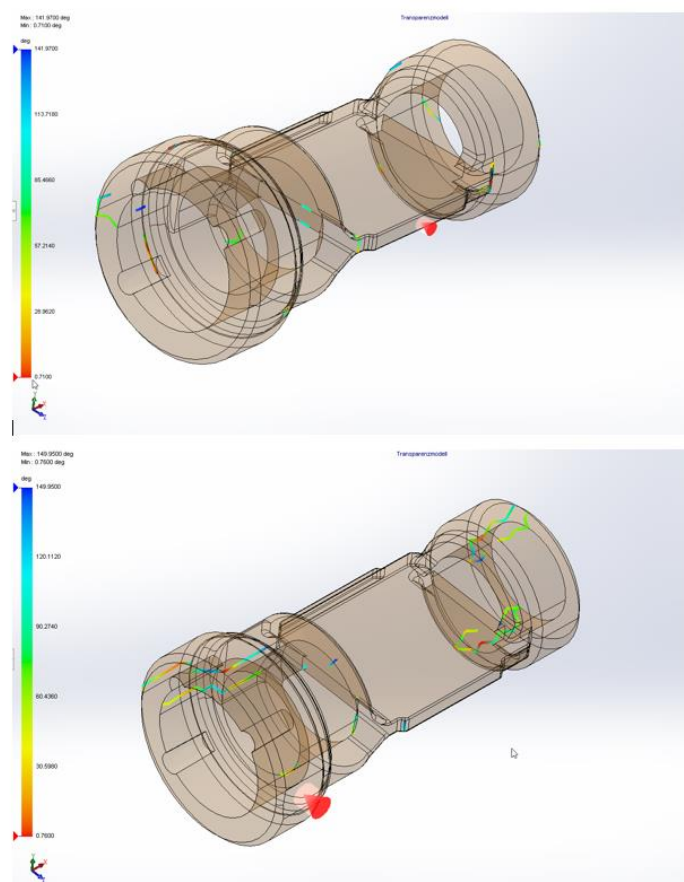


Abbildung 74: Simulation Spritzguss-Prozess zur Identifikation von Bindenähten.

Anhand der Simulationsergebnisse und der Annahmen des Konstrukteurs mussten Anpassungen durchgeführt werden. Dies führte also zu einer Korrekturschleife, die mit dem Kunden auch abgestimmt werden musste. Dabei handelte es sich unter anderem um die Stufenbildungen aufgrund der additiven Fertigung. Parallel dazu gab es ebenfalls Bedenken über die elektronische Machbarkeit. Dabei handelte es sich vor allem um die Nutzbarkeit der Fläche zwischen den Gewinden, da dort ein standardisiertes elektronisches Modul sehr günstig und einfach zu platzieren wäre. Jedoch war dieses Modul um ein paar mm größer, als es das Bauteil hergibt. Dennoch wurde dieser Vorschlag beim Kunden eingebracht und die damit einhergehenden Vorteile erwähnt. Auch diese Anpassung wurde akzeptiert, sodass eine visuelle Systemintegration durchgeführt werden konnte, um diese vom Kunden freigeben zu lassen. Diese zeigt die folgende Abbildung 75, die zugleich auch die mechanischen und elektrischen Komponenten visualisiert.

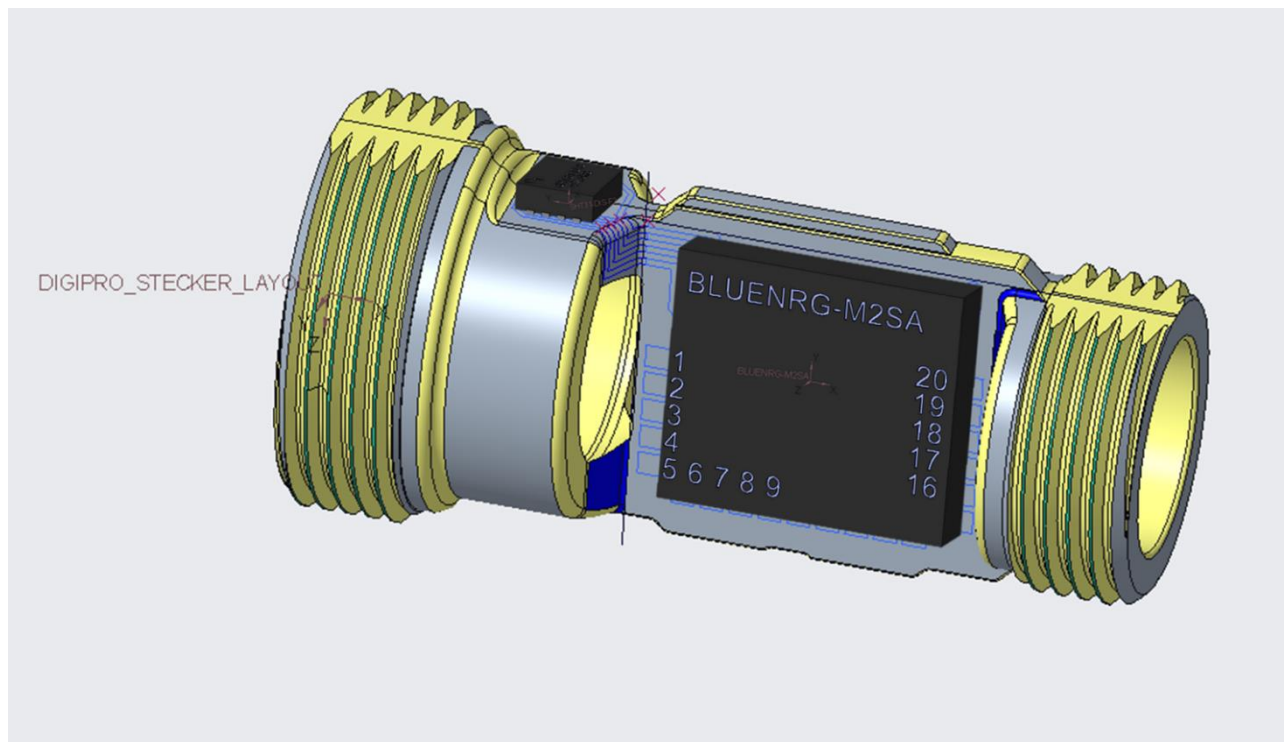


Abbildung 75: Smart-Connector-Entwurf Systemintegration.

Mit diesem finalen Entwurf wurde die Freigabe eingeholt und die Produktion konnte beginnen. Mit der Freigabe startete auch die Programmierung der Firmware für die drahtlose Kommunikation und Visualisierung an einem mobilen Endgerät. Innerhalb der Systemintegration wurden keine Korrekturschleifen benötigt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in der mechanischen und elektrischen Entwurfsphase bereits Bedenken und auf Erfahrung basierende Annahmen schon berücksichtigt worden sind. Die Zeiten für die oben

genannten Schritte werden im Kapitel 5.1.4 „Modellierung des Pilotprojekts“ mit der Durchlaufzeit (DLZ) dargestellt.

5.1.3 Beobachtung der Fertigungsschritte

Der Herstellprozess besteht aus digitalen Fertigungsverfahren sowie Verfahren, die kompatibel zu den digitalen Fertigungsverfahren sind. Somit kann von einer digitalen Prozesskette gesprochen werden. Ziel ist es dabei, das im vorherigen Kapitel vorgestellte Produkt herzustellen. Die Fertigungsschritte werden in Abbildung 76 dargestellt.

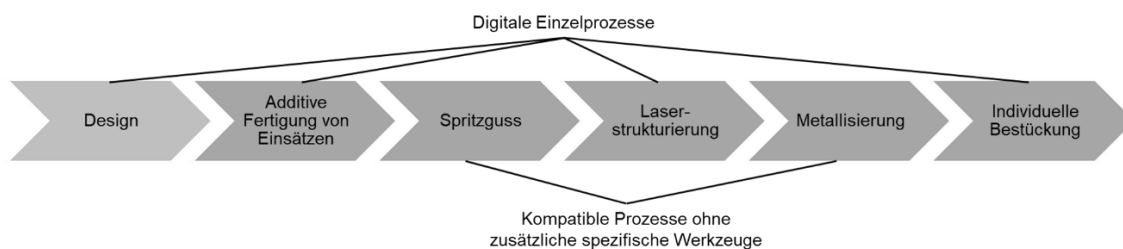


Abbildung 76: Digitale Prozesskette zur Herstellung des „Smart-Connectors“.

Der Prozess beginnt damit, dass die in der Design- bzw. Entwicklungsphase erstellten digitalen Modelle des Bauteils an die jeweiligen Prozesseigner versendet wurden. Bereits frühzeitig konnte festgestellt werden, dass, aufgrund des **Rapid-Tooling-Prozesses**, ein anderes Material für das Bauteil („Smart-Connector“) prozesssicherer wäre. So entstand schon im ersten Schritt des Fertigungsprozesses eine weitere Iterationsschleife. Nachdem diese Materialänderung vom Kunden akzeptiert worden ist, konnte der Werkzeugeinsatz mit dem DLP-Verfahren hergestellt werden. Da in diesem Bauteil Hinterschnitte vorhanden sind, mussten Schieberwerkzeuge mittels DLP-Verfahren „gedruckt“ werden, wie aus Abbildung 77 entnommen werden kann.

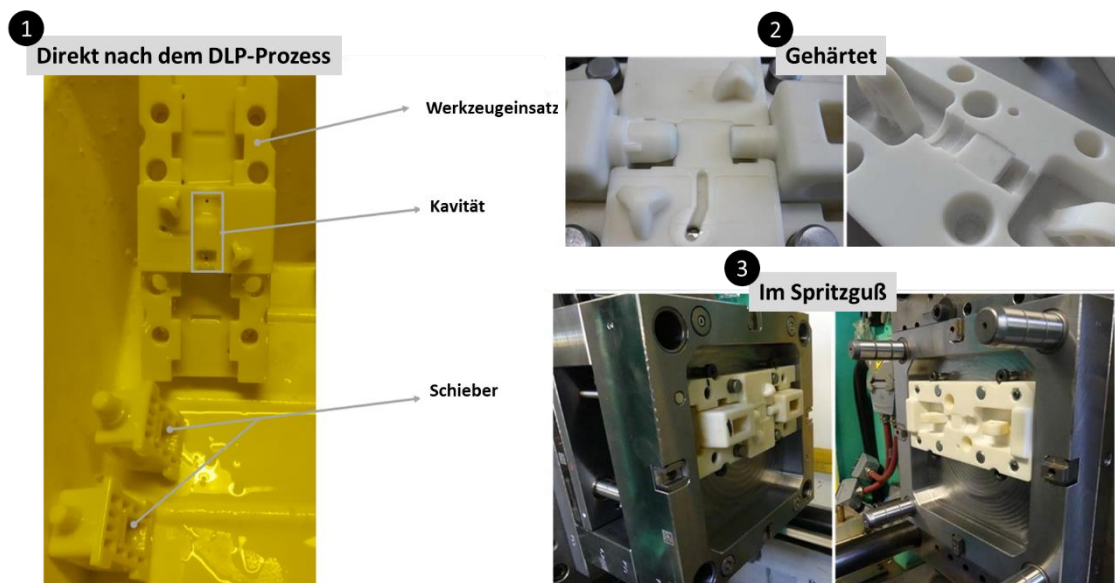


Abbildung 77: Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze mit Schieber.

Die Gesamtabmessungen des Werkzeugs betragen nach der Montage 179,5 mm × 80 mm × 56 mm. Das Bauteil, welches mit dem Werkzeug produziert wird, ist dagegen nur etwa 37 mm lang und hat einen maximalen Durchmesser von 18 mm. Das Spritzgießmaterial wird über die Spritzeinheit über die Angussöffnung auf der Rückseite des Spritzgießwerkzeugs zugeführt. Anschließend wird es durch die Auswerfergeometrie um 90° in die Trennebene umgeleitet (siehe Abbildung 78). Dort bewegt es sich entlang des 20 mm langen Angusses und tritt schließlich durch den 0,92 mm großen Anschnitt in die Kavität ein. Die Auswerferform verfügt über 3 Auswerferbohrungen: eine in jedem Gewinde (Ø1,9 mm) und eine weitere für den Angusszieher (Ø2,9 mm).

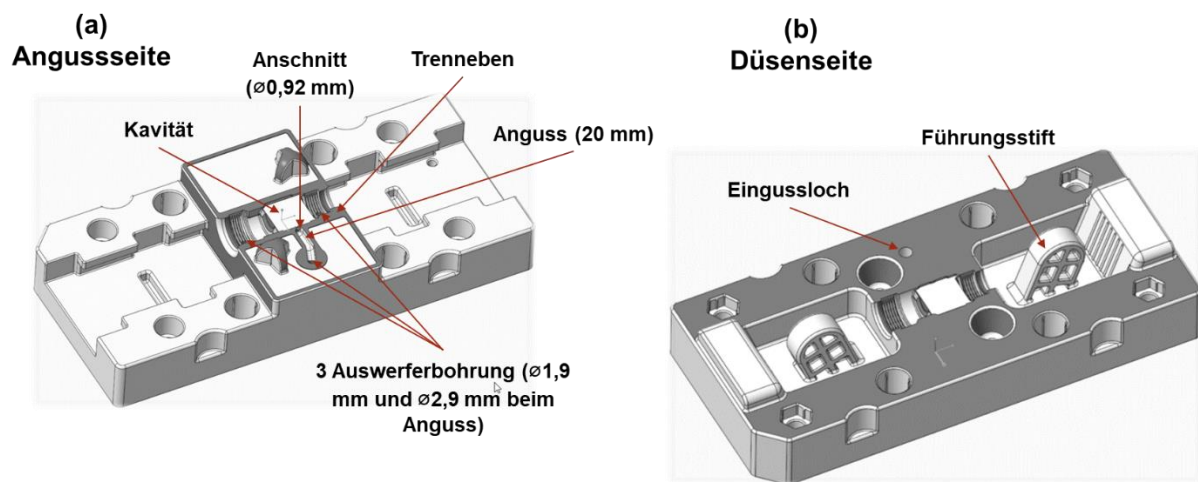


Abbildung 78: Überblick über den Werkzeugeinsatz (CAD).

Anzumerken ist, dass aufgrund der kleinen Größe des Bauteils die Schwindungen sowohl für den Werkzeugeinsatz selbst als auch für die Stützstrukturen eine besondere Bedeutung und Herausforderung darstellten. Nachdem die Werkzeugeinsätze bereitgestellt waren, folgte der



Abbildung 79: Fehlerhafte Bauteile vom Rapid-Tooling-Prozess.

Spritzgussprozess. Aufgrund der Einzigartigkeit dieses Prozesses und der damit einhergehenden Komplexität des Forschungsfeldes waren diverse Experimente erforderlich, um einen hinreichenden Kenntnisstand zu erlangen und kundentaugliche Bauteile fertigen zu können.²⁶ Unter anderem sind Fehler am Bauteil wie Risse aufgrund einer längeren Verweilzeit des Materials beim Spritzguss oder auch Materialanhäufungen aufgrund eines Defektes am Werkzeug aufgetreten (siehe Abbildung 79). Anzumerken ist jedoch auch, dass bevor diese Fehler auftraten, 10 fehlerfreie Teile aus einem laserdirektstrukturierbaren, glasfasergefüllten PET+PBT-Material spritzgegossen wurden, bevor die genannten ersten Schäden am Bauteil und Werkzeug auftraten. Da das Werkzeug ebenfalls beschädigt wurde, musste erneut ein Werkzeugeinsatz hergestellt werden. Mit dem zweiten Werkzeugeinsatz, der weiter optimiert wurde, konnte schließlich ein anforderungsgerechtes Bauteil hergestellt werden. Mit dem Werkzeugeinsatz konnten ca. 30 Bauteile produziert werden. Im Gegensatz zu den vorherigen Schritten liefen die anschließenden Prozesse relativ reibungslos ab, das heißt ohne Iterationsschleifen und Optimierungsarbeiten. Daher wurden die Bauteile an die Laserstrukturierung, Metallisierung und Bestückung übergeben, die die erforderlichen Aufgaben durchgeführt haben. Aufgrund des zylinderförmigen Bauteils wurden auch keine Ösen für die Metallisierung benötigt. Es wurde dabei betont, dass das ein glücklicher Zufall

²⁶ Um mehr Informationen über diese Versuche und Erkenntnisse zu erhalten, siehe [210].

war und eigentlich in der Entwicklung nicht berücksichtigt wurde. Abbildung 80 zeigt die Fertigungsschritte und deren Ergebnis.



Abbildung 80: Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte.

5.1.4 Modellierung des Pilotprojekts

Im vorliegenden Kapitel werden die beobachteten Entwicklungs- und Fertigungsschritte in eine systematische und anerkannte Darstellungsmethode überführt, um eine klare und verständliche Strukturierung der erfassten Informationen zu ermöglichen. Eine präzise Visualisierung des PEP gewährleistet eine einheitliche Vorstellung über die Art und den Umfang der zu untersuchenden Prozesse unter allen Teammitgliedern. Dies erhöht die Effektivität und Effizienz des Entwicklungsprozesses, da eine gemeinsame Basis für Entscheidungsfindung und Zusammenarbeit im Team geschaffen wird [212]. Folglich wird eine Ist-Analyse durch die Anwendung der Prozessdarstellungsmethode Swim-Lane durchgeführt. Es gäbe andere Möglichkeiten, den Prozess darzustellen, jedoch wurde die Entscheidung für die Swim-Lane-Darstellung getroffen, da sie die abteilungsübergreifende Kommunikation hervorhebt, standardisiert ist (siehe auch Tabelle 5) und mit dem Lean-Development-Ansatz im Einklang steht. Die Swim-Lane-Darstellung wurde insofern „modernisiert“ verwendet, als etwa Icons verwendet worden sind, um bspw. bestimmte Tools hervorzuheben, die eine besondere Relevanz für diese Arbeit haben. Für die Erstellung wurde das Tool „yEd“ verwendet, welches weit verbreitet und anerkannt für Prozessvisualisierungen ist. Bei der Ist-Analyse wurden die einzelnen Interaktionen der Beteiligten aufgenommen und dargestellt. Dabei konnten durch die Swim-Lane-Darstellung die einzelnen Interaktionen den jeweiligen Gruppen zugeordnet

betrachtet werden. Anschließend wurde diese Ist-Analyse mit den jeweiligen Beteiligten diskutiert. Durch diese Diskussion konnten Optimierungsansätze sowie die Prozess- bzw. Bearbeitungszeiten festgehalten werden (siehe Anhang D & Abbildung 81). Die Optimierungsansätze, die sowohl während der Beobachtung der Entwickler erwähnt als auch vom Beobachter selbst vorgeschlagen und entdeckt wurden, sind entsprechend sternförmig markiert. Die Durchlaufzeit (DLZ) des gesamten Prozesses konnte im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung festgehalten werden. Das Projekt begann mit der offiziellen Projekteröffnung und endete mit der Übergabe des „Smart-Connectors“. Die Prozesszeit (PZ), ist im Vergleich zum Kapitel 2.2.5 bzw. zu Abbildung 41, nicht nur die wertschöpfende Zeit, sondern inkludiert auch die Entwurfs- und Vorbereitungszeit. Fehlerbehebungen, Wartezeiten sowie Korrekturschleifen gehören dabei nicht zur PZ. Es ist dabei zu beachten, dass die Größe der farblichen Markierung von PZ nicht immer direkt mit der zugewiesenen Zahl korreliert (siehe rechte Spalte Abbildung 81). Durch die Modellierung des Prozesses können die Elemente innerhalb der Swim-Lane auch als Basis für Messgrößen bzw. Kennzahlen verwendet werden.²⁷ Diese wurden in Tabelle 13 dargestellt. Dabei soll auch das Verhältnis zwischen PZ und DLZ aufgestellt werden (siehe Formel 4).

Die resultierenden Erkenntnisse und Maßnahmen werden im folgenden Kapitel ausführlich erläutert. Dabei geht es einerseits darum, geeignete Maßnahmen zu identifizieren, und andererseits, zielgerichtete Fragen für das Experteninterview zu formulieren. Die Ist-Analyse dient somit auch als Grundlage für das notwendige Verständnis, um Experteninterviews durchzuführen. Das Experteninterview selbst wird im folgenden Kapitel detailliert beschrieben.

²⁷ Damit sind die Icons, Symbole und Quadrate in einer Swim-Lane gemeint.

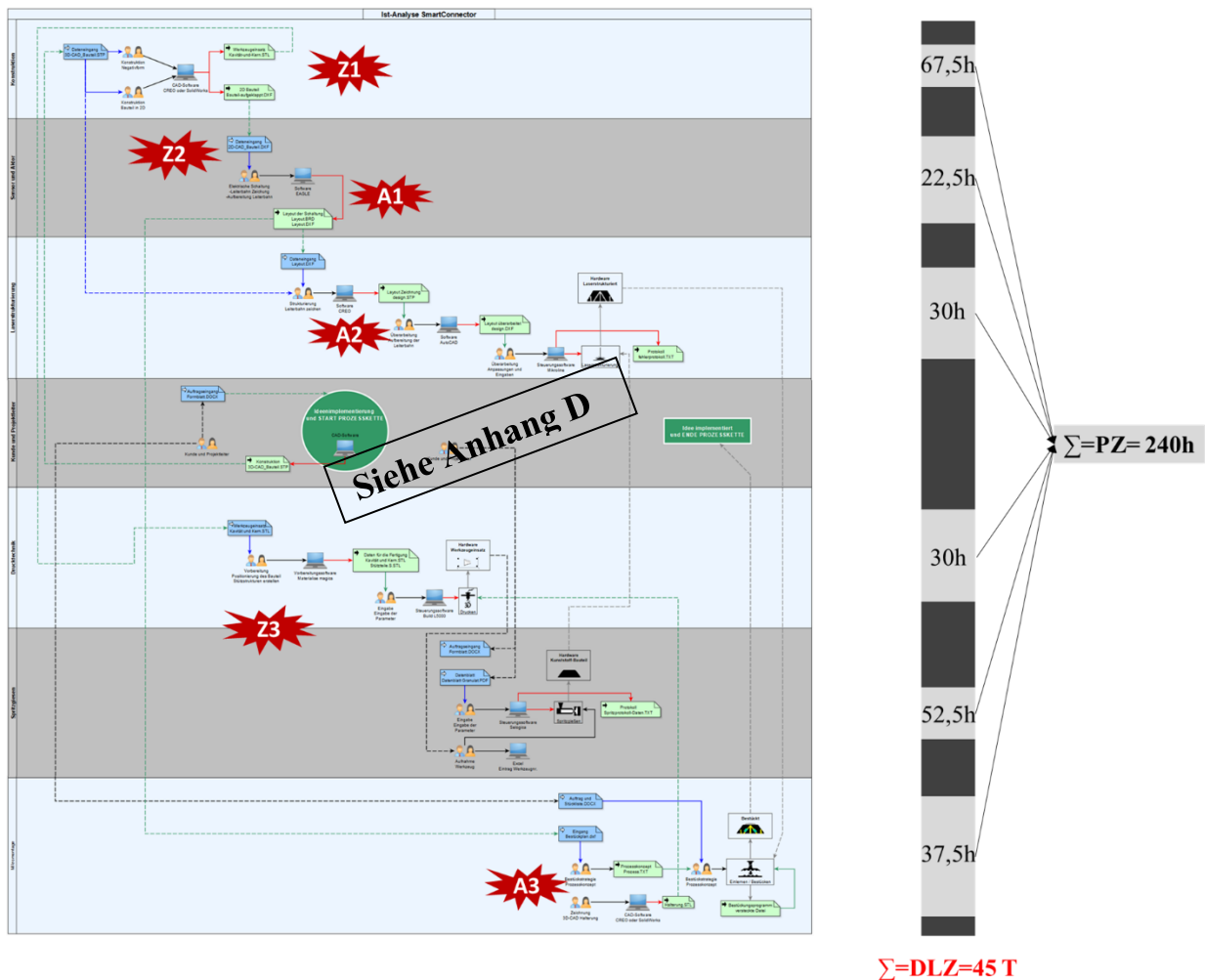


Abbildung 81: Ist-Analyse des „Smart-Connectors“.

Tabelle 13: Kennzahlen aus der Ist-Analyse des Pilotprojekts.

Kriterien/Kennzahlen	Erläuterung	Ausprägung
Anzahl der verwendeten Softwaretools (CAD/CAM)	Alle Softwarelösungen, die nötig sind inkl. Maschinensteuerung	9
Mitarbeiter	Alle Mitarbeiter, die im Prozess involviert waren	15
Diversität der Datenformate	Alle nötigen Dateneingänge und -ausgänge	dxg, step, stl, eagle, xlsx
Hilfs- und Sekundärkomponenten		2x Werkzeuge aus Kunststoffen, 2 Halterungen aus Kunststoff
Fehlerhafte Bauteile	Testteile und Ausschuss	17

5.2 Zwischenfazit des Pilotprojektes als Basis der Befragung

Durch die im vorherigen Kapitel gezeigte Ist-Analyse zur Entwicklung und Herstellung von iMST können nun Optimierungsansätze und Schwachstellen identifiziert werden. Diese wurden zum einen vom Beobachter selbst entdeckt und zum anderen von an der Entwicklung Beteiligten erwähnt. Der Beobachter hat die selbst entdeckten Optimierungsansätze und Schwachstellen vom jeweiligen Sachbearbeiter bestätigen lassen. Die Verbesserungsansätze bzw. Optimierungspotenziale werden in Tabelle 14 genauer erläutert:

Tabelle 14. Optimierungsansätze aus dem Pilotprojekt.

Zeitliche Faktoren	Fachbereich	Erläuterung
Z1:	Konstruktion	Änderung des Werkzeugdesigns aufgrund des individuellen Prozesses und mangelnder Erfahrung mit dem Prozess. Es wurden mehr Simulationen durchgeführt als sonst üblich. Anpassungen der Stützstrukturen waren aufgrund der Schwindungen ebenfalls nötig, da im Vergleich zu größeren Bauteilen die Schwindungen bei kleinen Bauteilen erheblich sein können. Daher wurden die Stützstrukturen neu entworfen und so wurde die Schwindung am Werkzeugeinsatz nach dem DLP-Prozess minimiert.
Z2:	Elektronik	Vorschlag, das Bauteil in Bezug auf die Elektronik zu vergrößern, um den Prozess zu vereinfachen, da mit der Vergrößerung eine standardisierte Komponente (Funkmodul) ausgewählt werden konnte und somit mögliche Aufwände, wie das Neu-Design des Layouts, vermieden werden. Durch diese Änderung kamen zeitliche Verzögerungen zustande.
Z3:	Spritzguss & Drucktechnik	Da der Spritzgussprozess ebenfalls neu war im Hinblick auf die entsprechenden Anforderungen und Parameter, mussten mehrere Versuche gefahren werden. Das Werkzeug wurde beim ersten Versuch beschädigt und musste daher erneut hergestellt werden. Darüber hinaus wurde beim ersten Versuch die Erfahrung gewonnen, dass andere Materialien prozesssicherer sein könnten. Derartige Korrekturschleifen und Erkenntnisse führen ebenfalls zu längeren Warte- und Genehmigungszeiten.
Automatisierungsfaktoren	Fachbereich	Erläuterung
A1	Elektronik	Aufgrund der notwendigen räumlichen Gestaltung der Schaltung ist das Designen eines Layouts für den Designer herausfordernd, vor allem deshalb, da die Schaltung in 2D erstellt werden muss, welche dann auf ein 3D-Bauteil aufgesetzt wird. Daher muss der

		Designer bei der Erstellung der 2D-Zeichnung die spätere 3D-Rekonstruktion berücksichtigen, was sehr anspruchsvoll sein kann und somit ein gewisses Fehlerpotenzial birgt.
A2	Strukturierung	Unter Nutzung mehrerer Software-Tools wird das elektrische Layout auf das Bauteil projiziert, sodass die Laseranlage die korrekten Befehle und die notwendige Datenausgabe erhält (Eagle → Autocad → Creo → Autocad → Lasersteuerung). Es entstehen bei der Projektion unter anderem Überlappungen der Leiterbahnen an Radien und auf Flächen, wodurch Produktionsfehler entstehen können. Auch diese Korrektur muss von Hand durchgeführt werden.
A3	Bestückung	Viele Arbeitsschritte wurden manuell gemacht wie vor allem das „Teachen“ der Bestückanlage. Ebenso müssen die Bestückungsstrategien individuell durchdacht und ggf. eine Halterung entworfen und hergestellt werden. Simulationen von Prozessabläufen, bspw. einer Kollisionserkennung, könnten ebenfalls durch eine Automatisierung effizienter gestaltet werden. So findet auch das Routen und Placement in 2D statt, wodurch die Arbeit des Bestückers erschwert wird.

Es ist offensichtlich, dass die Automatisierung zu einer Verbesserung führen kann, die sich auch in einer Zeiteinsparung niederschlägt. Eine gruppenunabhängige Optimierung wäre auch durch die Anwendung des *Co-Design*-Konzepts gegeben. Dadurch würden einige Korrekturschleifen und Freigabeprozesse mit den Kunden wegfallen. Letztendlich bestätigt dieses Pilotprojekt unter anderem das Konzept von Ozdemir [49], welches bei individualisierten Produkten das Co-Design unterstreicht. Eine offene Frage besteht darin, wie eine solcher strikter *Co-Design*-Ansatz in der Praxis umgesetzt werden kann, da er eine umfassende Einbeziehung aller Beteiligten von Anfang an erfordert. Dies würde bedeuten, dass alle Beteiligten bereits in der Anforderungsphase involviert wären, was je nach Größe des beteiligten Personenkreises als nicht praktikabel angesehen werden kann. Meistens sind es zeitliche Gründe, weshalb nicht alle Beteiligten in einer frühen Phase involviert werden können. Demnach wäre ein Tool von Vorteil, welches eine praktikable und einfache Möglichkeit bietet, um Personen, die keine Fachkräfte sind, sondern Mitarbeiter aus dem Vertrieb, möglichst viel Wissen bereitzustellen. Die Disziplin des Wissensmanagements beschäftigt sich mit derartigen Herausforderungen, indem sie Methoden und Werkzeuge entwickelt, um das Wissen von Fachexperten für nicht spezialisierte Personen zugänglich und verständlich zu machen [213]. Dies kann also dazu beitragen, Wissen und Erfahrung zu teilen und die Zusammenarbeit innerhalb von Teams und Organisationen zu verbessern. Dadurch wäre auch eine Sammlung

von Erfahrungen gegeben, was insbesondere für derartige Anwendungen eine wichtige Rolle spielen kann.

Um diesen Prozess bzw. das Pilotprojekt für ähnliche Arbeiten vergleichbar zu machen bzw. die Messbarkeit bei anderen Entwicklungsprojekten zu ermöglichen, wurde der WQ anhand der Formel 4 berechnet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass 1 Arbeitstag 7,5h entspricht. Resultierend ergibt sich die folgende Berechnung:

$$WQ (pilot) = \frac{32 \text{ Arbeitstage (PZ)}}{45 \text{ Arbeitstage (DLZ)}} = 0,71$$

Wird dieser Quotient mit anderen Fällen verglichen, scheint dieser Wert sehr hoch zu sein. Das liegt jedoch daran, dass in der PZ nicht nur die wertschöpfende Zeit berücksichtigt worden ist, sondern auch die notwendigen Entwicklungsaktivitäten, wie bereits oben in Kapitel 5.1.4 beschrieben.

Eine weitere Auffälligkeit, die zur Optimierung des Prozesses beitragen kann, ist die systematische Sammlung von Anforderungen. Dies wäre deshalb von Relevanz gewesen, da es eine Möglichkeit geboten hätte, individualisierte Bereiche mit geringem Spielraum von Bereichen mit großem Spielraum schnell zu unterscheiden. Dies hätte auch dazu beigetragen, Anfragen von Entwicklern bezüglich möglicher Toleranzen und Spielräume zu reduzieren. Des Weiteren könnte in Betracht gezogen werden, ein CAD-Tool zu verwenden, welches MCAD und ECAD optimal kombiniert, da zu viele Softwarelösungen in Kombination verwendet werden mussten – wie auch aus Tabelle 14- A2 und Tabelle 13 entnommen werden kann. Damit einhergehend müssen unterschiedliche Datenformate erstellt werden. So muss eine dxf-Datei in eine step-Datei umgewandelt sowie bearbeitet und anschließend wieder in eine dxf-Datei umgewandelt werden. Diese Vorgehensweise wird deshalb ausgeführt, da so individuelle und komplexe Anwendungen realisiert werden können. Folglich ist es lohnenswert, eine genaue Recherche über M- und E-CAD-Lösungen durchzuführen und ggf. einzusetzen. Ein M- und E-CAD-System könnte auch weitere Vorteile bringen, die zur Automatisierung beitragen könnten. Um ein geeignetes und passendes CAD-System zu identifizieren, ist es notwendig, konkrete Anforderungen zu definieren. Dafür wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Anforderungsliste für potenzielle 3D-CAD-Systeme erstellt, die die Entwicklung und Herstellung von iMST erheblich verbessern könnten. Diese Anforderungsliste wurde mithilfe der Methode des „Idealen Endresultates“ von der „Theorie des erfinderischen Problemlösens“ TRIZ ermittelt. Das Ergebnis zeigt Tabelle 15. Eine derartige und konkrete Sammlung von

Anforderungen ist insbesondere für das Software-Engineering die optimale Grundlage und gehört zu den wichtigsten Tätigkeiten innerhalb der Entwicklung oder Weiterentwicklung von Softwarelösungen [214]–[216]. Die Anforderungen in Tabelle 15 wurden von den in das Pilotprojekt involvierten Gruppenleitern aufgeschrieben.

Tabelle 15. Sammlung von Anforderungen für eine ideale MCAD&ECAD Softwarelösung.

Request Number	Area	Requirements Description
1.1	LAS (Laserstrukturierung)	Ausgabe in "dxf" Format
1.2	LAS	Überflüssige Linien (nicht nötige Konturlinien) nicht mit exportieren, d. h. alles was nicht gebraucht wird wie die Außenkontur und 3D-Polylinien, die für die entsprechende Pose benötigt werden.
1.3	LAS	Automatische Ermittlung und Ausgabe aller benötigten Posen im dxf-Format. Bei der Ermittlung ist darauf zu achten, dass beim Lasern der Winkel am Bauteil 70° nicht übersteigt. Zudem müssen vorher im 3D-Programm festgelegte Bereiche, die eine sehr glatte Oberfläche benötigen, zwingend in der 0°-Stellung gelasert werden. Zudem ist darauf zu achten, dass möglichst wenig Posen gewählt werden.
1.4	LAS	Ausgabe einer Pose in mehreren dxf-Dateien.
1.5	LAS	Leiterbahnen, Pads oder andere Strukturen müssen als geschlossene Polylinie ausgeführt werden.
1.6	LAS	Leiterbahnen automatisch mit einem Überlapp von 0,1mm trennen. Wenn die Leiterbahn an ein Pad angeschlossen wird, beträgt der Überlapp zwischen Pad und Leiterbahn 0,1mm. Sollte der Überlapp größer als die Struktur dahinter sein, ist der Überlapp entsprechend anzupassen. Ist der Überlapp dann kleiner als 0,05mm, ist kein Überlapp anzubringen.
1.7	LAS	Ist die zu strukturierende Fläche an der längsten Kante kleiner als 0,5mm und ist zudem keine weitere zu strukturierende Fläche in der Verlängerung nicht min. gleich groß wie die davorliegende, ist eine Struktur min. 5mm außerhalb der Kontur anzubringen.
1.8	LAS	Der Nullpunkt des Koordinatensystems sollte in der Mitte des Layouts liegen.
1.9	LAS	Durch Auswahl eines speziellen Exports sollte das Einfügen von Linien als Füllung der zu strukturierenden Fläche in Längs- oder Querrichtung möglich sein. Der Abstand der Linien zur Längsfläche sowie der Abstand zueinander muss einstellbar sein.
1.10	LAS	Jede ausgegebene dxf-Datei muss ein Rechteck in der 0-Ebene der Datei von 50mmx50mm aufweisen. Die 0-Ebene bezeichnet dabei die Ebene in 90° zum Laser.
1.11	LAS	Für jede Pose muss eine entsprechende Datei im "step"-Format als Vorrichtung für den 3D-Druck ausgegeben werden. Die Vorrichtung

		<i>muss auf eine Grundhalterung passen, die bis jetzt noch nicht definiert wurde.</i>
2.1	MM (Mikromontage)	<i>Erzeugung des Bestückungsplans (Center of Component) / Definition eines geeigneten Formates für Bestückungspläne in 3D</i>
2.2	MM	<i>Routing und Placement müsste bei MID in 3D stattfinden.</i>
2.3	MM	<i>Positionserkennung des Bauteils in 6 Achsen in der Prozessführung</i>
2.4	MM	<i>Infos über evtl. zu dispensende Lot- und Klebstoffdepots</i>
2.5	MM	<i>Automatische Generierung der Bestückstrategie inkl. Halterungen, Prozessablauf, Kollisionserkennung und Vorschaufunktion in 3D</i>
2.5.1	MM	<i>Generierung Prozessablauf</i>
2.5.2	MM	<i>Generierung Halterungen</i>
2.5.3	MM	<i>Simulation Prozessablauf mit Kollisionserkennung und Darstellung in 3D</i>
2.6	MM	<i>Kompatibilität mit unterschiedlichen Bestückungsanlagen</i>
3.1	SnA (Sensor und Aktor)	<i>Import von Schaltplänen, Schaltungslayout und Bauteil-Bibliotheken aus Eagle, Altium und KiCad.</i>
3.2	SnA	<i>Export von 3D-Modellen und damit Import in CAD-Programme wie Creo</i>
3.3	SnA	<i>Forward and Backward Annotation</i>
3.4	SnA	<i>PCB++, d.h. Kombination von Leiterplatten und 3D-Topologien wie Molds auf der PCB, auf denen in 3D geroutet werden kann, egal ob die Herstellung dann durch Drucken, LDS, Direktbelichtung + PVD oder sonstige Prozesse erfolgt.</i>
3.5	SnA	<i>MID++, d.h. Kombination von Leiterplatten und MID in einer elektrischen Baugruppe, um Signale, Anschlussraster etc. konsistent zu halten</i>
3.6	SnA	<i>Lokales Applizieren von Lötstopplack → Daten-Export</i>
3.7	SnA	<i>Routing von Bussen und differentiellen Leitungen in 3D mit entsprechenden Design Rules (z.B. LVDS)</i>
3.8	SnA	<i>HF-Leiterbahnen in 3D (Microstrips, Waveguides)</i>
3.9	SnA	<i>Bare Die-Montage + Bonddrahtdaten (Pad-Mitte zu Pad-Mitte) integrieren</i>
3.10	SnA	<i>Elektroden-Designs, d.h. Erzeugung beliebiger Flächen und Strukturen als Elektroden</i>
3.11	SnA	<i>Hatching für Laserstrukturierung und Drucken</i>
3.12	SnA	<i>Slicing von Layouts für Direktbelichtung in 3D + PVD → Gerber-Daten in unterschiedlichen Ebenen</i>
3.13	SnA	<i>Printed Electronics-Funktionalität auch in 2.5 und 3D</i>

3.14	SnA	<i>Bibliotheken-Import aus anderen Programmen wie Eagle</i>
4.1	DT (Drucktechnik)	<i>Formatumwandlung CAD (bsp. DXF) in Monochrom BMP (Inkjet)</i>
4.2	DT	<i>dxp Mäandrierung für Polylinien mit Aerosol-Jet</i>
4.3	DT	<i>Inkjet: Einstellen von Auflösungen für Leiterbahnen</i>
4.4	DT	<i>Inkjet und Aerosol Jet: Abgleich von Leiterbahnbreite und Breite gedruckter Struktur</i>

Durch die Erkenntnisse aus diesem Kapitel ist es nun möglich, eine Befragung von Experten zum Vorgehen bei der Entwicklung für den Bereich Individualisierung und MST durchzuführen. Das Ziel dabei ist, weitere Optimierungsansätze, Methoden und Maßnahmen zu identifizieren. Diese sollen dann später in die Methodik für iMST einfließen.

5.3 Befragung auf Basis der Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt

5.3.1 Interviewleitfaden

Im Zuge dieser Studie wurden mehrere Unternehmen, welche sowohl iMST als auch individualisierte Produkte anbieten oder herstellen, für ein Interview ausgewählt. Die weiteren Kriterien sind aus Tabelle 16 zu entnehmen. Die Auswahl beschränkte sich auf Unternehmen, die am Entwicklungsprozess beteiligt sind und bei denen Kunden mit Bedarf an individualisierten Produkten von Anfang an, einschließlich der Ideenphase sowie während der Produktionsphase, beteiligt sind. Dementsprechend wurden nur Unternehmen aus dem *Engineer-to-Order*-Bereich ausgewählt. Dieser Bereich ist in der Regel bei komplexen mechatronischen Produkten gegeben und erfordert ein domänenübergreifendes Zusammenarbeiten [217], [218].

Tabelle 16. Kriterien zur Auswahl von Unternehmen.

Kriterien	Beschreibung
Organisationsstruktur	Eigene F&E-Abteilung und Fertigung
Mitarbeiterzahl	Mindestens 3 Beschäftigte im Bereich F&E
Produktportfolio	Individualisierte Produkte / Mikrosysteme

Jedes Interview dauerte etwa 30 bis 45 Minuten und konzentrierte sich auf den PEP sowie mögliche Maßnahmen und Methoden, die ergriffen bzw. genutzt werden, um den Prozess effizienter zu gestalten. Sieben Unternehmen wurden über sechs Monate hinweg befragt (siehe Tabelle 17). Im Rahmen der Vorbereitung des Forschungsvorhabens „Fertigungsgerechte Entwicklung von individualisierten Mikrosystemen mittels 3D-Technologien – (FEM-3D)“ und durch das Netzwerk der Forschungsgruppen wurden die Experten identifiziert und kontaktiert. Dabei wurden 27 Unternehmen identifiziert und kontaktiert, sodass mit sieben Unternehmen das Interview durchgeführt wurde.²⁸

²⁸ Um den Rahmen dieses Kapitels nicht zu sprengen, wurde auf die Thematik der Stichprobengröße und Sättigung nicht eingegangen. Hierfür wird auf die Arbeit von Francis et al. [219] „What is an adequate sample size - Operationalising data saturation for theory-based interview studies“ verwiesen.

Tabelle 17. Übersicht über die ausgewählten Unternehmen der Befragten.

Unternehmen	Mitarbeiterzahl	Branche	Position der Mitarbeiter
Company A	25	Medizin	CTO
Company B	28	Sondermaschinenbau	CTO
Company C	> 500	Elektronik	Head of development
Company D	63.751	Medizin	Head of development
Company E	< 250	Maschinenbau	CEO
Company F	14.767	Maschinenbau	Head of development
Company G	9.800	Elektronik	Product manager

Die Fragen wurden auf der Grundlage der Literaturergebnisse und der Erkenntnisse des Pilotprojekts formuliert. Da es sich bei der Forschungsfrage um eine explorative Fragestellung handelt, ist es zielführend, dem Interviewer einen großen Spielraum zu geben, um Raum für weitere nützliche Hinweise zu gewinnen [149]. Es wurde entschieden, ein semi-strukturiertes Interview (SSI) durchzuführen, das die folgenden Bedingungen erfüllt: Aus Sicht des Forschers ist das SSI vorteilhaft, da der Forscher die Fragen selektiv behandeln und während des Interviews variieren kann [211]. Den Interviewleitfaden zeigt die Tabelle 18. Die Interviews waren wie folgt aufgebaut. Zunächst wurden demographische Daten erhoben, darunter die Position im Unternehmen und die Dienstjahre. Im zweiten Abschnitt wurde über den PEP gesprochen. Hier lag der Schwerpunkt darauf, wie genau der unternehmensspezifische PEP mit dem etablierten PEP wie dem V-Modell für mechatronische Systeme oder der VDI 2221 übereinstimmt und worin die Unterschiede bestehen. Anschließend wurde über die Herausforderungen während des PEP und die eingesetzten Methoden und Maßnahmen erläutert und diskutiert. Der letzte Abschnitt befasste sich mit den eingesetzten Technologien, möglichen Lösungsvorschlägen und Optimierungsansätzen.

Tabelle 18. Interviewleitfaden für das SSI.

Nummer	Fragen
1	Wie sieht bei Ihnen der PEP aus, wenn individualisierte Produkte angefragt und hergestellt werden sollen?
2	Was sind dabei die größten Herausforderungen?
3	Wie könnte diesen entgegengewirkt werden?
4	Welche Methoden verwenden Sie hierfür und welche sind besonders effektiv für Entwicklung und Herstellung von individualisierten Produkten bzw. Mikrosystemen?
5	Wie sichern Sie die Produkte ab → Qualitätsprüfung bzw. wie könnte die Produktabsicherung und Replizierbarkeit zukünftig ablaufen?
6	Mit welchen Technologien stellen Sie diese Produkte her?

Aufgrund der Coronavirus-Pandemie fanden alle Interviews, mit Ausnahme des Interviews mit Unternehmen C, über digitale Meeting-Plattformen wie WebEx und Teams statt. Die Anonymität musste dabei gewährleistet sein. Die Interviews wurden in deutscher Sprache geführt. Die Interviewberichte wurden direkt nach dem Gespräch auf Deutsch erstellt und handschriftlich bzw. digital dokumentiert, wie auch von Gläser und Laudel [220] empfohlen.²⁹ Alle Interviews wurden zur Kontrolle und Bestätigung über die Richtigkeit an die Befragten versendet.

5.3.2 Ergebnisse der Interviews

In diesem Kapitel sollen die Aussagen des Interviewten (Codiereinheit) und das jeweilige Unternehmen kurz beschrieben werden. Dabei werden auch die Entwicklungsprozesse aufgezeigt, die sich aus den Aussagen ableiten lassen. Anschließend, im Kapitel 5.3.3, werden diese Daten nach Gioia et al. [221] und Blessing & Chakrabarti [197] analysiert und strukturiert, sodass, unabhängig von den Prozessschritten, die einzelnen und eingesetzten Maßnahmen ersichtlich werden.

²⁹ Nach Gläser und Laudel wird empfohlen, die Datenerhebung nach dem Gespräch durchzuführen, um sich voll und ganz auf das Interview zu konzentrieren. Während des Gesprächs sollten lediglich kurze Signalwörter festgehalten werden.

Unternehmen A (UnA) stellt additiv gefertigte medizinische Werkzeuge und Produkte her. Es verspricht, Spitzentechnologien und neue Materialien zu entwickeln, um eine hervorragende und individuelle Patientenversorgung zu ermöglichen. Zu seinen Anwendungsgebieten gehören die Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, die Neurochirurgie und die Orthopädie. Ein Beispiel sind additiv gefertigte Schädelplatten. Auch in der Brachytherapie profitiert das Unternehmen von 3D-gedruckten Medizinprodukten, wie z. B. Schablonen für die Tumorchirurgie.

Der *First-Time-Right* (FTR)-Ansatz spielt hier eine wesentliche Rolle, denn die Kunden verlangen eine zuverlässige und schnelle Produktlieferung, wobei die Zuverlässigkeit an erster Stelle steht. Die Produktkosten haben eher eine untergeordnete Bedeutung. Um den FTR-Ansatz zu gewährleisten, hat das Unternehmen in seinem PEP ein wissensbasiertes System durch zuvor getestete Produkte etabliert (siehe Abbildung 82). Somit kennt das Unternehmen die Leistungsgrenzen der Anlagen und Materialien. Dieser Schritt hilft, Korrekturschleifen während des PEP zu vermeiden. Eine Ideenphase im klassischen Sinne, also Ideen für neue Produkte, gibt es in diesem Unternehmen nicht, da meistens durch den Kunden konkrete Anforderungen eingehen. Das Unternehmen nutzt die Ideenphase lediglich zur Sicherstellung der hohen Anforderungen. Anschließend folgen die Designprüfung und die Technologieauswahl. Innerhalb dieser Schritte prüft das Unternehmen die Anforderungen entsprechend medizinischer Richtlinien, wie die Verwendung für die Medizintechnik von zertifizierten Kunststoffen. Wie in Abbildung 82 dargestellt, finden in dieser Phase Ansätze zur Betriebs- und Prozessqualifizierung statt. Die Prozessqualifizierung wird während der Fertigung durchgeführt. Im Rahmen der Betriebsqualifizierung (Operation Qualification) können bis zu 250 Zugstäbe getestet werden, während bei der Prozessqualifizierung bis zu 8 hochsensible Sensoren den Prozess überwachen können.

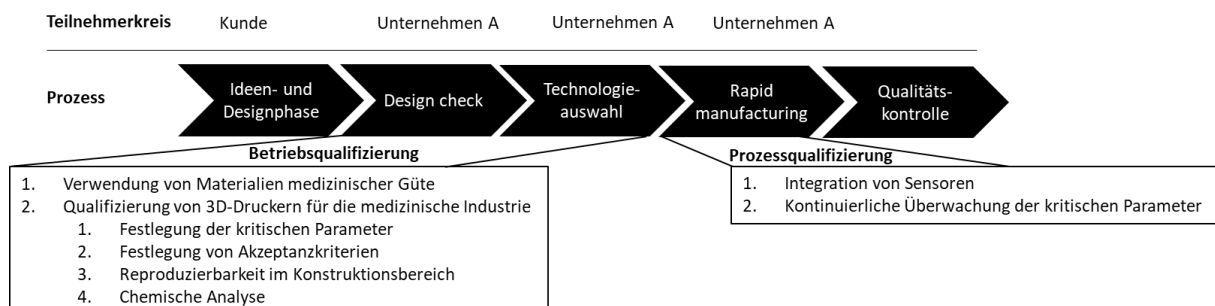


Abbildung 82: PEP von UnA.

Unternehmen B (UnB) ist ein globales Unternehmen, dessen Dienstleistungen von technischer Beratung bis zur Übergabe von Betriebsabläufen reichen. Es setzt Ideen in Entwürfe um und erstellt fertigungsreife Zeichnungen. Die elektrische Planung ist ebenfalls Teil der angebotenen Dienstleistungen. Das Unternehmen stellt alle Arten von Spezialmaschinen sowie individuelle Geräte, Werkzeuge und Ausrüstungen her.

Die Maschinen enthalten individualisierte Komponenten, die mehrere Tests durchlaufen. Diese individualisierten Komponenten werden immer mit dem gleichen 3D-Druckverfahren hergestellt. Das Unternehmen verfügt somit über ein großes Wissen über den Prozess, jedoch gibt es für bestimmte Anwendungen möglicherweise geeignetere Fertigungsverfahren, die jedoch selten beauftragt werden. Die Kosten für die gedruckten Komponenten sind im Vergleich zu den Kosten des Gesamtprodukts (Spezialmaschine) relativ gering. Ein Ausfall dieser Komponenten könnte jedoch eine erheblich negative Auswirkung haben. Daher behandelt UnB individualisierte Komponenten identisch wie standardisierte Produkte, indem diese getestet und verifiziert werden (siehe Abbildung 83). Die Kunden dieses Unternehmens wünschen Präzision, und daher wird der Preis nicht als primärer Faktor betrachtet.



Abbildung 83: PEP von UnB.

Unternehmen C (UnC) ist ein Technologieunternehmen mit einer starken Forschungs- und Entwicklungsabteilung. Es produziert kundenspezifische Produkte, die von Spezialisten aus den Bereichen Feinmechanik, Elektronik und HF-Technik entwickelt werden. Aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung konzentriert sich UnC auf neue innovative Steckverbinder. Obwohl das Unternehmen auch kundenspezifische Steckverbinder entwickelt und herstellt, hat es grundsätzlich immer die Intention, in den Massenmarkt einzusteigen.

Das Unternehmen nutzt des Öfteren den MVP-Ansatz, um Verbesserungspotenziale durch direktes Kundenfeedback frühzeitig zu erhalten (siehe Abbildung 84). UnC setzt insbesondere individualisierte Produkte für den oben genannten Zweck ein. Dabei verzichtet UnC auf aufwendige Zuverlässigkeitstests, wobei die Verantwortung dann beim Kunden bleibt. Je nach Anwendung und vom Kunden erwarteten Reifegrad des Produkts müssen die Prozessschritte für die individualisierten Lösungen identisch zu den standardisierten Produkten ablaufen,

wodurch hohe Kosten entstehen. So können diese Kosten auch auf den Kunden weitergegeben werden. Beim MVP-Ansatz, bei dem die Preise niedrig bleiben müssen, werden die Mehrkosten nicht an den Kunden weitergegeben, da dafür eine genaue Produktbewertung als Gegenleistung erhalten wird.



Abbildung 84: PEP von UnC.

Unternehmen D (UnD) ist einer der weltweit führenden Hersteller von medizintechnischen und pharmazeutischen Produkten sowie Dienstleistungen. Insgesamt setzt sich die Produktpalette aus 5.000 Produkten zusammen, von denen 95 Prozent im eigenen Haus hergestellt werden. Die Produktpalette umfasst chirurgische Instrumente für offene oder minimal-invasive Behandlungen, Implantate (z. B. für die Orthopädie, Neurochirurgie und Wirbelsäulenchirurgie), chirurgisches Nahtmaterial, Sterilcontainer und Produkte für die Kardiologie.

Das Unternehmen setzt bei der Entwicklung und Herstellung von individualisierten Produkten fortschrittliche Technologien mit mehreren Simulationsmodellen und In-Prozess-Überwachungen ein. Dadurch kann UnD sofort erkennen, ob Unregelmäßigkeiten oder sonstige Auffälligkeiten während der Fertigung auftreten. Darüber hinaus nutzt das Unternehmen seinen reichen Erfahrungsschatz, um hochwertige und sensible Produkte schnell und zuverlässig herzustellen. Kritische und neue Anwendungen werden im Vorfeld getestet, und bei Bedarf werden mehrere Muster angefertigt (risikobasierte Validierung). Auf diese Weise baut das Unternehmen seine Wissensbasis ständig aus. Dies führt natürlich dazu, dass die Herstellungskosten steigen. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist, dass die Entwurfsprüfung in mehreren Iterationen gemeinsam mit Experten bewertet wird (siehe Abbildung 85). Die Qualität der Bauteile entsprach daher oft den Vorhersagen.

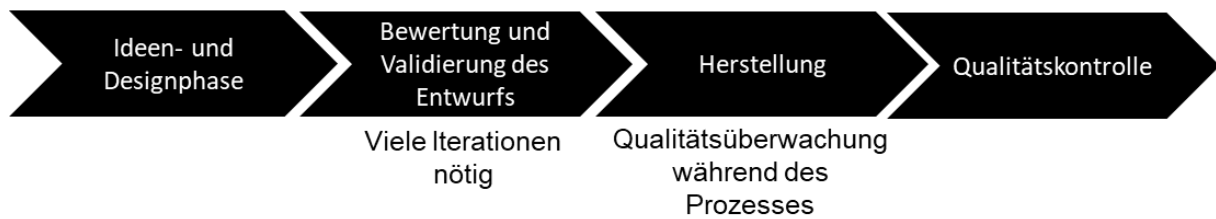


Abbildung 85: PEP von UnD.

Unternehmen E (UnE) bietet High-End-3D-Drucker, Materialien, Softwarelösungen und Peripheriegeräte an. Darüber hinaus ist das Unternehmen auch darauf spezialisiert, andere Unternehmen in ihrem Entwicklungs- und Herstellungsprozess zu unterstützen, die kundenspezifische Musterteile aus dem 3D-Drucker benötigen. Das Besondere an dem Unternehmen ist, dass es eine breite Palette von Anwendungsfällen bedient.

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung von individualisierten Produkten besteht darin, dass die Experten anhand bestimmter Designregeln über die Machbarkeit des Produkts entscheiden (siehe Abbildung 86). Auf der Grundlage ihrer Erfahrungen können die Experten entscheiden, welche 3D-Druckverfahren eingesetzt werden können und ob das Produkt problemlos hergestellt werden kann oder ob es kritische Punkte gibt, die zuvor berücksichtigt werden müssen. Bewerten die Experten das Produkt als kritisch, wird dies dem Kunden mitgeteilt, der dann über mögliche Folgekosten informiert wird. Es gab auch Entwicklungsprojekte, die kleine Änderungen am Produkt erforderten und diese für den Kunden keine Rolle spielten, aber eine große und positive Auswirkung auf die Machbarkeit hatten. Daher werden dem Kunden oft Änderungswünsche vorgeschlagen, vor allem in Bezug auf die Geometrie, obwohl dies bei der Produktion von individualisierten Produkten unüblich ist. Im Hinblick auf die notwendige Validierung von sehr sensiblen Produkten, wie z.B. Produkten für den medizinischen Bereich, stellt UnE häufig Testteile her. Diese Testteile werden auch für verschiedene Zuverlässigkeitstests wie Zugversuche oder Dichteproofungen verwendet. Dieser Ansatz führt natürlich zu höheren Kosten und Produktionszeiten.

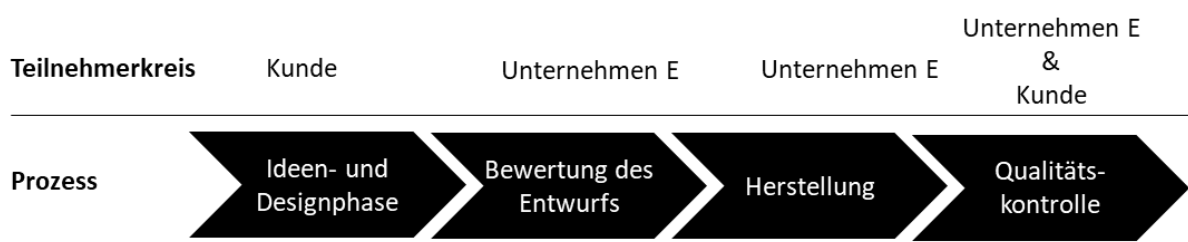


Abbildung 86: PEP von UnE.

Unternehmen F (UnF) ist einer der weltweit größten Anbieter von Werkzeugmaschinen. Das Unternehmen ergänzte sein Portfolio durch die Integration neuer Methoden der Blechbearbeitung wie Biegen und Rohrbearbeitung. Das Unternehmen stellt auch 3D-Druckanlagen für die Medizintechnik her und muss sich daher auch mit Entwicklungs- und Qualitätsprozessen befassen.

Für die Herstellung von medizintechnischen Produkten sind kontrollierte und genau überwachte additive Prozesse eine Grundvoraussetzung (siehe Abbildung 87). Für individualisierte Produkte führt das Unternehmen zunächst eine Qualitätsprüfung der Rohstoffe, z. B. des Pulvers für das selektive Lasersintern, durch. Im Gegensatz zum klassischen PEP, bei dem die Produktion erst nach Designentwicklung und *Design-Freeze* beginnt, beginnt der Produktionsprozess bei individualisierten Produkten mit der Fertigstellung der Designentwicklung. Das Design kommt oft direkt vom Kunden, da die individuellen Anforderungen beim Kunden sind. Die nächsten Schritte in diesem Prozess bestehen aus Nacharbeit und Qualitätskontrolle (siehe Abbildung 87). Das Unternehmen bietet eine Technologie an, die eine genaue Überwachung während der Fertigung ermöglicht. Werden während der Fertigung Anomalien festgestellt, so wird der Prozess gestoppt. Davor wurden Korrelationen zwischen den Daten der Überwachung und den Ergebnissen der Qualitätsprüfung trainiert und ermittelt. Die Korrelationsdaten waren jedoch nicht valide genug, um sich vollständig darauf verlassen zu können.

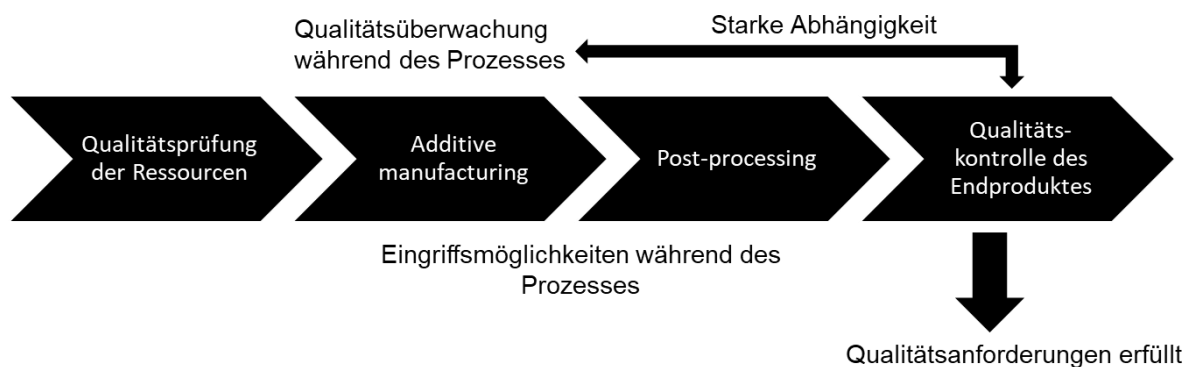


Abbildung 87: PEP von UnF.

Eine Aussage diesbezüglich war: „In Zukunft wird die Frage nicht lauten, ob die Überwachung integriert wird, sondern was die Ergebnisse der Überwachung sind.“

Unternehmen G (UnG) ist eines der bekanntesten Unternehmen für die Entwicklung und Herstellung von Dehnmessstreifen. Es bietet ein komplettes Portfolio an Technologien, die den gesamten Lebenszyklus von Tests und Messungen in allen Bereichen abdecken. Während die Entwicklung und Fertigung von Sensor-Systemen und Messgeräten in Großserien im Mittelpunkt des Angebots stehen, bietet das Unternehmen auch kundenspezifische Sensorlösungen (meistens Losgröße 3 - 10) an. Bei kundenspezifischen Lösungen, arbeitet das Unternehmen in jeder Phase des Produktentwicklungs- und Optimierungsprozesses mit dem Kunden zusammen.

Bei individualisierten Sensoren geht UnG so vor, dass es dem Kunden sogenannte „Serien“ im Produkt anbietet und innerhalb dieser Serien einen zuvor validierten Spielraum für den Kunden mit seinen individuellen Anforderungen anbietet (siehe Abbildung 88). Diese Serien bilden die Konstruktionsgrenzen. Auf diese Weise werden Tests, die bei individualisierten Produkten kaum möglich sind, vermieden, da innerhalb der Grenzen Erfahrungswerte vorhanden sind. Die erfolgversprechendste Maßnahme innerhalb der Entwicklung von individualisierten Produkten ist die systematische Sammlung und Verwendung von Erfahrungswissen. Diese spielt für das Unternehmen eine zentrale Rolle. Bei Produkten mit einem sehr hohen Individualisierungsgrad, wie z.B. über die definierten Serien hinaus, wägt UnG sorgfältig ab, ob sich der Aufwand lohnt. Eine andere Maßnahme bzw. Methode ist, die volle Verantwortung auf den Kunden zu übertragen. In beiden Fällen sind die Kosten, verglichen mit standardisierten Sensoren, dennoch hoch. Der Kunde ist aber meistens bereit einen hohen Preis zu bezahlen, da für den Kunden hier mehr die Funktionalität im Vordergrund steht als der Preis.



Abbildung 88: PEP von UnG.

Nachdem nun Aussagen von diversen Unternehmen gesammelt werden konnten, wie oben gezeigt, können diese nun systematisch analysiert und strukturiert werden. Hierfür bietet die *Grounded Theory* (GT) mögliche Ansätze. Die GT ermöglicht insbesondere für qualitative Daten, wie eben die durchgeführten Experteninterviews, eine systematische Sammlung und

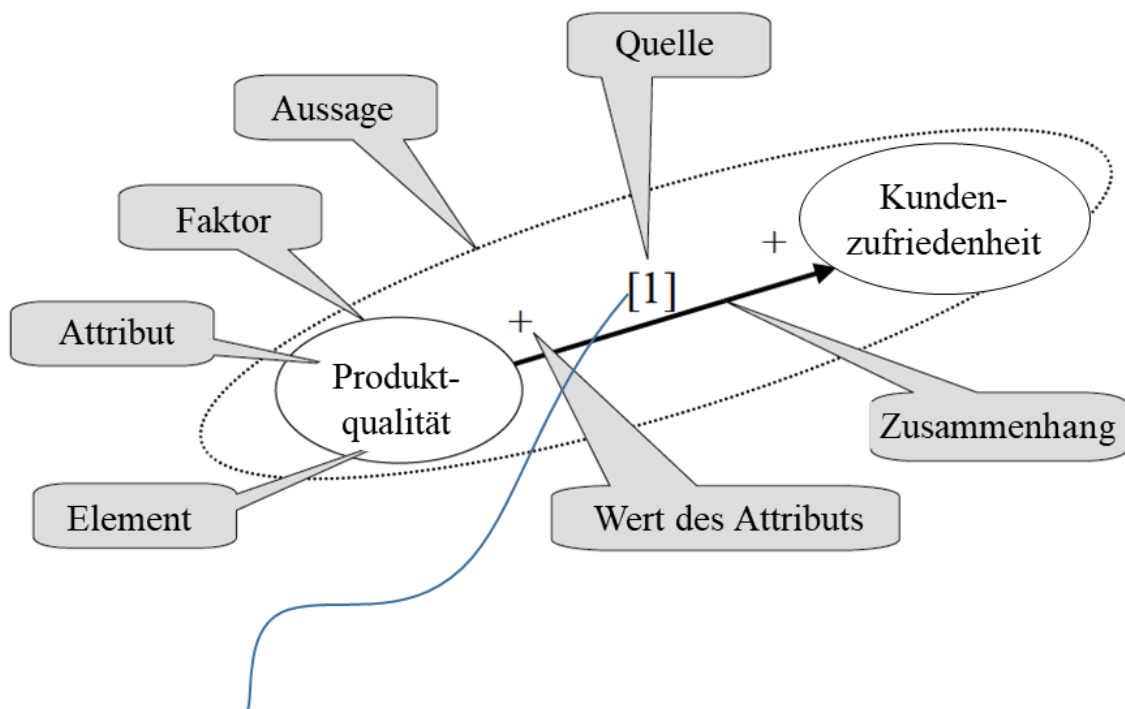
Auswertung von qualitativen Daten und verfolgt das Ziel, neue Theorien zu generieren [222]. Dadurch wird ein Überblick über die generierten Erkenntnisse geschaffen. Darüber hinaus wird ersichtlich, welche Maßnahmen zur Entwicklung von individualisierten Produkten bereits in der Literatur vorhanden ist und wo neue Ansätze generiert wurden.

5.3.3 Analyse und Strukturierung der Ergebnisse

Innerhalb der GT ist das Vorgehen nach Gioia et al. [221] vor allem für induktive, qualitativ-hermeneutische Forschung geeignet. Da hier Experteninterviews durchgeführt wurden, wird genau dieser Forschungsansatz adressiert. In Anlehnung an Gioia et al. kann das Vorgehen schrittweise wie folgt beschrieben werden:

1. **1st-Order Analysis:** Daten pro Interview werden zusammengefasst und codiert.
2. **2nd-Order Analysis:** Muster-Identifizierung und abstrakte Kategorienbildung auf Basis von Schritt 1
3. **Aggregierte Dimensionen:** Entstehung von neuen theoretischen Dimensionen
4. **Datenstruktur:** Strukturierung der Daten aus den Schritten 1 – 3 (siehe Abbildung 90)
5. **Modellentwicklung:** Vernetzung der theoretischen Bausteine (siehe Abbildung 91)

Gioia et al. betonen dabei, dass Abweichungen und Anpassungen vom Vorgehen möglich und erwünscht sind. Insbesondere für den 5. Schritt gibt es aus der Forschung der Produktentwicklung ein weit verbreitetes und passendes Framework, nämlich das *Reference Model* (RefMod) nach Blessing und Chakrabarti [197]. Das RefMod ermöglicht eine Veranschaulichung von abhängigen Argumentationen und Gedanken sowie der dazugehörigen Quellen (siehe Abbildung 89). Da diese Arbeit eine große Schnittmenge zur Produktentwicklung hat, eignet sich die Strukturierung des 5. Schritts nach dem RefMod.



Jeder Zusammenhang ist mit der/den Quelle(n) der Aussage(n), die er durchführt, unter Verwendung der folgenden Abkürzungen gekennzeichnet:

- [X]: die Aussage wurde unter der Referenznummer X veröffentlicht;
- [A]: die Aussage ist eine Annahme;
- [E]: die Aussage basiert auf die Erfahrungen des Befragten;
- [O]: die Aussage beruht auf eigenen Untersuchungen;
- [?]: es ist nicht bekannt, ob eine Verbindung besteht.

Abbildung 89: Graphische Darstellung und Terminologie des Reference Model in der Entwicklungsmethodik nach [196].

Die folgende Abbildung 90 zeigt die Strukturierung und Kategorisierung von Maßnahmen für die Entwicklung von individualisierten Produkten entsprechend der Schritte 1 – 4 nach Gioia et al [220]. Aus der letzten Spalte, *overarching dimensions*, können nun kategorisierte Maßnahmen aus den durchgeführten Interviews auf einen Blick abgelesen werden. Damit wird deutlich, dass ein wissenschaftlicher Ansatz die häufigste Maßnahme für eine zuverlässige Entwicklung von individualisierten Produkten ist.³⁰ Anschließend folgen die hohe Kundenintegration und Technologieüberwachung. Die letzte Maßnahme ist die Nachbearbeitung, die implizit nur einmal erwähnt wurde.

³⁰ Die Häufigkeiten können anhand der an die *overarching dimensions* gerichteten Pfeile erkannt werden.

Methodik zur Erstellung einer integrierten Produktentwicklung für die MST

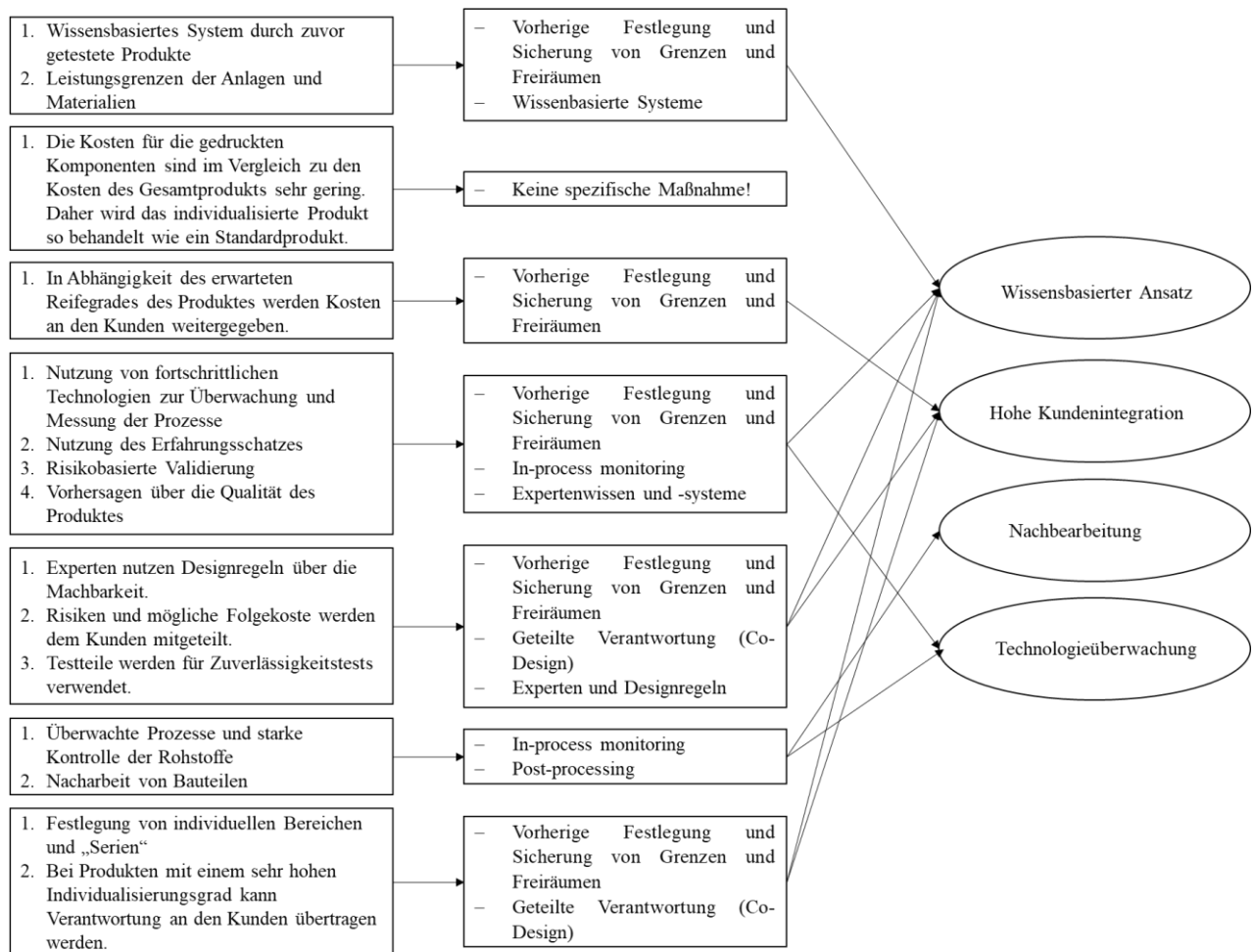


Abbildung 90: Kategorisierung der Maßnahmen zur Entwicklung von individualisierten Produkten nach [220].

Wie bereits erwähnt, ist eine Modellentwicklung für die Vernetzung der theoretischen Bausteine, also der Maßnahmen, wichtig, um die gegenseitigen Zusammenhänge und Kausalitäten zu prüfen und darzulegen. Abbildung 91 zeigt das RefMod für die jeweiligen Unternehmen und vernetzt diese Maßnahmen bzw. Methoden unternehmensübergreifend.

5.4 Entwicklung und Testen ausgewählter Methoden für iMST

5.4.1 Entwicklung eines wissensbasierten Systems

Wie aus den Ergebnissen aus den Kapiteln 5.1 und 5.3 entnommen werden kann, gehört ein wissensbasierter Ansatz für eine effiziente Entwicklung und Herstellung von iMST zu den wichtigsten Methoden und Maßnahmen. Ein universell anerkanntes Framework bzw. Werkzeug, wie bspw. CAD oder CAM, zur Unterstützung wissensbasierter Entwicklung ist soweit nicht bekannt. Wissensbasierte Systeme bzw. auch Expertensysteme, die sich unter anderem auf technische Aufgaben und Fragestellungen beziehen, nennt man auch *Knowledge-Engineering* (KE) [223], [224]. In dieser Arbeit soll eine KE-Tool aufgebaut werden, welches das primäre Ziel hat, bei der optimalen Auswahl von Fertigungsverfahren und Materialien zu unterstützen. Folglich trägt es die Bezeichnung „*Knowledge-Engineering Tool for Technology Selection*“ (KETTS).

Zu den Haupteigenschaften von iMST gehören die Technologie- und Materialabhängigkeit [21], [70], [75], [80]. Diese lassen sich optimal anhand der gestellten Anforderungen ableiten. Jedoch kann es x beliebige Anforderungen geben, die y beliebigen Fertigungsverfahren und Materialien gegenüberstehen. Aufgrund der Individualisierung steigt die Anzahl der möglichen Anforderungen und Fertigungsverfahren. KETTS hat somit den Anspruch, eine maximale Flexibilität zu bieten, sodass quasi alle Anforderungen eingegeben werden können und daraus die Fertigungsverfahren bzw. Materialien ausgegeben werden. Das grundlegende Prinzip der KETTS-Lösung zeigt die Abbildung 92.

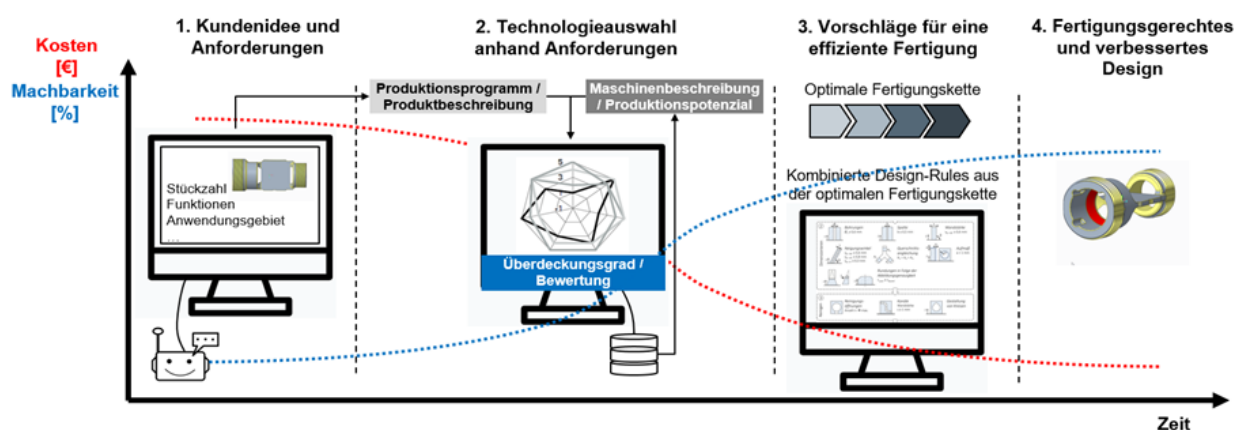


Abbildung 92: Abstrakte Darstellung des Lösungsprinzips von KETTS.

Anhand dieses KETTS ist es auch möglich, Informationen und Wissen, das im Laufe der Jahre durch erfahrene Mitarbeiter aufgebaut wurde, in einer Datenbank zu speichern und den Zugang

für neue Mitarbeiter zu ermöglichen. Somit ist gewährleistet, dass die Daten strukturiert gesammelt werden und eine Auswertung möglich ist, die dem Unternehmen oder dem einzelnen Mitarbeiter die Entscheidung überwiegend oder gänzlich abnimmt. Außerdem lassen sich firmeninterne Prozesse mit Hilfe dieses Tools vereinheitlichen, was eine Grundvoraussetzung für diverse Zertifizierungen ist.

Vorteile, die sich zusätzlich daraus ergeben, sind:

- Begünstigung expliziter Entscheidungsprozesse anhand definierter, nachvollziehbarer Kriterien
- Funktion als Checkliste, um zu verhindern, dass wichtige Gestaltungsregeln vergessen werden
- Dokumentation und Nachvollziehbarkeit für Neueinsteiger
- Formalisierung des Vorgehens und Externalisierung von Erfahrungen

Um diese Flexibilität und Vorteile softwareseitig realisieren zu können, müssen Regeln definiert werden, welche alle Anforderungen abdecken können. Dies hat den Hintergrund, dass die Anwendung auch für andere Anwendungsfälle verwendet werden soll. Es konnten folgende Regeln/Operatoren identifiziert werden, die für eine Sammlung von Anforderungen möglich sind:

1. Minimum wird erfordert, das heißt, das System muss alle Zahlen berücksichtigen, die $\geq$ sind, bspw. Temperaturbeständigkeit.
2. Maximum wird erfordert, das heißt, das System muss alle Zahlen berücksichtigen, die $\leq$ sind, bspw. Kosten.
3. Keines der erwähnten Wörter darf vorkommen: ($\forall w \in \text{Wörter}, w \notin \text{text}$), bspw. Nicht-Beständigkeit.
4. Die erwähnten Wörter müssen vorkommen: ($\forall w \in \text{Wörter}, w \in \text{text}$), bspw. IP-Schutzklassen.
5. Ja / Nein-Anforderungen (Boolean: „wahr oder falsch - $A \vee B$ “)
6. Expliziter Wert (=) mit Toleranz, bspw. Größe des Bauteils

Diese Regeln müssen derart programmiert werden, dass sie den jeweiligen Anforderungen zugeordnet werden können.

Ein Beispiel für die graphische Benutzeroberfläche (GUI) zeigt die Abbildung 93.

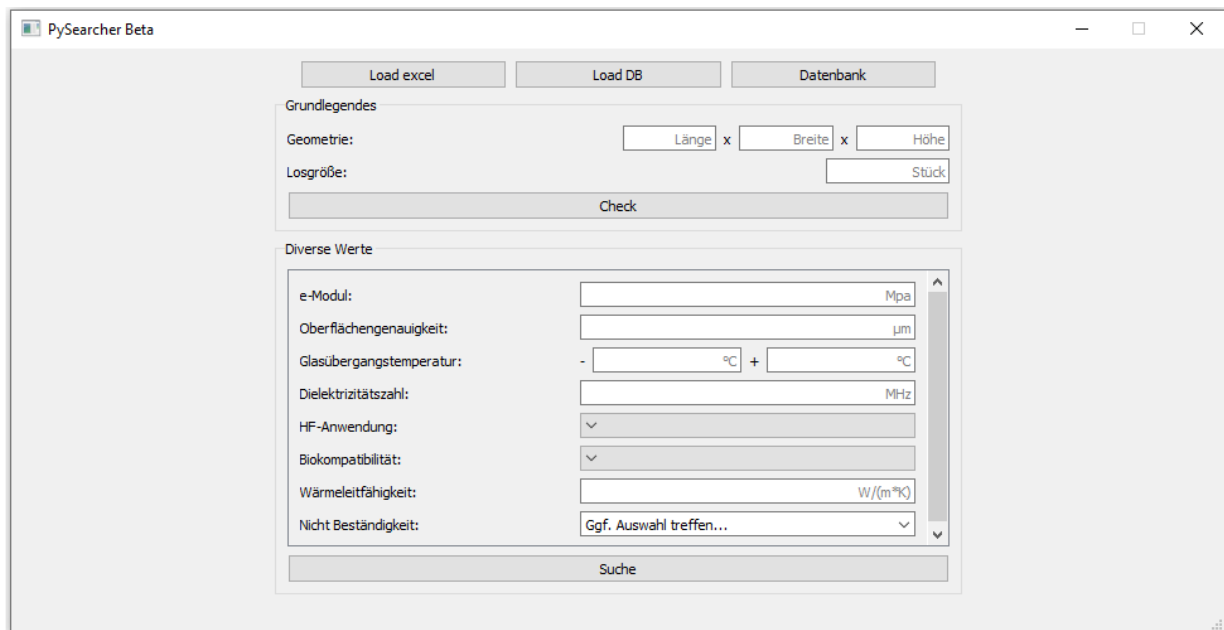


Abbildung 93: GUI von KETTS.

Die dargestellte GUI kann sich je nach Anwendung ändern, wodurch von einer dynamischen GUI gesprochen werden kann. Das heißt, statt „Losgröße“ könnte an der gleichen Stelle auch etwas Anderes abgefragt werden. Das Tool entnimmt diese Anforderungen direkt aus der Datenbank. Daher wird, bevor das Tool gestartet wird, eine Anfrage an den Benutzer gestellt, welche Datenbank er nutzen möchte. Die Datenbanken, und somit auch das Anwendungsgebiet, könnten bspw. heißen: Materialauswahl, Fertigungsverfahren bzw. Prozessketten oder Bestückungsstrategie. Dabei wird erwartet, dass die Datenbank vom Anwender befüllt wird oder als eine Excel-Datei importiert wird.

Der genaue Quellcode ist im Anhang A zu finden.

5.4.2 Testen des Co-Design-Ansatzes mit MCAD und ECAD

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, gibt es kein vollumfängliches Design-Tool, welches MCAD und ECAD derart verbindet, dass auch ein elektrisches Layout direkt in der 3D-Umgebung bearbeitet werden kann. Darüber hinaus sollen die Dateiformate mit digitalen Prozessketten wie der additiven Fertigung und diversen anderen Drucktechnologien kompatibel sein (siehe auch Tabelle 15, Anforderungen MCAD&ECAD). Hierfür konnte eine Lösung von der Firma Altium identifiziert werden, die jedoch noch nicht auf dem Markt zur Verfügung steht. Diese 3D-M/ECAD Lösung wurde im Rahmen dieser Arbeit gemeinsam mit Altium experimentell optimiert und weiterentwickelt. Das Ergebnis wird in diesem Kapitel gezeigt.

Die Implementierung dieser neuen Softwarelösung von Altium hat zu einer Reihe von Vorteilen geführt, insbesondere in Bezug auf Schaltplanerstellung, Routing und Integration mit 3D-Komponenten sowie Aufbereitung für die Laserstrukturierung. Die konkreten Vorteile können aus den folgenden fünf Prozessschritten abgeleitet werden:

1. Schaltplanerstellung und Routing in Altium direkt auf 3D-Bauteile:

Die neue Software von Altium ermöglicht es, Schaltpläne und das Routing direkt auf einem 3D-Bauteil zu erstellen. Dadurch können Designer die räumlichen Anforderungen und Platzierungskonflikte besser visualisieren und effizienter lösen. Durch die Integration des Schaltplans und 3D-Bauteils in einem Arbeitsbereich können Entwickler ihre Entwürfe optimieren und Fehler vermeiden, die durch manuelle Umsetzung entstehen könnten.

2. STEP-Datei-Ausgabe in AutoCAD:

Nach Abschluss der Schaltplanerstellung und des Routing-Prozesses in Altium können die 3D-Daten als STEP-Datei exportiert werden. Diese Dateien enthalten detaillierte Informationen über die 3D-Geometrie der Bauteile und Leiterplatten. Die ausgegebenen STEP-Dateien können dann in AutoCAD, einem weit verbreiteten CAD-Programm, importiert werden, um weitere Anpassungen und Analysen durchzuführen.

3. Geringere Anpassungen mit AutoCAD notwendig:

Im AutoCAD-Programm können kleinere Anpassungen und Optimierungen vorgenommen werden, um die endgültige Leiterplatte zu perfektionieren. Dies kann die Anpassung von Bauteilplatzierungen, das Hinzufügen oder Entfernen von Verbindungen oder das Ändern von Leiterbahnen beinhalten. Diese Schritte stellen sicher, dass das endgültige Design alle erforderlichen Spezifikationen und Anforderungen erfüllt.

4. Nur die Verbindungen von einer Fläche zur nächsten müssen aufbereitet werden:

In dieser Phase des Prozesses konzentrieren sich die Designer auf die Aufbereitung der Verbindungen zwischen den verschiedenen Ebenen oder Flächen des Substrats. Dies ist entscheidend, um sicherzustellen, dass die elektrischen Verbindungen korrekt hergestellt werden und dass die Signalintegrität während des Betriebs gewährleistet ist.

5. Export in die Lasersteuerungssoftware:

5.4.3 Validierung KETTS

Für eine erste Validierung wird eine Datenbank (siehe Anhang B) für 4 Prozessketten erstellt. Daraus entsteht die GUI, welche einem MID-Experten zur Verfügung gestellt wird (siehe Abbildung 95). Anschließend erhält der Anwender schrittweise 2 – 7 Anforderungen gestellt. Diese Anforderungen gelten als Input-Größe und als Output müsste die „optimale“ Prozesskette vorgeschlagen werden. Die folgende Abbildung 95 zeigt das Ergebnis (siehe Abbildung 95 - D) im Fall von 6 Anforderungen (siehe Abbildung 95 - B&C). Dabei wurde eine Prozesskette empfohlen, die für den MID-Experten nur in der Anwendung für Prototypen bekannt ist. Darüber hinaus hatte der Anwender kaum Berührungspunkte mit Produkten, die biokompatibel sein müssen.

The screenshot shows a software window titled 'PySearcher'. It contains several sections labeled with red letters A, B, C, and D. Section A is a button labeled 'Datenbank bearbeiten'. Section B is titled 'First Check' and contains four input fields: 'Länge' (145), 'Breite' (78), 'Höhe' (112), and 'Losgröße' (20). Section C is titled 'Diverse Werte' and contains two input fields: 'Temperatur' (167) and 'Biokompatibel' (Ja). Section D is titled 'Result' and contains a table with the following data:

	Prozess	Bild	Material	Preis	Länge (mm) [FirstCheck]	Breite (mm) [FirstCheck]	Höhe (mm) [FirstCheck]	Temp
1	FDM-Direct	none	ABS, PET, PC,	6.0	250.0	100.0	150.0	180.0

Abbildung 95: Eingaben und Ergebnisse des KETTS-V0.1. **A**=Datenbank kann direkt über die GUI bearbeitet und angepasst werden, **B**=Erste Abfrage der Anforderungen, zur Prüfung ob die Machbarkeit grundsätzlich möglich ist, **C**=weitere Anforderungen, **D**=vorgeschlagene Prozesskette.

Für eine zweite Validierung des KETTS wurde eine Datenbank erstellt, die die Eigenschaften von diversen Materialien beinhaltet (siehe Anhang C). Anschließend wird KETTS einem Werkstoffexperten eines Unternehmens zur Verfügung gestellt. KETTS passt sich nun der Datenbank an und zeigt die folgende GUI (siehe Abbildung 96).

The screenshot shows a window titled 'PySearcher' with standard window controls (minimize, maximize, close). Inside the window, there is a button labeled 'Datenbank bearbeiten'. Below this, the text 'Diverse Werte' is displayed. A list of material properties is shown on the left, each with a corresponding input field on the right:

Eigenschaft	Wert
Einsatztemperatur	C
Dichte	g/cm ³
Biegefestigkeit	MPa
Farbe	[Dropdown menu]
Wasseraufnahme	%
Biokompatibilität	[Dropdown menu]
Nicht-Beständigkeit	[Dropdown menu]
Einsatzdauer	Zeit

At the bottom of the form is a large button labeled 'Suche'.

Abbildung 96: KETTS-V0.2 zur Identifikation eines geeigneten Materials anhand von spezifischen Anforderungen.

Beim Werkstoffexperten wurden schrittweise von 2-8 Anforderungen abgefragt, sodass ersichtlich wurde, ab welcher Anzahl an Anforderungen der Werkstoffexperte keine klare Entscheidung mehr treffen kann und das Tool die Entscheidungsfindung unterstützt.

Der Nutzen von KETTS konnte insofern validiert werden, als die Empfehlung der Experten im Vergleich zu KETTS umso ungünstiger ausfiel, je mehr Anforderungen zu berücksichtigen waren. Tabelle 19 zeigt die Einzeldaten, die im Rahmen der Validierung generiert werden konnten. Für die Ermittlung der Erfolgswahrscheinlichkeit wurden folgenden Parameter definiert:

- Erfolgswahrscheinlichkeit 0,25 → KETTS empfahl eine Output-Größe, die geeigneter ist, als die des Experten. Ob die Empfehlung von KETTS tatsächlich besser ist als die des Experten, muss geprüft werden.
- Erfolgswahrscheinlichkeit 0,5 → KETTS empfahl mehr als eine Output-Größe, die geeigneter ist, als die des Experten. Ob die Empfehlung von KETTS tatsächlich besser ist als die des Experten, muss geprüft werden.
- Erfolgswahrscheinlichkeit 1 → Die Empfehlung von KETTS ist ohne nachträgliche Prüfung des Experten geeigneter als die Empfehlung vom Experten.

Tabelle 19. Einzeldaten der Validierung von KETTS.

Werkstoffexperte							Bestimmtheitsmaß (R^2)
Erfolgswahrscheinlichkeit	50%	0	25%	100%	100%	100%	0.4534217
Anzahl an Anforderungen	2	3	4	5	6	7	
MID-Experte							Bestimmtheitsmaß (R^2)
Erfolgswahrscheinlichkeit	0%	25%	25%	25%	100%	100%	0.8403841
Anzahl an Anforderungen	2	3	4	5	6	7	

Die Erfolgswahrscheinlichkeit als Funktion der Anforderungen zeigt einen Verlauf, der einer Sigmoidfunktion ähnelt, weshalb diese Funktion zur Erstellung einer Regressionskurve verwendet worden ist. (siehe Abbildung 97).

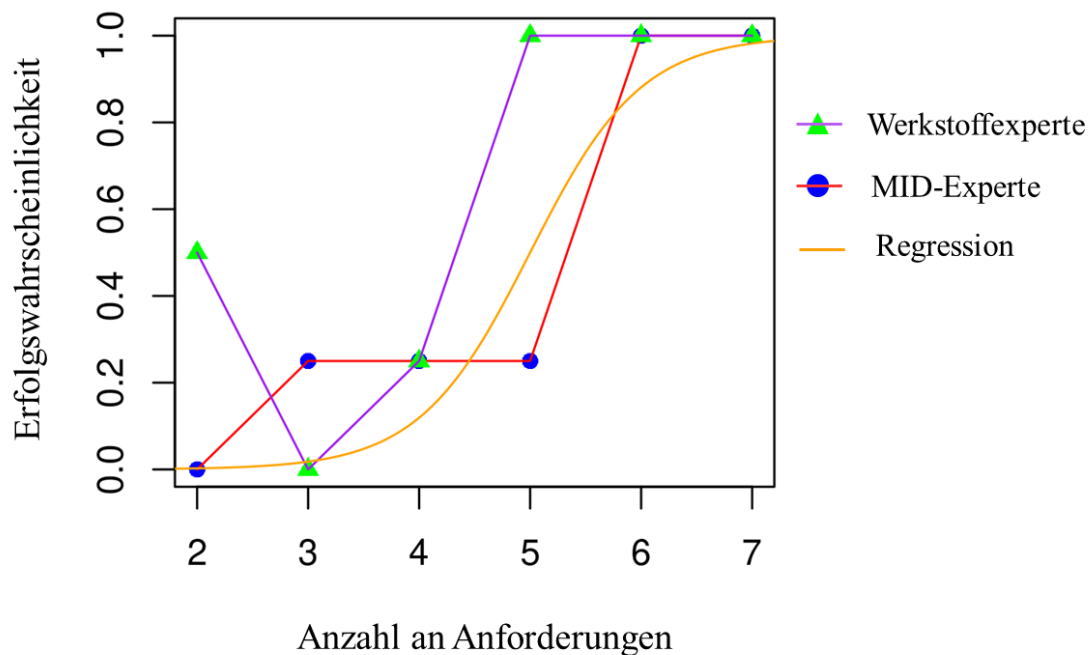


Abbildung 97: Validierung und Erfolgswahrscheinlichkeit von KETTS in Abhängigkeit der Anzahl an Anforderungen.

Ein weiteres Beispiel für die Validierung von unterschiedlichen Anwendungsgebieten ist die Auswahl einer optimalen AVT. Je nach Anforderungen müssen die Komponenten mittels Löten, Kleben oder Platzieren mit dem Substrat verbunden werden. Es wurden sieben Inputgrößen vorgeschlagen, die entsprechend zu befüllen sind. Anschließend gab die KETTS-Software ein Verfahren an, welches alle Anforderungen erfüllt. Das lässt sich daran erkennen, dass die erste Zeile im Output-Bereich (Verbindungsverfahren) keine rote Zelle in den Spalten der ersten Zeile enthält (siehe Abbildung 98 (c)).

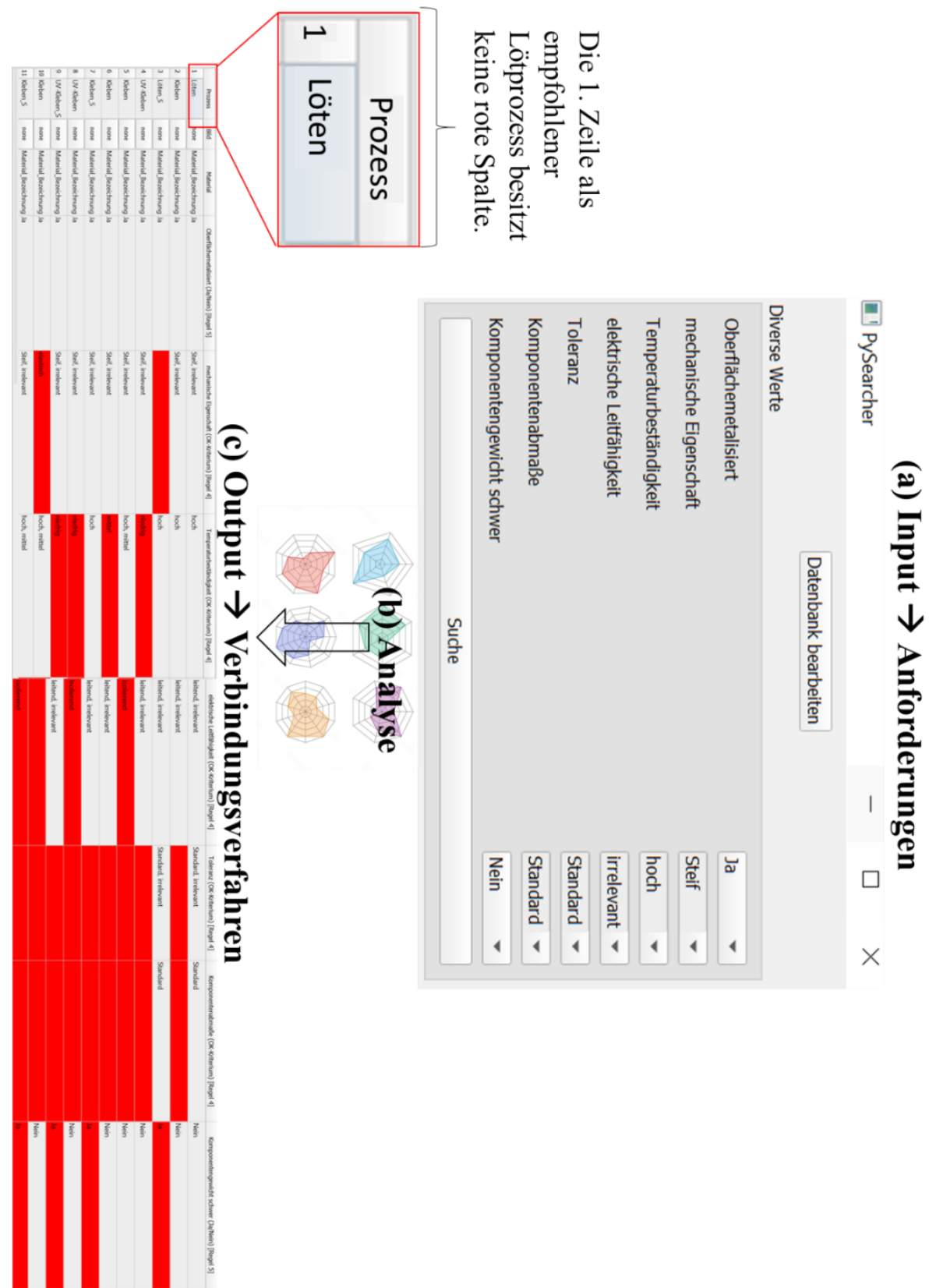


Abbildung 98: Validierung KETTS-V0.2 zur Identifikation der optimalen AVT.

5.5 Implikationen der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.3 und 5.4 interpretiert und erläutert werden. Die Ergebnisse des Kapitels 5.1 wurden bereits in Kapitel 5.2 aufgegriffen. Dieser Vorgriff war deshalb nötig, da die Interpretation der Ergebnisse von 5.1 eine grundlegende Voraussetzung für die Durchführung des Kapitels 5.3 war.

In der Studie (Kapitel 5.3) wurden sieben Unternehmen interviewt, die sich auf die Entwicklung und Herstellung individualisierter Produkte und Mikrosysteme spezialisiert haben. Dabei standen die Ableitung des PEP und die Identifikation von Maßnahmen bzw. Methoden im Fokus. Besonders bei der Entwicklung von individualisierten Produkten und Mikrosystemen legen die Unternehmen großen Wert auf Expertenwissen, da die Individualität der Produkte für den Herstellungsprozess und die Validierung dieser Produkte unvorhersehbare Auswirkungen mit sich bringt. In der Medizintechnik müssen bei der Entwicklung und Herstellung von medizinischen Produkten gesetzliche Vorschriften und Normen, wie beispielsweise die europäische Medizinprodukteverordnung (MDR) und die US-amerikanische *Food and Drug Administration* (FDA), beachtet werden. Jedoch geben diese Normen keine konkreten Vorgehensweisen vor. Daher gibt es bei der Validierung von Produkten, die bspw. mittels additiver Fertigung hergestellt werden, gewisse Freiräume. Um dennoch eine sichere und zuverlässige Anwendung von individualisierten Produkten zu gewährleisten, setzen Unternehmen auf die Überwachung des Herstellungsprozesses, eine entsprechende Nachbearbeitung des Produkts und eine risikobasierte Validierung. Eine enge Zusammenarbeit mit dem Kunden und eine starke Kundenintegration ist ebenfalls eine Möglichkeit, die Entwicklung von individualisierten Produkten zu unterstützen.

Zusammenfassend ergibt die Studie des Experteninterviews wesentliche Maßnahmen und zeigt, dass die Entwicklung von individualisierten Produkten und Mikrosystemen im Vergleich zu standardisierten Produkten unterschiedliche Maßnahmen und Vorgehensweisen erfordert, insbesondere im Hinblick auf die Validierung. In diesem Zusammenhang kann es darüber hinaus erforderlich sein, die medizinischen Richtlinien zu berücksichtigen, welche darauf abzielen, eine sichere und verlässliche Nutzung der betreffenden Produkte zu gewährleisten. Hinsichtlich des Entstehungsprozesses wird deutlich, dass die Herstellung des Produktes im Vergleich zu standardisierten Produkten recht schnell verlaufen muss. Dabei haben die wenigsten mit „ABCD-Musterteilen“ gearbeitet. Dies zeigt, dass der Anspruch besteht, digitale Modelle von Bauteilen genauso zu produzieren sind wie sie eben digital visualisiert worden

sind. Folglich ist es sehr wahrscheinlich, dass das Thema *Digital-Mock-Up* (DMU) in Zukunft immer mehr Beachtung in der Praxis gewinnen wird.

Das KETTS-Tool (Kapitel 5.4) hat den Vorteil, dass es bei ausreichender Datenbankgröße und bei Fällen mit mehr als 5 Anforderungen eine höhere Wahrscheinlichkeit hat, bessere Empfehlungen zu geben, als die Empfehlungen eines einzelnen Experten. Dies ist auf die Fähigkeit von computergestützten Systemen zurückzuführen, die im Vergleich zu Menschen große Datenmengen verarbeiten und analysieren können. Besonders nützlich wird das Tool dann, wenn es um die Entscheidungsfindung bei komplexen technischen Anwendungen geht, wie dies bei der Auswahl von Werkstoffen oder Prozessketten der Fall ist. Ebenso ist es für technische Vertriebsmitarbeiter von Vorteil, die relativ schnell eine grobe Aussage über die prinzipielle Machbarkeit von Anforderungen bei potenziellen Kunden treffen müssen. Hierfür werden nach dem heutigen Stand oft Fragebögen verwendet. Diese Vorgehensweise kann durch derartige Systeme wie das KETTS-Tool ersetzt werden, mit dem zusätzlichen Vorteil, dass das Tool bei einer kontinuierlichen Verwendung immer besser wird.

Jedoch ist es wichtig zu beachten, dass die Erstellung und Pflege einer solchen Datenbank ein erheblicher Aufwand sein kann. Die Validierung der Daten muss sorgfältig durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Daten repräsentativ sind und keine Verzerrungen aufweisen. Darüber hinaus müssen die Daten regelmäßig aktualisiert werden, um sicherzustellen, dass die Empfehlungen des Systems immer auf dem neuesten Stand. Eine weitere Herausforderung bei der Verwendung von KETTS ist, dass es eine gewisse technische Kompetenz erfordert, um das System zu verwenden und zu interpretieren. Der Anwender muss in der Lage sein, die Eingabe-Anforderungen zu verstehen und die Ergebnisse zu interpretieren. Bei der Verwendung von KETTS stellt sich auch die Frage, ob das Tool immer objektive Empfehlungen gibt. Wenn die Datenbank bspw. nicht ausreichend diversifiziert ist oder bestimmte Daten fehlen, könnte das Tool möglicherweise eine Verzerrung aufweisen und ungenaue Empfehlungen geben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das KETTS-Tool ein vielversprechendes Werkzeug ist, um bei der Entscheidungsfindung den Produktentwickler zu unterstützen. Es bietet eine höhere Wahrscheinlichkeit für objektive und genaue Empfehlungen als ein einzelner Experte. Allerdings gibt es auch Herausforderungen wie den Aufwand bei der Erstellung und Pflege einer umfangreichen Datenbank. Daher sollte bei der Verwendung des Systems sorgfältig geprüft werden, ob es geeignet ist und ob es ausreichend validiert und gepflegt wurde, um

genaue Ergebnisse zu erhalten. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass das Tool als ein Ersatz des Experten gesehen werden kann, jedoch dieses eher den Experten unterstützen soll, da die Ergebnisse von KETTS immer von einem Experten verifiziert werden sollte.

Die **CAD-Lösung von Altium** zeigte erhebliche Vorteile bei der Entwicklung von iMST. Insbesondere der zeitliche Aufwand konnte erheblich gekürzt werden, da damit nicht auf mehrere Softwarelösungen zugegriffen werden muss. Damit geht auch einher, dass bspw. Prozessschritte zur Datenkonvertierung für die Fertigungssteuerung erspart bleiben. Die Lösung von Altium bietet bereits mehrere Datenformate als Ausgangsdatei an. Darüber hinaus ist durch die Visualisierung der beiden Domänen (Mechanik und Elektronik) ein effizientes Design-Review möglich, wodurch die Entwicklungszeit deutlich verkürzt und die fachübergreifende Kommunikation unterstützt wird. So können auch die Änderungen am Bauteil direkt in der letzten „Softwareinstanz“ umgesetzt werden.

Die CAD-Lösung von Altium zeigt aber auch, dass die Software noch einige Einschränkungen aufweist, die die Verwendung etwas herausfordernd machen können, insbesondere die Schwierigkeit, Vias in 3D darzustellen, und die Notwendigkeit, Pads auf die Ober- und Unterseite zu platzieren. Die Air Wires, die die Richtung der Vias anzeigen sollen, sind noch mit Fehlern behaftet und können an den falschen Stellen platziert werden (siehe Abbildung 99).

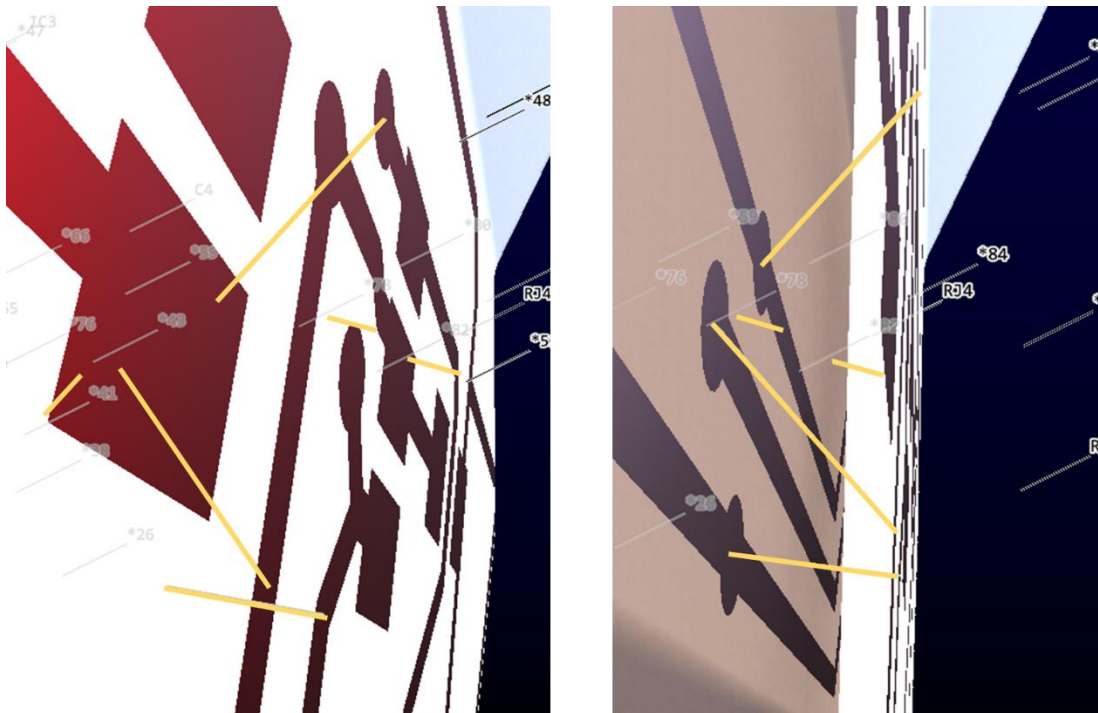


Abbildung 99: Problematik mit den Air Wires (siehe gelbe Linien), die nicht korrekt auf den Via-Pads bleiben.

Darüber hinaus ist auf die Schwierigkeiten beim Platzieren von Bauteilen hinzuweisen, da es darauf ankommt, von welcher Seite, in welchem Winkel und auf welchem Weg ein Bauteil aus dem umgebenden Raum auf das Substrat gezogen wird. Wird der Kondensator über die falsche Kante gezogen (siehe Abbildung 100, der Weg ist in Grün eingezeichnet), dann ist der Kondensator schräg auf der Oberfläche ausgerichtet. Der Kondensator lässt sich dann nicht mehr sauber ausrichten (siehe Abbildung 100). Auch hier kann es zu unerwünschten Ergebnissen kommen, wenn das Bauteil nicht ordnungsgemäß ausgerichtet ist.

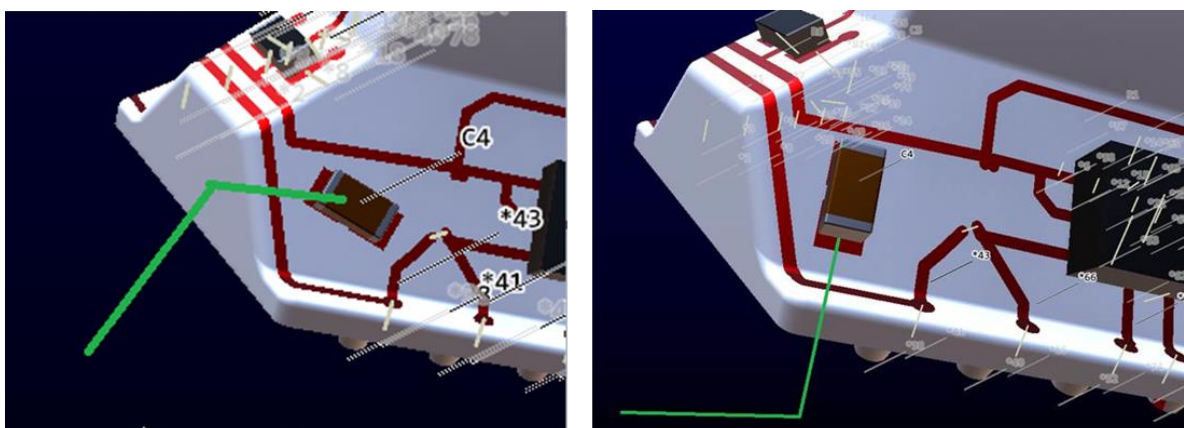


Abbildung 100: Problematik bei der Ausrichtung von Komponenten.

Weiterhin sollte beachtet werden, dass die Bedienung von der CAD-Software ein gewisses Maß an Einarbeitung erfordert, insbesondere bei komplexen Anwendungen wie dem Entwurf von elektronischen Schaltungen.

Trotz der Herausforderungen konnte gezeigt werden, dass die Integration von der MCAD- und ECAD-Software für iMST von Vorteil ist. Es ist jedoch wichtig sicherzustellen, dass die gewählte Software die benötigten Funktionen und Werkzeuge bereitstellt, um die spezifischen Anforderungen und Anwendungsbereiche zu erfüllen.

6 Produktentwicklungsmethodik für iMST

6.1 Phasen und Prozessschritte

Da die Produktentwicklungsmethodik unter anderem aus mehreren Prozessschritten bestehen soll, welche ebenfalls mehrere Aktivitäten enthalten können, werden nun in diesem Kapitel die Prozessschritte für die Methodik einzeln beschrieben. Wie bereits im Kapitel 2.2 erwähnt, beantwortet ein Prozessschritt grundsätzlich immer die Frage, „Was“ zu tun ist [40]. In diesem Kapitel werden also die Prozessschritte der Methodik aufgebaut und erläutert, wobei im nächsten Kapitel die dazugehörigen Methoden und Werkzeuge zugordnet und ebenfalls beschrieben werden.

Die erste Prozessphase beginnt mit der Ideen- und Anforderungsermittlung. Dies ist grundsätzlich auch für standardisierte Mikrosysteme der Fall. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei iMST häufig eine Überschneidung mit der zweiten Prozessphase, dem Produktdesign, auftritt. In vielen Fällen beginnt die Entwicklungsphase für iMST bereits mit einer vorhandenen Negativform eines Bauteils, die vom Kunden entsprechend des gewünschten Produkts entworfen wurde. Die Anforderungen beginnen oft durch die individualisierte Geometrie eines Objekts, bspw. der Bauräume von Maschinenanlagen oder des menschlichen Ohrs. Somit ist das Design eines mechanischen Bauteils bereits in der Anforderungsphase festgelegt. Daraus lässt sich schließen, dass die erste Prozessphase bei iMST faktisch aus zwei ineinandergreifenden Prozessschritten, nämlich der Phase Anforderungen und Design, besteht (siehe Abbildung 101).

Beim zweiten Prozessschritt wird dann die Elektronik sowie die nötige Programmierung innerhalb des Produktdesigns entworfen. Hierbei ist es insbesondere für iMST von

entscheidender Relevanz, dass der Entwickler sich ab einem bestimmten Reifegrad des Produktdesigns bereits mit der Thematik der Technologieauswahl auseinandergesetzt haben sollte. Nur unter diesen Voraussetzungen kann eine fundierte Machbarkeitsanalyse erfolgreich durchgeführt werden.

Der dritte Prozessschritt umfasst, abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall, entweder die risikobasierte Validierung (RBV) oder das detaillierte und angepasste Produktdesign. Im Falle von Medizinprodukten, die hohe Qualitätsanforderungen erfüllen müssen, aber nicht zeitkritisch sind, ist gemäß MDR eine RBV erforderlich. In anderen Fällen kann die RBV aus Gründen der Entwicklungszeit übersprungen und direkt mit dem detaillierten Produktdesign fortgefahren werden. Im Zuge eines detaillierten Produktdesigns sind Anpassungen und mögliche Änderungen an den Anforderungen zu erwarten. Daher wird empfohlen, in dieser Phase regelmäßige Kontrollen und Vergleiche mit den ursprünglichen Anforderungen durchzuführen.

Die Produktion stellt **den vierten Prozessschritt** im PEP dar, bei dem das angestrebte iMST gefertigt wird. In dieser Phase können auch Prototypen oder Musterbauteile hergestellt werden, um das Design, die mechanische Zuverlässigkeit des Produkts und den Prozess zu überprüfen. Für iMST ist die Abwägung, ob ein Prototyp hergestellt werden soll, jedoch deshalb so schwierig, da das Integrieren der elektronischen Funktionalitäten zu einer signifikanten Erhöhung von Kosten und Zeitaufwand führen kann. Die Herstellung von Prototypen oder Musterbauteilen sollte daher möglichst vermieden werden. Die Herstellung von Prototypen oder Musterteilen kann demnach die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des iMST-Ansatzes so stark beeinträchtigen, dass dessen Marktdurchdringung potenziell gefährdet wird.

Parallel zum vierten Prozess erfolgt die **Qualitätskontrolle als fünfter Prozessschritt**. Dabei sollen möglichst alle Anomalien und Unregelmäßigkeiten während des Fertigungsprozesses identifiziert werden. Dies setzt jedoch eine solide Datenbasis und fundiertes Wissen über den zugrundeliegenden Prozess voraus, welche im Laufe der Zeit systematisch erarbeitet und aufgebaut werden müssen. Folglich beinhaltet dieser Schritt sowohl einen Lernprozess als auch den Kontrollprozess selbst, welcher nach der Herstellung des iMST durchgeführt wird.

Der sechste und letzte Schritt im PEP ist das *Post-Processing*, der im Idealfall vermieden werden sollte. Das *Post-Processing* bezieht sich auf alle nachgelagerten Aktivitäten, die nach Abschluss des eigentlichen Produktionsprozesses durchgeführt werden, um das iMST weiter

zu optimieren, anzupassen und/oder zu korrigieren. Dies kann die Durchführung von Änderungen, teilweise manuell bzw. durch Handarbeit, beinhalten. Zu den *Post-Processing*-Aktivitäten können bspw. das Entfernen von Stützstrukturen, das Polieren, das Schleifen, das Lackieren oder das Zusammenbauen von Bauteilen gehören. Obwohl das *Post-Processing* in einigen Fällen unvermeidlich sein kann, um bestimmte Qualitätsstandards oder Kundenanforderungen zu erfüllen, ist es wünschenswert, diesen Schritt weitestgehend zu vermeiden oder zu minimieren. Das liegt für iMST vor allem daran, dass *Post-Processing*-Aktivitäten zusätzliche Risiken mit sich bringen, die nicht nur den Gesamtprozess weniger effizient und wirtschaftlich machen, sondern die Qualität des Bauteils aufgrund der Größe und Sensibilität des Bauteils erheblich verschlechtern können. Folglich kann ein hoher Grad an manueller Nachbearbeitung das Fehlerpotenzial erhöhen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen.

Nachstehende Abbildung 101 veranschaulicht die zuvor einzeln erläuterten Prozesse für iMST in einer sequenziellen Darstellung.

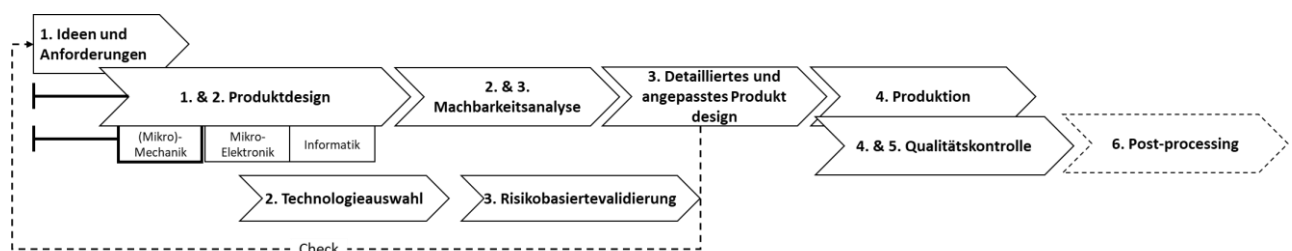


Abbildung 101: Prozessschritte der PEP-Methodik für iMST.

6.2 Methoden und Werkzeuge

Im vorherigen Kapitel wurden lediglich die einzelnen Prozessschritte chronologisch beschrieben und somit auch nur die Frage nach dem, „Was“ zu tun ist, beantwortet. Dieses Kapitel soll nun das „Wie“ des jeweiligen Prozessschrittes erläutern. Dabei werden überwiegend die Methoden berücksichtigt, die aus den Studien ermittelt wurden. Vereinzelt werden auch zusätzliche Methoden hinzugefügt, die sich aus den Rahmenbedingungen des Prozessschrittes ergeben. Ein mögliches Vorgehen zur Auswahl von geeigneten Methoden kann aus dem Kapitel 2.3.3 entnommen werden.

Insgesamt wurden die folgenden Methoden und Werkzeuge ausgewählt, die sich für den oben gezeigten Prozess und für iMST als besonders geeignet herauskristallisiert haben:

- *Requirements Engineering* mit Brainstorming
- *Co-Design* (CAD-basiert)
- Absicherung von Grenzen und Freiräumen
- *Co-Creation*
- DfM
- Simulationen und statistische Verfahren
- *In-Process Monitoring*
- Wissensmanagement

Diese Methoden werden in Abhängigkeit der Anforderungen für den jeweiligen Prozessschritt zugeordnet und eingesetzt. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte über die einzelnen Methoden erläutert, sodass die Gründe für die Auswahl verständlich und die Anwendung dieser Methoden erleichtert wird. Auf die letztgenannte Methode wird dabei nicht mehr eingegangen, da diese mit der Neuentwicklung der Software KETTS umfassend behandelt wurde.

Der Begriff **Requirements Engineering (RE)** hat zwar keine bestimmte und offiziell bekannte Definition [225], kann aber durch Kernprozesse und Aktivitäten verdeutlicht werden. Diese zeigt die Abbildung 102.

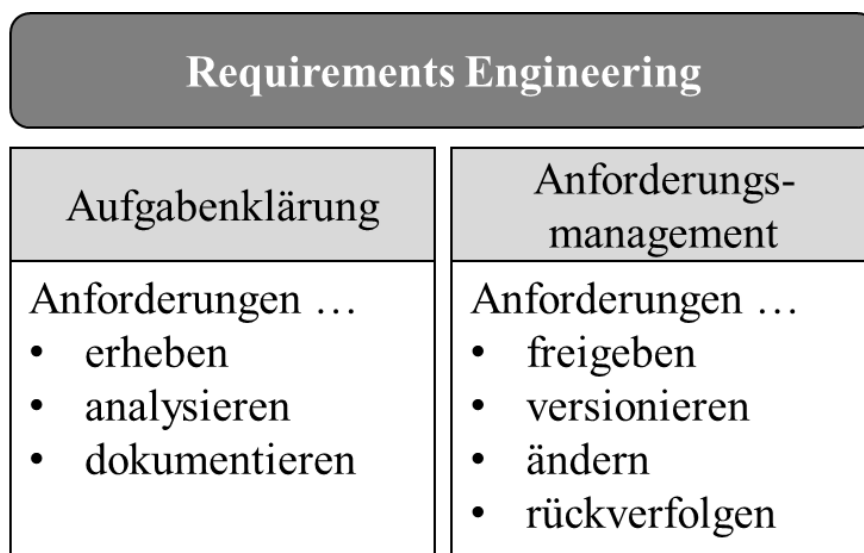


Abbildung 102: Kernprozesse und Aktivitäten des Requirements Engineering nach [224].

Im Kontext der Entwicklung von iMST haben insbesondere die Analyse und Dokumentation von Anforderungen eine entscheidende Bedeutung. Unter Analyse ist auch die Ideenfindung mittels Brainstorming zu verstehen, da bei der Analyse oft bekannt wird, dass für bestimmte Anforderungen keine konkrete Lösung besteht. Die Anforderungen an iMST sollten priorisiert

und mit den entsprechenden Freiheitsgraden und Toleranzen gekennzeichnet werden. Darüber hinaus ist eine begründete und einfache Erläuterung der Fertigbarkeit in Bezug auf die ausgewählten Anforderungen an das iMST ebenfalls von großer Relevanz. Schenkt man vor allem diesen Aspekten große Aufmerksamkeit, so können aufwendige Korrekturschleifen und Anfragen mit Vorschlägen zur Sicherstellung der Fertigbarkeit vermieden werden. Jedoch kann eine derartige Durchführung des RE zeitintensiv sein und passt nicht in das Konzept bzw. die Anforderungen der Produktindividualisierung, da die Herstellung von individualisierten Produkte in den meisten Anwendungsfällen schnell erfolgen muss. Daher wird das RE vor allem für kostensensible und qualitätsanfordernde Situationen empfohlen.

Die iMST erfordern die Zusammenarbeit beim Design (**Co-Design**) zwischen mechanischen CAD (MCAD) und elektrischen CAD-Systemen (ECAD). Aufgrund der Technologievielfalt bei der Produktion eines iMST ist es von großer Bedeutung, dass auch die Funktion in der M-ECAD-Software vorhanden ist, dass vielfältige Datenformate ausgegeben werden können. Besonders für digitale Prozessketten, die häufig bei der Herstellung von iMST zum Einsatz kommen, sollte die verwendete Software in der Lage sein, die gängigsten Datenformate zu generieren. Diese sind [226]:

- STL (Stereolithographie): Dies ist das gängigste Format der additiven Fertigung. Es speichert die Geometrie des Modells als dreieckige Facetten und ist für die meisten 3D-Drucker und für Slicing-Software geeignet.
- OBJ (*Object*): Dieses Format ist eine Alternative zum STL-Format und kann zusätzlich zu Geometrien auch Texturen und Farbinformationen speichern. Es wird jedoch nicht von allen Anlagen der additiven Fertigung unterstützt.
- AMF (*Additive Manufacturing File Format*): AMF ist ein fortschrittlicheres Format, das entwickelt wurde, um die Einschränkungen von STL zu überwinden. Es kann Farben, Materialien und komplexe Geometrien speichern.
- 3MF (*3D Manufacturing Format*): 3MF ist ein weiteres modernes Format, das Farben, Materialien und komplexe Geometrien speichern kann. Es wurde entwickelt, um ein universelles Dateiformat für 3D-Druckanwendungen zu schaffen. Es wird von vielen 3D-Druckern und von Slicing-Software unterstützt, aber noch nicht von allen.

Bei sehr komplexen Anwendungen und Prozessketten, die nicht nur die typischen Anlagen der additiven Fertigung verwenden, kann es hilfreich sein, in der 2D-Umgebung zu arbeiten und somit DXF (*Drawing Exchange Format*) Formate auszugeben. DXF ist ein CAD-Dateiformat,

das hauptsächlich für den Austausch von 2D-Zeichnungen zwischen verschiedenen CAD-Systemen entwickelt wurde. Des Weiteren wäre die Ausgabe einer STEP-Datei (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) förderlich, da diese vor allem dafür verwendet wird, um 3D-Modelldaten zwischen verschiedenen CAD-Systemen auszutauschen. Es ist also ein sehr nützliches Format für die Zusammenarbeit und den Datenaustausch. Wie aus den Studien gezeigt werden konnte, ist hierfür die Lösung von Altium „M/E-CAD CoDesigner“³¹ eine weitentwickelte und gute Möglichkeit.

Um trotz der Individualisierung Kundenanforderungen überhaupt planen zu können, wird oft die Strategie des **Absicherns von Grenzen und Freiräumen**³² eingesetzt. Um diese vollständig anwenden zu können, wird auf das Metastrukturmodell für individualisierte Produkte von Baumgarten und Lindemann (siehe Abbildung 51) verwiesen. Dieses gibt systematisch vor, welche Bereiche und Anknüpfungspunkte innerhalb eines Produktes vorhanden sind. So können bspw. vorab definierte Bereiche getestet und abgesichert werden. Dadurch kann sich der Anwender/Kunde an definierten Stellen und Komponenten des Produktes frei im Design entfalten und kennt gleichzeitig auch die Einschränkungen und Grenzen.

Die **Co-Creation** ist als das kollaborative Designen eines Produktes zwischen Kunden und Lieferanten [228] definiert. Gerade für Produkte mit interdisziplinärem Charakter, wie dies auch für iMST zutrifft, kann diese Methode von großer Bedeutung sein. *Co-Creation* kann besonders nützlich bei der Entwicklung von iMST sein, da bei iMST häufig unvorhersehbare und neue Herausforderungen entstehen. In solchen Fällen ermöglicht die *Co-Creation*-Strategie eine agile und flexible Reaktion auf Veränderungen und unerwarteten Anforderungen während der Produktentwicklung. Die Zusammenarbeit fördert eine offene Kommunikation, eine schnellere Problemlösung und eine effektivere Anpassung an die Bedürfnisse des Kunden. Dabei ist wichtig zu erwähnen, dass so auch die Verantwortungen über das Ergebnis gemeinsam getragen werden müssen. Die gemeinsame Verantwortung für das zu entwickelnde Produkt fördert nicht nur den jeweiligen Austausch von Kenntnissen, Erfahrungen und Perspektiven, sondern auch eine Atmosphäre des Vertrauens und der Zusammenarbeit, die es ermöglicht, Risiken einzugehen und kreative Ansätze zu verfolgen, die gerade für individualisierte

³¹ Siehe hierfür [227]

³² Ein spezifisches Fachwort für das Absichern von Grenzen und Freiräumen konnte aus der Produktentwicklung nicht identifiziert werden. Da das Absichern von Grenzen und Freiräumen eine Mischung aus den bekannten Begriffen „Customization Zone“ und „Design constraints“ ist, könnte folglich ein Kunstwort dafür entwickelt werden, wie etwa „Custotraits“.

Anwendungen entscheidend sein können. Es sollten dabei die zentralen Elemente des *Co-Creation* beachtet werden. Diese sind [229]:

1. Wissensaustausch (*Knowledge Sharing*): Die Kunden bringen ihre Kreativität und neuen Ideen in den Entwicklungsprozess ein, während die Lieferanten ihre technischen Fähigkeiten und Erfahrungen teilen. Dieser Wissensaustausch ermöglicht es beiden Parteien, voneinander zu lernen und innovative Lösungen zu entwickeln.
2. Fairness/Gerechtigkeit (*Equity*): Im Rahmen der *Co-Creation* legen die Lieferanten einen besonderen Fokus auf die Bedürfnisse der Kunden und schaffen eine Umgebung, in der Kunden sich aktiv am Entwicklungsprozess beteiligen können. Dazu gehört auch die Abgabe von Kontrolle und die Bereitstellung von Ressourcen, um eine gerechte und faire Zusammenarbeit zu gewährleisten.
3. Interaktionsprozesse (*Interaction*): Die Zusammenarbeit zwischen Anbietern und Kunden erfordert kontinuierliche Kommunikation und Interaktion. Durch den offenen Dialog und den Austausch von Ideen, Feedback und Lösungsansätzen können gemeinsam optimierte und kundenspezifische Produkte entwickelt werden.

Die **DfM-Methode** ist derart essentiell, dass sie einen großen Teil des Prozessschrittes „Machbarkeitsanalyse“ ausmacht. In Kürze lässt sich das Prinzip dieser Methoden dahingehend beschreiben, dass das gewünschte Produkt so konzipiert wird, dass die Fertigung unter Berücksichtigung der jeweiligen Produktionsverfahren reibungslos und den Anforderungen entsprechend durchgeführt werden kann (siehe hierzu auch Kapitel 2.3.2). Damit geht einher, dass die sogenannten *Design-Rules* bzw. „Gestaltungsregeln“ beachtet werden müssen, die die Grundlage dieser Methode darstellen. Als Beispiel werden einige grundlegende Gestaltungsregeln für die jeweiligen Verfahren innerhalb einer Prozesskette kurz vorgestellt. Dabei wurden die Verfahren ausgewählt, die potenziell für die Produktion von iMST verwendet oder in Betracht gezogen werden können (siehe hierfür auch Kapitel 2.1.4.4). Diese sind konkret FDM, DLP, Spritzguss und LDS.

Gestaltungsregeln für FDM sind nach VDI3405;2015 [102] und Weiss 2019 [192]:

- Größe: Die Bauteilhöhe sollte dem Vielfachen der Schichtdicken entsprechen.
- Schichtstärke: Soll mindestens 0,25 mm betragen.
- Wanddicke: Die Mindestwanddicke eines Bauteils sollte 0,5 mm besitzen.

- Toleranzen: Die verfahrenstechnischen Toleranzen im FDM-Verfahren betragen $\pm 0,5$ Prozent, bei einer Mindesttoleranz von $\pm 0,2$ mm.
- Spaltmaß: Spaltmaße ausreichend dimensionieren. Richtwert für Aufmaß 0,1 - 1,5 mm.
- Überhangwinkel: Der Richtwert für Überhangwinkel (Downskin-Winkel) beträgt $\geq 45^\circ$.
- Stützstrukturen: Stützstrukturen sind oberhalb des kritischen Downskin-Winkels notwendig. Je kleiner die Schichtdicke, desto kleinere Downskin-Winkel sind abbildbar.

Gestaltungsregeln für DLP können VDI3405;2015 [102] entnommen werden:

- Wanddicke: Unterstützte Wände mindestens 0,4 mm, freitragende 0.6 mm dick.
- Überhangwinkel: Weniger als 1,0 mm lang und mindestens 19° vom Niveau entfernt.
- Verbindungen: 0,2 mm für Montageanschlüsse und 0,1 mm für festen Sitz.
- Eingravierte Details: Mindestens 0,4 mm breit und 0,4 mm dick.
- Löcher: Minimaler Durchmesser von 0,5 mm.

Gestaltungsregeln für Spritzgussverfahren nach Fein sind [230]:

- Radien: Keine 90° Winkel, Ecken und Kanten mit Radien versehen.
- Wanddicke: So dünn wie möglich, so dick wie notwendig.
- Werkstoff: Spritzgusswerkzeuge nicht aus Aluminium herstellen, um werkzeugbedingte Fremdabscheidung bei der Metallisierung von MID-Bauteilen zu vermeiden.
- Oberfläche: Standardoberflächengüte von ($R_z 5\mu m$) ist ausreichend.
- Entkernungen, Verrippungen und Hohlräume: Das Bauteil sollte Rippen und stützende Versteifungen haben, damit wird eine höhere Festigkeit gewährleistet und kosmetische Fehler wie z.B. Verformung, Einfallstellen und Lunker vermieden.
- Angüsse und Auswerfer: Sind notwendig, damit der Kunststoff in die Form gelangt und die Kunststoffteile effektiv aus der Form ausgeworfen werden können.

Gestaltungsregeln für die Laserstrukturierung nach Franke [80] und Kumke [105]³³ lauten:

- Kurze Füllvektoren vermeiden: Schmale Leiterbahnen sollten daher in Leiterbahnrichtung und nicht quer dazu gefüllt werden (eine Leiterbahnumrandung).

³³ Diese lehnen sich alle an die LDS-MID-Designregeln von LPKF an. Für eine genauere Betrachtung der Design-Regeln wird diese Quelle stark empfohlen [231].

- Laserparameter: Je steiler eine zu bearbeitende Schräge ist, desto schneller muss der Fokus in z-Richtung bei der Bearbeitung nachgeführt werden. Bei schräger Bestrahlung auf eine größere Fläche empfiehlt der Leitfaden, zwischen der Orthogonalen auf die Prozessoberfläche und dem Laserstrahl einen Winkel von 70° nicht zu überschreiten. Der Einfallswinkel zwischen der Horizontalen und dem Laserstrahl darf bei größerem Abstand zur Mitte maximal 13° betragen.
- Teilhalterung: Halterungen und Klemmvorrichtung sollen aus Kunststoff sein, damit Fremddabscheidungen vermieden werden. Das Bauteil sollte in mehreren Positionen eingespannt werden, damit bereits aktivierte Bereiche beim Halten in der nächsten Position nicht beschädigt werden.

Eine der effektivsten Maßnahmen, um präventiv bei der Produktentwicklung Fehler zu vermeiden und das Design zu optimieren, ist der Einsatz von Simulationen und statistischen Verfahren. Für die Herstellung von iMST sollten vor allem Füllsimulationen durchgeführt werden, insbesondere deshalb, um die Stellen der Bindenähte zu erkennen. Die Bindenähte spielen deshalb eine entscheidende Rolle für die Machbarkeit, da diese dort zu vermeiden sind, wo elektrische Funktionen und Bauteile eingesetzt werden. Durch das Verständnis der Fülldynamik kann also die Lage der Anschnittstelle und der Geometrie des Bauteils angepasst werden, um die Bildung von Bindenähten zu kontrollieren und deren negative Auswirkungen zu minimieren. Aufgrund der geringen Größe von iMST haben Schwindungsphänomene einen stärkeren Einfluss auf die Produktqualität und -genauigkeit im Vergleich zu größeren Produkten im Makrobereich. Die Miniaturisierung führt dazu, dass selbst geringfügige Schwindungen oder Verzugerscheinungen während des Herstellungsprozesses zu signifikanten Abweichungen von den gewünschten Geometrien und Toleranzen führen können, was die Leistung und Funktionalität des Mikrosystems beeinträchtigen kann. Daher ist die Abkühl- und Verzugssimulation besonders empfehlenswert. Diese Simulationen ermöglichen es, den Abkühlvorgang des Kunststoffbauteils im Werkzeug nachzuvollziehen und die Schwindung und Verzugerscheinungen, die während des Abkühlens auftreten, zu untersuchen [85].

In Bezug auf die statistischen Methoden können viele Verfahren aus der deskriptiven, explorativen und induktiven Statistik in Frage kommen. Aufgrund der Schwierigkeit, die iMST in einer größeren Stichprobe selbst zu testen, ist es empfehlenswert, den Prozess zu validieren. Da aus den Studien keine geeignete statistische Methode für die Prozessvalidierung identifiziert werden konnte, stellt diese Arbeit die Prozessfähigkeitsanalyse vor. Diese wird vom TÜV (Technischen Überwachungsverein) bzw. ISO 13485:2016 und DIN ISO 22514-2 empfohlen.

Beim minimalen Prozessfähigkeitsindex handelt es hierbei um eine statistische Kennzahl, die verwendet wird, um die Fähigkeit eines Fertigungsprozesses zu bewerten und Produkte innerhalb der vorgegebenen Spezifikationsgrenzen oder Toleranzen zu produzieren. Die Indizes C_p (*Process Capability Index*) und C_{pk} (*Process Capability Index Adjusted for Process Centering*) sind zwei der am häufigsten verwendeten Prozessfähigkeitsindizes.

- C_p : Verhältnis zwischen der Toleranzbreite des Prozesses und der Streuung der Prozessergebnisse.

Formel 6: Prozessfähigkeitsindex C_p

$$C_p = (USL - LSL) / 6 * \sigma$$

Dabei ist USL die obere und LSL die untere Spezifikationsgrenze und Sigma die Standardabweichung der Prozessleistung. Ist der Prozess zentriert und weist eine geringe Streuung auf, ist die Defektrate gering. Ist der Prozess zentriert, weist aber eine hohe Streuung auf, ist die Defektrate hoch. Ist der Prozess stark dezentriert, ist die Defektrate ebenfalls hoch (siehe Abbildung 103).

- C_{pk} : Ein Maß für die Sicherheit, mit der eine Spezifikation eingehalten wird bzw. wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Spezifikation nicht eingehalten wird.

Formel 7: Prozessfähigkeitsindex C_{pk}

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3 * \sigma}; \frac{\mu - LSL}{3 * \sigma} \right]$$

Die Formel 7 gilt lediglich bei einer angenommenen Normalverteilung, wobei μ für den Erwartungswert steht.

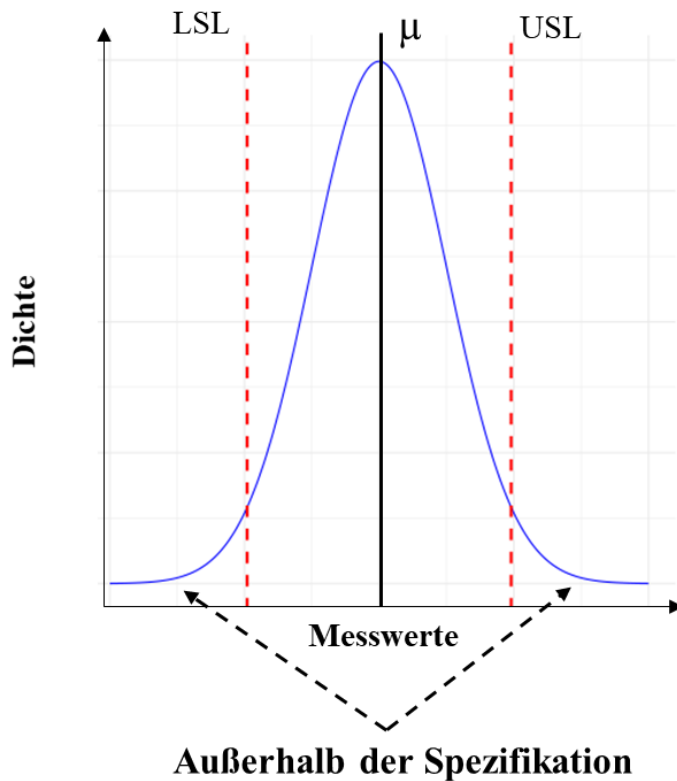


Abbildung 103: Prozessfähigkeitsanalyse (Cpk und Cp).

Eine recht junge Methode ist das ***In-Process-Monitoring*** (Prozessüberwachung und Echtzeit-Prozesssteuerung) zur Verbesserung der Teilequalität und Wiederholbarkeit bzw. Replizierbarkeit [232]. Eine grundsätzliche Vorgehensweise für das *In-Process-Monitoring* konnte nicht gefunden werden. Folglich werden hier auf einer relativ allgemeinen Ebene die nötigen Schritte beschrieben, die für diese Implementierung notwendig sein könnten:

1. **Zieldefinition und Anforderungen:** Qualitätsstandards für 3D-Druckteile festlegen und wichtige Parameter und Toleranzen für einen erfolgreichen Druck identifizieren.
2. **Auswahl von Überwachungstechnologien:** Relevante Technologien und Sensoren zur Drucküberwachung auswählen, wie z. B. optische Sensoren für Schichtbildung, thermische Sensoren für Temperaturverteilung, akustische Sensoren für Druckgeräuschanomalien und Kraftsensoren für Druckbetthaftung.
3. **Integration der Sensoren:** Ausgewählte Sensoren in den 3D-Drucker oder die Druckumgebung integrieren, um die Parameter kontinuierlich zu überwachen.
4. **Datenerfassung und -verarbeitung:** Ein Echtzeit-Datenerfassungs- und Verarbeitungssystem für Sensordaten entwickeln, möglicherweise mit Mikrocontrollern oder spezialisierten Systemen.

5. **Entwicklung von Analyse- und Diagnosealgorithmen:** Algorithmen zur Analyse der Daten und Erkennung von Druckfehlern oder Toleranzabweichungen erstellen. KI und maschinelles Lernen können dabei hilfreich sein.
6. **Implementierung von Benachrichtigungen und automatischen Korrekturen:** Ein System einsetzen, das bei erkannten Problemen warnt und gegebenenfalls automatische Korrekturen vornimmt, um den Druckvorgang anzupassen und die Qualität zu verbessern.
7. **Datenspeicherung und -analyse:** Druckdaten für spätere Analysen und Prozessverbesserungen speichern.
8. **Leistungsüberprüfung und Optimierung:** Das *In-Process-Monitoring*-System regelmäßig überprüfen und optimieren, um Druckqualität und Effizienz zu steigern.

6.3 Ganzheitliche Betrachtung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert, die im Kontext des primären Forschungsziels dieser Arbeit erreicht wurden. Der PEP für iMST wird durch Abbildung 104 visualisiert. Diese präskriptive Systematisierung resultiert aus den Studien, deren Ergebnisse analysiert und synthetisiert worden sind. Durch die Integration der gewonnenen Erkenntnisse aus den einzelnen Untersuchungen ergibt sich ein umfassender Ansatz, der darauf abzielt, sowohl die Effizienz als auch die Reproduzierbarkeit für iMST sicherzustellen.

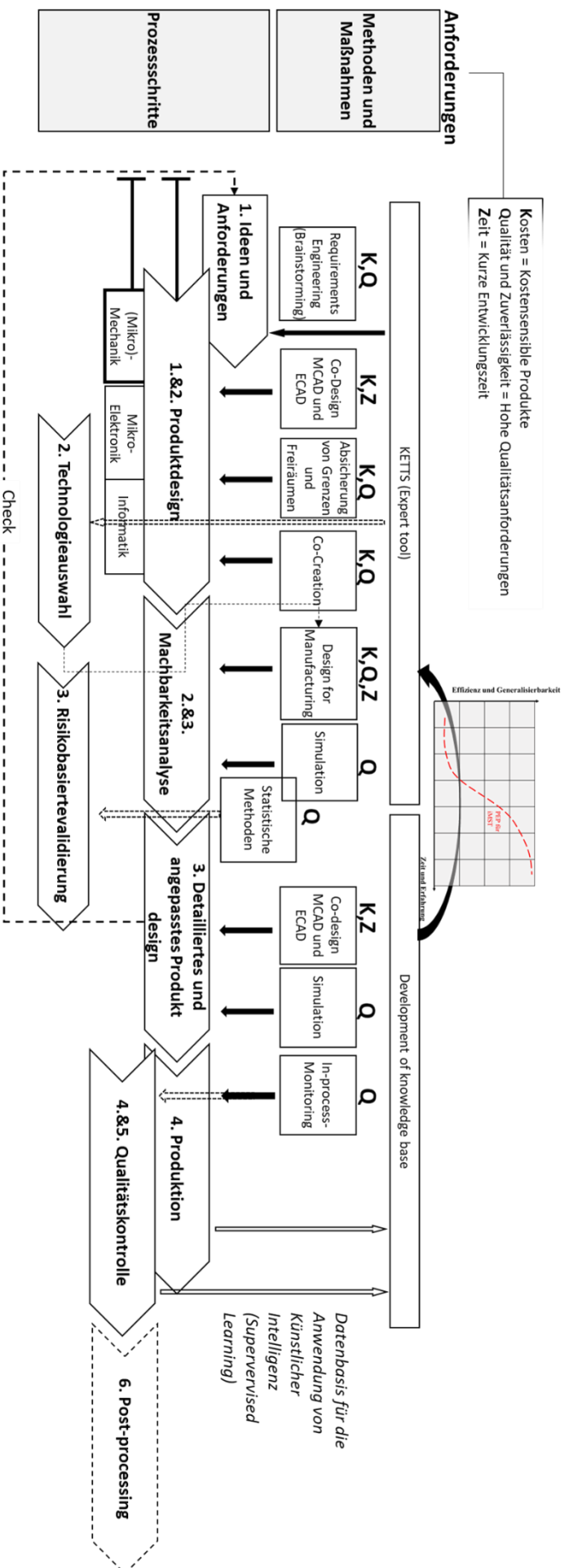


Abbildung 104: PEP für iMST.

6.4 Validierung des PEP

Im Rahmen dieser Validierung soll ein weiteres iMST entwickelt und hergestellt werden. Um ein möglichst repräsentatives Bauteil durch diverse geometrische Anforderungen zu erhalten, wird das Anwendungsbeispiel aus dem Kapitel 4.1.3 übernommen und umgesetzt. In der Tabelle 20 wird der Validierungsrahmen dargestellt, wobei die Partner vor dem ersten Prozessschritt des PEP noch unbekannt waren.

Tabelle 20: Partner und Rahmen der Validierung des PEP.

Partner	Aufgabe	Eingesetzte Technologien	Eingesetzte Methoden und Werkzeuge
Hahn-Schickard	Produktdesign		-KETTS -M/ECAD Altium Designer 365
Arburg	Herstellung des Grundkörpers	<i>freeformer</i>	-M/ECAD Altium Designer 365
LPKF	Strukturierung	Laseranlage zur Direktstrukturierung	-M/ECAD Altium Designer 365
LPKF	Metallisierung	Außenstromlose Metallisierung	Keine

Bevor der Prozess möglichst nach dem Vorbild des dargestellten PEP gestartet werden kann, muss eine gewisse Datenbasis vorhanden sein, da es sich um einen wissensbasierte PEP handelt. Folglich wurde eine Datenbank aus Kapitel 5.4.3 übernommen und erweitert. Damit kann der PEP begonnen werden. In diesem Forschungsprojekt kommt erneut die moderate Teilnahmebeobachtung zum Einsatz, da diese aufgrund der zuvor genannten Gründe im Rahmen des Pilotprojekts als geeignete Methode gewählt wurde.

Es werden nun die einzelnen Phasen beschrieben. Am Ende sollen dann die wichtigsten Kennzahlen dargestellt werden, sodass ein annähernder Vergleich mit dem Pilotprojekt durchgeführt werden kann.

Produktdesign

In dieser ersten Phase wurde das mechanische Bauteil in die Altium Software importiert. Die Anforderungen wurden aus dem Anwendungsfall im Kapitel 4.1.3 übernommen. Wie durchaus üblich bei iMST ist das mechanische Produktdesign bereits bekannt. Anschließend konnte direkt in der CAD-Lösung in 3D mit dem Routen und der Erstellung des Schaltplans begonnen werden. Resultierend entstand ein digitales Bauteil mit den entsprechenden Leiterbahnen (siehe Abbildung 105).

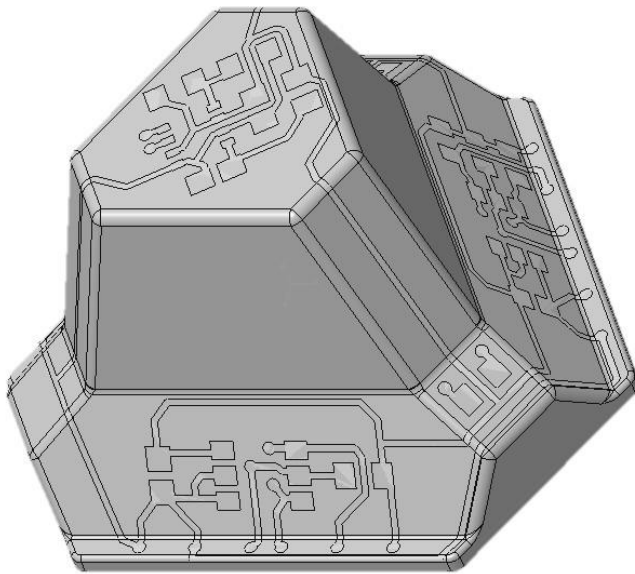


Abbildung 105: Digitales Produktdesign mit elektrischen Leiterbahnen der ersten Phase.

Durch Verwendung einer cloudbasierten Lösung wurde damit auch der Ansatz der *Co-Creation* ermöglicht. Dadurch konnte der aktuelle Stand des Entwurfs jederzeit standortunabhängig von den entsprechenden Mitarbeitern angezeigt und bearbeitet werden. Es hat sich gezeigt, dass während der verschiedenen Phasen des Produktentwurfs interdisziplinäre Rückmeldungen von Experten aus unterschiedlichen Fachbereichen eingeholt wurden. So konnten Korrekturschleifen auf ein Minimum reduziert werden. Obwohl das Produkt noch nicht finalisiert war, konnte durch die Transparenz der aktuellen Stände bereits die **Technologieauswahl** durch die Verwendung von KETTS durchgeführt werden. Da eine wichtige Anforderung die Verwendung eines Serienwerkstoffes war, ist die Entscheidung für das Spritzgussverfahren mit gedruckten Werkzeugen, wie ebenfalls im Pilotprojekt umgesetzt, naheliegend. Durch die Verwendung des KETTS wurde der Vorschlag für den *freeformer*

identifiziert. Der *freeformer* ist eine Technologie der Firma Arburg.³⁴ Es ist damit also möglich, Serienwerkstoffe zu verwenden, ohne Werkzeuge nutzen zu müssen. Dies ist ein erheblicher Vorteil gegenüber dem *RapidTooling*-Ansatz. Darüber hinaus wurde von KETTS angezeigt, dass aufgrund der Winkel des Bauteils das LDS-Verfahren am geeignetsten ist.

Machbarkeitsanalyse

Bei der Machbarkeitsanalyse werden die Technologien bzw. Fertigungsverfahren, welche unter anderem durch KETTS vorgeschlagen wurden, genauer begutachtet. Dazu gehörten die Prüfung der Verfügbarkeit über die Werkstoffe und die Bewertung möglicher Abweichungen von grundlegenden Design-Regeln. In dieser Phase sollte festgelegt werden, ob die Herstellung des Bauteils anhand des Konzepts prinzipiell möglich ist. Im Rahmen dessen wurde insbesondere auf die Einhaltung der folgenden Design-Regeln geachtet.

- Werkstückhalterung: Handhabung für die Laserbearbeitung
- Leiterbahnbreiten und -abstände: Empfohlene Leiterbahnbreite 150 μm ; empfohlener Leiterbahnabstand 200 μm
- Kantenradius: Scharfkantige Übergänge sollten im Bereich der Strukturierung vermieden werden → empfohlen ist ein Wert zwischen 100 – 150 μm .
- Leiterbahnposition: Bei der Auslegung von Leiterbahnen sollten diese nicht direkt an Wänden anliegen. Dies dient dazu, eine mögliche Ablagerung von Ablationsprodukten oder Fremdotscheidungen auf der Wandung zu reduzieren. Ein Beispiel hierfür siehe Abbildung 106.

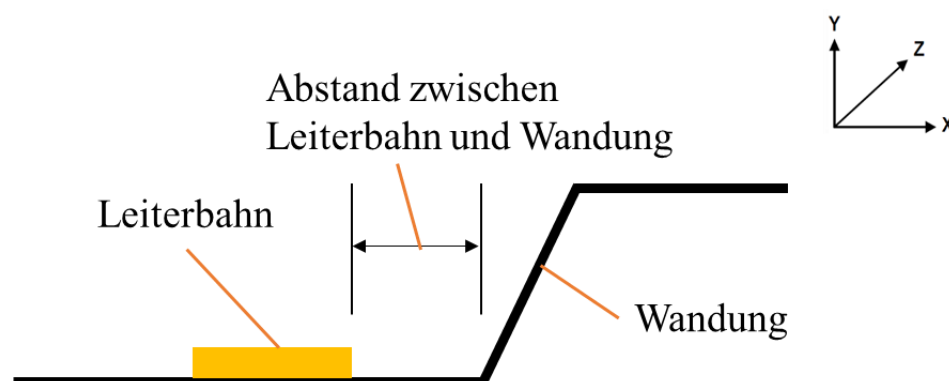


Abbildung 106: Design-Rule Leiterbahnabstand nach LPKF.

³⁴ Eine genaue Beschreibung dieser Technologie kann von der folgenden Seite abgerufen werden:
<https://www.arburg.com/de/de/produktwelt/additive-fertigung/freeformer/>

Insbesondere kamen Zweifel über die Machbarkeit aufgrund des Treppenstufeneffektes auf. Wie groß dieser Effekt genau ist, konnte aufgrund des fehlenden Prozesswissens und aufgrund der relativ kleinen Größe des Bauteils nicht genauer beurteilt werden. Dennoch konnte prinzipiell die Machbarkeit bestätigt werden. Mit der Bestätigung der Prinzipiauglichkeit wurde auch mit der Programmierung der Firmware für den geplanten Mikrocontroller begonnen.

Angepasstes Produktdesign

Dieser Prozessschritt wurde mit einem ersten Design-Review-Prozess aller Beteiligten gestartet. Dabei wurden offene Fragen besprochen sowie Bedenken und kritische Punkte erwähnt. Die Kernfragen für die Verantwortlichen der Hersteller bezogen sich überwiegend auf die Anforderungen von Freiräume und Grenzen, bspw., „Wie hoch muss die Oberflächengüte mindestens sein?“ oder „Können bestimmte Stellen am Bauteil vergrößert werden?“. Obwohl die Machbarkeit dieser Anforderungen durch die Verwendung von KETTS bestätigt wurde, ergaben sich dennoch Änderungswünsche, welche die Prozessqualität absichern sollen. Nach dem *Design-Review* bekamen die Beteiligten den Zugang zur Cloud, sodass sie über den aktuellen Stand informiert waren und Änderungen am Bauteil jederzeit und überall nachvollziehen und durchführen konnten. Die Änderungsvorschläge bezogen sich insbesondere auf die Größe des Bauteils. Da die Größe des Bauteils eine Hauptanforderung darstellt, entschied man sich, die Anpassung relativ gering zu halten. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass die Strukturierung auf der Innenseite des Bauteils kaum möglich sein würde. Daher mussten die Restriktionen mit den Anforderungen verglichen und geprüft werden, inwiefern diese ausschlaggebend sind. Anschließend erfolgte die Freigabe zur Fertigung.

Produktion

Angeichts des Neuheitsgrades des Produkts und der vergleichsweise kostengünstigen Möglichkeit, Bauteile mit dem *freeformer* zu fertigen, wurden zur Absicherung des Prozesses Musterteile hergestellt. Die Ergebnisse dieser Produktion waren bis auf die Umsetzung von den Pins vielversprechend, wodurch schließlich das eigentliche Bauteil gefertigt wurde. Dieses zeigt Abbildung 107.



Abbildung 107: Grundkörper hergestellt mit dem *freeformer*.
In Kooperation mit Arburg.

Es konnte festgestellt werden, dass bei bestimmten Durchmessern und Oberflächengüten die Pins nicht umgesetzt werden können (siehe Abbildung 108). Zudem sind an bestimmten Stellen der Laserstrukturierung Lücken zu finden (siehe Abbildung 109).

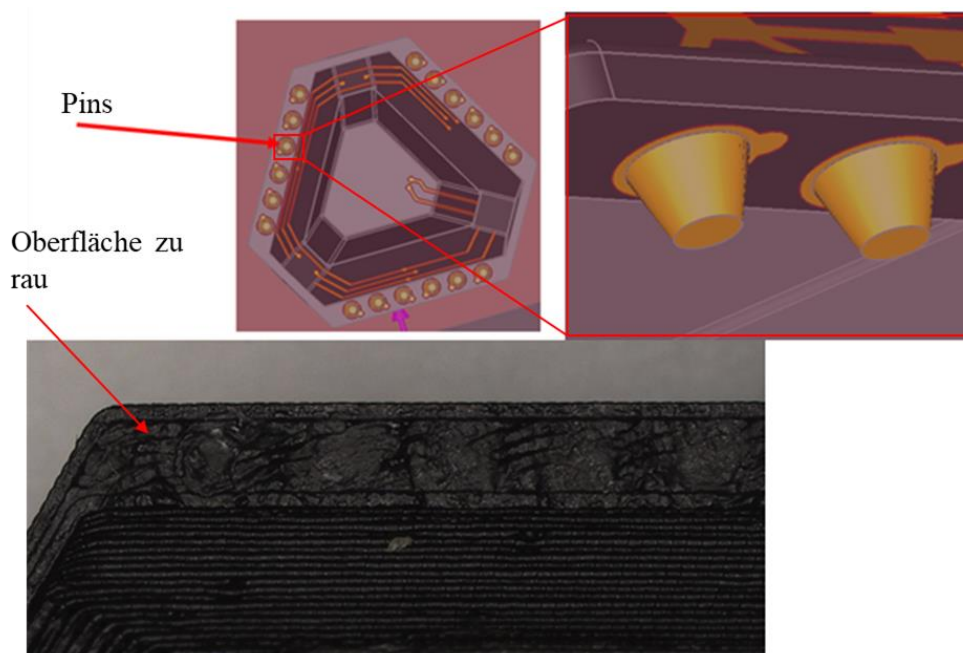


Abbildung 108: Darstellung der Problematik zur Metallisierung der Pins. In Kooperation mit LPKF.

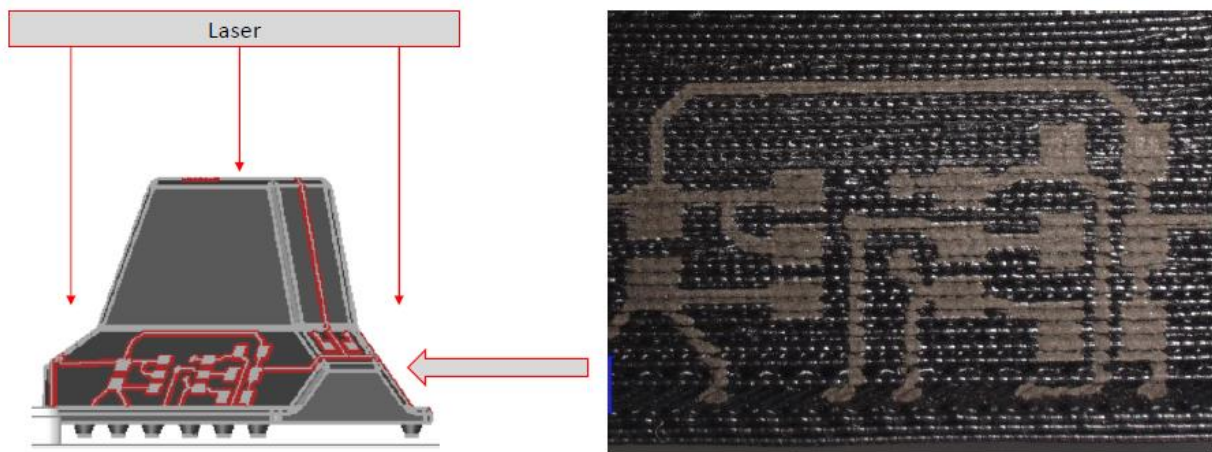


Abbildung 109: Stellenweise Lücken in den Strukturen bei einem Einfallswinkel von ca. 60°. In Kooperation mit LPKF.

Tabelle 21 zeigt den Unterschied zwischen dem Validierungsprozess und dem Pilotprojekt anhand definierter Kriterien.

Tabelle 21: Vergleich zwischen Validierungsprozess und Pilotprojekt

Kriterien/Kennzahlen	Ausprägung Validierungsprozess	Ausprägung Pilotprojekt
Anzahl der verwendeten Software-Programme (CAD/CAM)	6	9
Mitarbeiter (inkl. Produktion)	7	15
Diversität der Datenformate	step, stl	dxf, step, stl, eagle, xlsx
Hilfs- und Sekundärkomponente	keine	2x Werkzeuge aus Kunststoffen, 2 Halterungen aus Kunststoff
Fehlerhafte Bauteile	3	17
WQ	0,85	0,71

7 Diskussion

Die Diskussion beinhaltet die Interpretation, die Beurteilung und die Einschränkungen der Ergebnisse dieser Arbeit. In Anlehnung an Belcher [233] kann die Struktur und das Vorgehen einer Diskussion in drei Schritte gegliedert werden:

1. Ergebnisse und entwickelter PEP werden interpretiert und erläutert.
2. Theoretische und praktische Implikationen werden beschrieben.
3. Einschränkungen (Limitations) werden aufgezeigt.

Der PEP für iMST (siehe Abbildung 104) ist die Implikation der Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien. Die Diskussion soll diese Implikation beschreiben, indem der PEP für iMST genauer erläutert wird.

In Anbetracht der durchgeführten Literaturanalyse lässt sich vorerst sagen, dass bislang kein ganzheitlicher PEP für individualisierte Produkte identifiziert werden konnte. Frühere Forschungsarbeiten fokussierten primär auf die Fertigungsprozesse und die Erfassung von Kundenanforderungen im Kontext der Entwicklung von individualisierten Produkten [47], [49], [66], [179]. Ebenso konnte kein PEP für iMST identifiziert werden. Durch bereits etablierte PEP, wie das V-Modell für die MST, hat sich jedoch ein Rahmen für diese Arbeit ergeben. Das V-Modell für MST von Watty [21] hat nicht den Anspruch, die Charakteristiken und erforderlichen Schritte für die Entwicklung und Herstellung von iMST zu berücksichtigen. Folglich konnten auch Lücken und Defizite identifiziert werden, wodurch ein Handlungsbedarf identifiziert wurde. Ein Defizit ist u. a., dass eine gründliche Eigenschaftsabsicherung, bspw. durch die stufenweisen Musterteile (A-D Teile), nicht möglich bzw. nicht effizient für iMST wäre. Dies gilt auch für die klassischen PEP, welche auffordern, einen Prototyp zu fertigen und diesen zu bemustern. Für iMST wären diese Schritte nicht wirtschaftlich. Des Weiteren werden in der Literatur kaum Methoden und Werkzeuge empfohlen, welche die effiziente und zuverlässige Herstellung von iMST fördern. Um die Herausforderungen und Lücken auch praktisch darzulegen, wurde ein Pilotprojekt umgesetzt. Mit diesem konnten sechs praktische Optimierungsansätze identifiziert werden. Darüber hinaus ermöglichte das Pilotprojekt, erste konkrete und detaillierte Prozessschritte zu sammeln und zu analysieren. Um der Generalisierbarkeit des PEP für iMST gerecht zu werden, wurde davor eine anwendungsbasierte Methodik erstellt, welche für iMST Kontextfaktoren bzw. Anforderungen analysiert. Mit dieser Methodik konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen innerhalb der

iMST divers und heterogen sind. Die Anforderungen, unabhängig von ihrer Wertigkeit, sind Kosten, Zuverlässigkeit, Fertigungszeit und Losgröße. Es gilt also, diese dem PEP zuzuordnen. Daher war es im nächsten Schritt wichtig, PEP aus verschiedenen Unternehmen und Branchen zu kennen. Folglich konnte diese auf einer abstrakten Ebene gesammelt werden.

Im ersten Prozessschritt des PEP zeigte sich, dass viele Unternehmen mit der Sammlung von Ideen und Anforderungen beginnen. Bekanntlich beginnen auch die klassischen PEP derart. Betrachtet man jedoch die Aktivitäten innerhalb dieser Phase genauer, so wird deutlich, dass es aufgrund der Individualisierung Unterschiede gibt. Die Ideenphase wird bspw. nicht mehr dazu genutzt, um neue Produktideen zu generieren. Vielmehr wird die Ideenphase verwendet, um technische Probleme zu lösen, da bei iMST die Produktidee und der Rahmen des iMST als eine Komponente eines Gesamtprodukts bereits bekannt ist. Als eine mögliche Methode innerhalb dieser Phase wäre somit das Brainstorming zu nennen. Grundsätzlich effektivere Problemlösungsmethoden für technische Produkte, wie etwa TRIZ und Design Thinking, wären impraktikabel und somit nicht effizient, da der zeitliche Aufwand zu groß wäre. Daher wurde oft mit einfachen Methoden wie Brainstorming agiert. Die Frage bleibt offen, ob eine andere Methode eher geeignet wäre. Der dargestellte PEP schlägt für diese Phase eine kombinatorische Methode vor, indem die Anforderungsanalyse und Ideenfindung vereint eingesetzt werden. Dass Prozesse innerhalb der Anforderungsanalyse förderlich zur Lösung von technischen Problemen sein können, zeigt bspw. die Funktionsanalyse, welche ein Teilprozess der Anforderungsanalyse ist [234]–[236]. Je nach Anforderung des Anwendungsfalles kann diese Phase mit Methoden wie RE und Funktionsanalyse umfangreicher oder mit einfachen Anforderungslisten und einer Brainstorming-Methode schlanker realisiert werden. Als nächster Schritt wird das Produktdesign vorgeschlagen, wobei hier anzumerken ist, dass das Produktdesign schon vor der ersten Phase vorhanden sein kann. Daher wurde im PEP eine „Box-Plot“-ähnliche Darstellung gewählt, die diesen Fall repräsentieren soll. Damit ist nicht gemeint, dass das iMST vollumfänglich mit allen Komponenten und Funktionalitäten entworfen wurde, sondern vielmehr die (mechanische) Grundgeometrie, da sich diese oft durch die individuellen Anforderungen des Kunden ergibt.³⁵ Somit kann es eben sein, dass ein Kunde das Produkt bereits entworfen hat. Dieser Punkt ist deshalb wichtig zu wissen, da damit neue Ansätze einhergehen können. Bspw. wäre dann die Implementierung und Verwendung eines Produktkonfigurators geeignet. Die Ergebnisse aus den Experteninterviews zeigen, dass in dieser Phase die Absicherung von Grenzen und Freiräumen am häufigsten umgesetzt wird. Die

³⁵ Siehe als Beispiel den Anwendungsfall im Kapitel 4.1.1.

vorgeschlagene Methodik empfiehlt daher diese Maßnahmen vor allem dann, wenn die Qualität und Kosten sichergestellt werden sollen. Zudem wird hier auch die Nutzung eines Tools mit MCAD und ECAD (*Co-Design*) empfohlen. Die Validierung im Kapitel 6.4 zeigt, dass mit dem *Co-Design*-Ansatz erheblich Zeit gespart werden kann und die Kommunikation mit den Partnern gefördert wird. Jedoch gibt es noch keine vollständig ausgereifte Software, wodurch vermutlich viele Unternehmen noch zurückhaltend bei der Verwendung dieser Softwarelösung sind. Tatsächlich ist die Softwarelösung noch nicht voll funktionsfähig bzw. anwenderfreundlich, wie auch aus dem Kapitel 5.4.2 ersichtlich wird. Eine weitere Maßnahme innerhalb der Produktdesign-Phase ist die *Co-Creation*. Damit ist gemeint, dass beim Entwurf des Bauteils möglichst alle Stakeholder involviert sind. Es hat sich gezeigt, dass dieser Ansatz unterschiedliche Zwecke erfüllen kann. Zum einen wird er als Risiko- und Verantwortungsminimierungsmaßnahme verwendet, da der Kunde durchgehend involviert war und somit die Verantwortung am Ergebnis mitträgt. Zum anderen können durch eine größere Vielfalt der Entwicklungsmitarbeiter, bspw. Mitarbeiter mit diversem Hintergrundwissen, unnötige Kosten vermieden werden [237]. Die Gründe dafür könnten sein, dass mit einer größeren Gruppe produktive und effiziente Vorschläge einhergehen und das frühzeitige Erkennen von Fehlern wahrscheinlicher ist. Allerdings erweisen sich diese scheinbar einfachen Maßnahmen in der Praxis häufig als komplex und herausfordernd, was durch die Arbeit von Sanders und Stappers [238] bestätigt wird. Das kann daran liegen, dass es grundsätzlich aufwendig und zeitlich schwierig ist, eine größere Gruppe zusammenzubringen. Für einen schnelleren PEP ist dies daher nicht zu empfehlen. Des Weiteren werden in dieser Phase die unterschiedlichen Domänen zusammengeführt. Für iMST sind dies Mechanik, Elektronik und Informatik. Für die Informatik versteht sich das Produktdesign als eine konzeptionelle Darstellung der Architektur bzw. des Systementwurfs. Abhängig vom Produktdesign sind auch die zu verwendenden Fertigungsverfahren zu berücksichtigen. Insbesondere für iMST spielen diese eine entscheidende Rolle. Daher sollte das Produktdesign unter Berücksichtigung der möglichen Technologien erstellt werden. Da für Mikrosysteme generell die Technologieauswahl eine Kernaktivität innerhalb der Produktentwicklung darstellt [21], [70], [80], [82], [83], [97], kann ein systematisches und effektives Werkzeug ausschlaggebend für den Produkterfolg sein. Folglich sollte spätestens in dieser Phase KETTS für die Technologieauswahl verwendet werden. Im Kapitel 5.4.3 konnten die Vorteile von KETTS im Kontext der Technologieauswahl gezeigt werden. Der Mehrwert von KETTS bestätigt sich verstärkt, sobald die Anzahl der Anforderungen an das iMST steigt. Die größte Herausforderung für die Nutzung von KETTS besteht darin, dass das Tool eine gründliche

Datenstruktur und große Datenvielfalt voraussetzt. Der wahrscheinlich größte Nachteil ist, dass die Datensammlung mit einem sehr hohen Initialaufwand verbunden ist. Die Datensammlung und –strukturierung kann als ein separates Projekt gesehen werden. Bspw. gibt es für diesen Zweck, also die Datengenerierung von Anforderungen und Restriktionen von Fertigungsverfahren für Mikrosysteme, das EU-weite Projekt „Assembly and Connection Technology for 3D Plastic Circuit Carrier (ACT 3D)“. Dass die Nutzung von sogenannten Expertentools wie KETTS notwendig ist, zeigen auch die Ergebnisse des Interviews. Dabei wird für eine erfolgreiche Herstellung von iMST bzw. auch individualisierten Produkten häufig auf die Erfahrungen von Experten gesetzt. Derartige Tools wie KETTS können den Experten erheblich unterstützen. Da eine häufig eingesetzte Maßnahme das Vorab-Testen von Testteilen ist, um eine valide Voraussage über die Qualität des iMST zu treffen, kann KETTS genauso die Sammlung dieser Daten ermöglichen. Wurden geeignete Fertigungsverfahren und Technologien gefunden, kann eine zielführende DfM-Methode realisiert werden. Die DfM-Methode wäre wichtig für die nächste Phase der Machbarkeitsanalyse. Durch die klar definierte Verwendung einer Technologie können Gestaltungsregeln für eine effizientere Herstellung abgeleitet werden. Dabei hat sich eben gezeigt, dass Anpassungen am Bauteil, wie die Berücksichtigung von Gestaltungsregeln, nicht zwingend den Anforderungen widersprechen müssen. Die Beachtung der Gestaltungsregeln kann eine effiziente und valide Herstellung sicherstellen [171]. Insbesondere dieser Punkt kann während der Entwicklung vernachlässigt werden, da aufgrund der Individualität von einer nicht veränderbaren Geometrie bzw. Anforderung ausgegangen wird. Für die Phase der Machbarkeit ist in bestimmten Fällen die Durchführung von Simulationen zu empfehlen. Diese erwiesen sich in dieser Arbeit als durchaus sinnvoll. Jedoch wird der Aufwand von Simulationen oft unterschätzt, obwohl dieser im Vergleich zum Gesamtaufwand des Produkts relativ hoch ist [239]. Daher sollten Simulationen für iMST aus Kosten- und Zeitgründen eher vermieden werden. Handelt es sich um qualitätssensible Produkte, so ist der Einsatz von Simulationenmethoden vermutlich unumgänglich. Für iMST müsste spätestens in dieser Phase (Machbarkeitsanalyse) eine RBV durchgeführt werden. Eine RBV kann mit klassischen statistischen Verfahren, wie sie aus der Validierung von Medizinprodukten bekannt sind, durchgeführt werden. Diese statistischen Verfahren benötigen Daten, die durch Muster- bzw. Testbauteile generiert werden. Dies widerspricht jedoch dem Anspruch des FTR-Ansatzes. Daher sollten derartige Stichproben möglichst vermieden werden. Eine Möglichkeit wäre die Durchführung einer Risikoanalyse und die Absicherung von ausgewählten Bereichen im Produkt. Um vorab schon Risiken zu vermeiden, ist die Qualität der Maßnahme (Absicherung von Freiräumen und Grenzen)

entscheidend, auch wenn diese ebenfalls einen hohen Initialaufwand erfordert. Nach derartigen Analysen kann nun das finale Bauteil entworfen werden. Hierfür macht es durchaus Sinn, erneut die Anpassung mit einem M/ECAD-Tool durchzuführen, da so vor allem mögliche negative Auswirkungen, die sich bspw. durch die Anpassung eines Bauteils ergeben, vor der tatsächlichen Herstellung erkannt werden können. Mit der Anpassung wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass bestimmte Anforderungen nicht mehr eingehalten werden. Daher empfiehlt sich in dieser Phase ein Vergleich mit den Anforderungen. Da diese Phase die letzte Phase vor der Produktion ist, wird eine erneute Simulation bei iMST mit hohen Qualitätsansprüchen empfohlen. Anschließend kann der Fertigungsprozess freigegeben werden. Hier zeigt sich aus den Studien, dass moderne Methoden wie das *In-Process Monitoring* durchaus Anwendung finden. Jedoch muss beachtet werden, dass auch hier der Aufwand, der davor für die Implementierung eines robusten Monitorings betrieben wird, extrem hoch ist. Folglich empfiehlt sich, diese Methode nur dann in PEP zu etablieren, wenn das iMST hohe Qualitätsansprüche erfordert. Das *In-Process-Monitoring* gehört zu den wenigen Methoden, die es ermöglichen, sich einer Replizierbarkeit analytisch anzunähern [240]. Daher sollte in dieser Phase ein grundlegendes Ziel sein, die Qualitätsprüfung derart zu führen, dass die Daten kompatibel mit dem wissensbasierten System KETTS sind. Der letzte Prozessschritt, der für iMST selten Anwendung finden sollte, jedoch eine effektive Maßnahme sein kann, ist die Nachbearbeitung (*Post-Processing*). Jedoch sollte das *Post-Processing* vermieden werden und wird daher nicht als ein Hauptelement in den PEP eingebettet.

Theoretische Implikation:

Die Literatur adressiert u. a. PEP für die MST, MID-Technologie oder digitale Fertigungsverfahren [21], [49], [70], [104], [133], [192]. Es konnte gezeigt werden, dass die bisherigen Ansätze und Modelle aus der Literatur für die Herstellung von iMST aus einer ganzheitlichen Betrachtung des PEP nicht ausreichend sind. Im Kontext der Individualisierung gibt es zwar einzelne Methoden und Werkzeuge [57], [64]–[66], [178], jedoch wurden diese nicht in einen PEP eingebettet betrachtet. Diese Arbeit zeigt mit dem PEP für iMST einen ersten Ansatz auf und verknüpft bekannte und neue Methoden in dem Prozess. Mit den durchgeführten Studien konnten auch Aussagen und Thesen aus der Literatur bestätigt werden. Zu diesen gehören:

- Erfahrung von Experten im Unternehmen vermindern Änderungskosten [188].

- Eine Überwachung des Herstellungsprozesses ermöglicht Voraussagen über die Produktqualität [137].
- Erweiterung des Wissensmanagements in der Produktion führt zu validen Voraussagen über die Machbarkeit [178], [179].
- Absicherung von Grenzen und Freiräumen führt zu Absicherung der Produktqualität [137].

Aus diesem kann u. a. auch entnommen werden, welche theoretischen Methoden für individuelle Anwendungen besonders geeignet sind.

Aus der Literatur kann zudem entnommen, wie Kontextfaktoren analysiert werden können [128]. Jedoch hat dies mehr den Zweck, in Unternehmen Kontextfaktoren innerhalb der eigenen Situation zu analysieren. Dadurch ist eine Vorgehensweise für die Wissenschaft, die den Anspruch erhebt, mehrere und gleichzeitig spezifischere Fälle zu berücksichtigen, nicht vollumfänglich gegeben. Die anwendungsbasierte Methode zur Identifikation von Kontextfaktoren im Kapitel 4 adressiert u. a. diese Lücke. Da die Individualisierung unterschiedliche Anforderungen haben kann, konnten diese mit der Methodik ebenfalls identifiziert werden, wodurch ein flexibler und kontextbasierter PEP gebildet werden kann.

Ein weiterer neuer Ansatz ist, dass die Effizienzsteigerung des PEP mit der Zeit ein grundlegendes Element in der Methodik ist. Der PEP beschreibt in der Theorie also nicht nur, wie ein iMST erfolgreich eingeführt werden kann, sondern auch, wie die Produktentwicklung mit der weiteren Entwicklung verbessert werden kann. Der vorgeschlagene PEP stellt einen ersten gesamtheitlichen Ansatz für die Produkte dar, die hohe Qualitätsansprüche haben sowie effizient hergestellt werden müssen, um bspw. dem FTR-Ansatz gerecht zu werden. Zusammenfassend weist dieser PEP Merkmale aus der Wissenschaft der Produktentwicklung auf und erweitert diese Merkmale wie folgt:

- **Robustheit:** Der PEP ist widerstandsfähig gegen Störungen und unvorhergesehene Ereignisse. Er kann auch in schwierigen Situationen oder bei unvorhergesehenen Problemen effektiv eingesetzt werden und qualitativ hochwertige Produkte liefern.
- **Effizienz:** Der PEP zeichnet sich durch eine optimale Nutzung von Ressourcen wie Zeit und Kosten aus. Dies führt zu einer schnelleren Markteinführung und zu Kosteneinsparungen.

- **Flexibilität:** Der PEP kann sich an veränderte Marktbedingungen, Kundenanforderungen oder technologische Innovationen anpassen. Dies ermöglicht es, kontinuierlich verbesserte Produkte zu entwickeln und auf Wettbewerbsdruck zu reagieren.
- **Zusammenarbeit und Kundenorientierung:** Der PEP fördert die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen verschiedenen Abteilungen und Stakeholdern, um Synergien zu nutzen und effektive Lösungen für gemeinsame Probleme zu finden.
- **Reproduzierbarkeit:** Der PEP ist reproduzierbar, d. h., er liefert konsistente und vorhersagbare Ergebnisse bei der Produktentwicklung. Dies ist wichtig für die Qualitätssicherung und die Einhaltung von Branchenstandards.

Folglich trägt diese Arbeit dazu bei, dass die Blackbox–Theorie innerhalb der PEP [35], [36] nach und nach transparenter wird. Durch modernste Messsysteme kann bereits ein Blick in die Blackbox geworfen werden. So wurde mit der Neuentwicklung von KETTS eine weitere Möglichkeit aufgezeigt, wie systematisch Technologien und Fertigungsverfahren identifiziert werden und Wissen weiter aufgebaut werden kann.

Praktische Implikation:

Für Unternehmen und/oder Produktmanager, die iMST entwickeln und herstellen, empfiehlt sich, ein wissensbasiertes System in ihren PEP als einen festen Bestandteil zu integrieren. Mit der steigenden Anwendung von digitalen Prozessketten müssen sich Unternehmen Gedanken machen, wie sie ihre Prozesse und Produkte validieren können - ohne diese tatsächlich hergestellt zu haben, insbesondere im Falle der Medizintechnik, da hier bspw. vom MDR eine Validierung verlangt wird. Wie diese Validierung konkret ablaufen soll, wird in den Regularien nicht oder nur unvollständig beschrieben. Diese Arbeit bietet daher für Unternehmen einen möglichen Lösungsansatz und Anhaltspunkt, um iMST systematisch und regelkonform auf den Markt zu bringen. Für alle produzierenden Unternehmen, deren Prototypen sehr kostenintensiv sind, kann der vorgeschlagene PEP auch als Inspiration dienen. Darüber hinaus können die Unternehmen aus den durchgeführten Interviews erkennen, welche konkreten Anforderungen, Tools und Methoden verwendet werden, die für einen effizienten PEP sprechen. Somit kann diese Methodik auch als ein möglicher Methodenbaukasten für individualisierte Produkte generell verwendet werden. Durch die Verwendung und den Test des M/ECAD von Altium können Schaltungsentwickler ohne großen Aufwand erkennen, welche Stärken und Schwächen das *Co-Design*-Tool hat. Dabei wird dieses Tool grundsätzlich für iMST empfohlen, da dadurch

die Heterogenität der Dateien und Softwarelösungen reduziert wird. Diese Heterogenität kann als Unterbrecher der Prozesskette gesehen werden und mit einer Reduzierung der Datenformate und Softwarelösungen eine durchgängig digitale Prozesskette ermöglicht werden, welche wiederum die Effizienz der Produktentwicklung steigert. Es konnte auch gezeigt werden, dass mit einem wissensbasierten Tool, wie das in der Arbeit vorgestellte und entwickelte KETTS, Kosten und Ressourcen eingespart werden können. Insbesondere dann, wenn die Anzahl der Anforderungen steigt, kann das Tool bei Entscheidungssituationen für die optimale Materialauswahl bzw. die Identifikation von Fertigungsverfahren nutzenbringend sein. Insbesondere für Technologiemanager bietet KETTS eine Möglichkeit, um Technologien anforderungsspezifisch zu strukturieren und zu identifizieren. Wenn man das Konzept von KETTS auf die Materialauswahl anwendet, kann man es auch im Hinblick auf Nachhaltigkeit nutzen. Folglich bietet der PEP eine praktische Anleitung zur systematischen Anwendung prozessbezogenen Erfahrungswissens. Die erarbeitete Methodik kann in der Praxis als Instrument zur Gegenüberstellung mit bestehenden Prozessen genutzt werden. Aus dieser Gegenüberstellung kann ein integrierter und kombinierter PEP hervorgehen, der die Stärken beider Prozesse vereint. Somit bleiben die unternehmensspezifischen Aspekte nicht unberücksichtigt.

Einschränkungen

Obwohl wichtige Aspekte von iMST detailliert betrachtet wurden, gibt es in dieser Untersuchung Einschränkungen, die im Folgenden erläutert werden. Zunächst ist zu erwähnen, dass der PEP-Ansatz nicht vollständig validiert wurde, was seine Anwendbarkeit in verschiedenen Anwendungsfällen einschränkt. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten durch die Validierung des vorgeschlagenen PEP einen Beitrag für die Theorie und Praxis leisten. Da einer der größten Anwendungsbereiche von individualisierten Produkten in der Medizintechnik liegt und die Branche strengen gesetzlichen Vorschriften unterliegt, wäre eine genaue Betrachtung bzw. auch eine Zusammenarbeit mit der ISO sinnvoll, um sicherzustellen, dass der Prozess allen gesetzlichen Anforderungen entspricht. Bspw. beschreibt die ISO 13485 die Anforderungen an additive Fertigungsverfahren und Arbeitsabläufe in Produktionsstätten. Diese wurden in der Arbeit nicht vertieft berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es weitere bekannte Methoden, die universell für alle Entwicklungsprozesse anwendbar sind - aber nicht alle konnten berücksichtigt und bewertet werden. Zum Beispiel können FMEA und FTA so modifiziert werden, dass ein akzeptabler Validierungsprozess entsteht. Diese Ansätze wurden jedoch in dieser Arbeit nicht vertieft behandelt. Schließlich gibt es weitere Aspekte wie die

Unternehmensorganisation, Mitarbeiter und externe Einflüsse, die den PEP beeinflussen und somit berücksichtigt werden müssen. Es ist nicht ausreichend, sich nur auf Prozesse und Methoden zu fokussieren. Darüber hinaus konnten nicht alle Technologien und Fertigungsverfahren genauer betrachtet werden. Eine weitere Einschränkung ist die Aussagekraft der Validierung. Aufgrund der technischen Gegebenheiten konnte die vollumfänglich Nutzung des vorgeschlagenen PEP nicht umgesetzt werden. Das heißt, es konnten nicht alle Methoden und Werkzeuge für die Validierung eingesetzt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es gewesen, eine ganzheitliche Produktentwicklungsmethodik für iMST zu entwickeln. Diese soll dem Anwender in der Praxis eine strukturierte Vorgehensweise und einen Methodenkasten zur Verfügung stellen, um effiziente iMST herzustellen. Für die Forschung und Wissenschaft soll sie neue Ansätze für die Produktentwicklung liefern, um die einzelnen Schritte und Aktivitäten besser zu verstehen. Zur Erreichung des Ziels wurde die Literatur herangezogen und bewertet. So konnten Lücken und Defizite identifiziert werden. Diese sind unter anderem, dass vorhandene PEP nicht auf Eigenschaften von iMST abzielen und dadurch eine ineffiziente Vorgehensweise bei der Anwendung beschreiben. Es stellte sich insbesondere die Frage, wie der FTR-Ansatz umgesetzt werden kann. Dafür mangelte es an einer Methodik, welche Methoden, Werkzeuge und Prozesse kombiniert, also ganzheitlich, für die Entstehung eines iMST betrachtet. Zur Erreichung des Ziels wurden folgende Kernschritte umgesetzt:

1. Systematische Sammlung und Bewertung von Anwendungsfällen zur Identifikation von Kontextfaktoren und Anforderungen
2. Ist-Analyse anhand eines Pilotprojekt zur Herstellung eines iMST
3. Interview von 7 Experten für die Datensammlung von möglichen Prozessen und Methoden aus der Praxis
4. Entwicklung von neuen Werkzeugen zur Unterstützung der Entwicklung von iMST
5. Validierung der vorgeschlagenen Methodik

Diese Schritte konnten folgende Hauptergebnisse und Erkenntnisse generieren, die zusammengefasst und abstrakt dargestellt sind:

1. Hohe Heterogenität von Kontextfaktoren bzw. Anforderungen innerhalb der Entwicklung und Herstellung von iMST
2. Viele Korrekturschleifen und hohe Fehlerkosten im Vergleich zu standardisierten Mikrosystemen
3. Starke Kausalität zwischen Erfahrungs- und Prozesswissen der Mitarbeiter und der effizienten Entwicklung von iMST
4. Wissensbasierte Werkzeuge sind für iMST möglich und geeignet.
5. Die Verwendung von ausgewählten Methoden und Werkzeugen sowie die dazugehörigen Prozesse führen zur Effizienzsteigerung innerhalb der Entwicklung und Herstellung von iMST.

Die entwickelte Methodik stellt ebenso einen Rahmen dar, um individualisierte Produkte für die nötige Zertifizierung innerhalb der Medizintechnik qualifizieren zu lassen. Folglich zeigt diese Methodik, wie der FTR-Ansatz auch für komplexe Produkte umgesetzt werden kann.

Ausblick

Weitere Forschungsansätze könnten die Weiterentwicklung und Fokussierung auf spezielle Methoden innerhalb der vorgeschlagenen Methodik sein. So hat das *In-Process-Monitoring* ein sehr großes Potenzial, Fehler während der Herstellung zu entdecken. Darüber hinaus könnte dies mit Methoden aus der KI verknüpft werden. Eine weitere Methode zur Entwicklungsunterstützung von iMST sind statistische Verfahren. Auch hier könnte der Fokus auf die einzelnen statistischen Methoden gelegt werden, sodass auf die Validierung von medizintechnischen Produkten spezifischer eingegangen wird. Das neuentwickelte Tool, KETTS, kann mittels KI-Algorithmen erweitert werden. Die Implementierung des KETTS mit KI kann durch die Anwendung von Supervised Learning-Algorithmen erfolgen, da hier von „gelabelten“ Daten gesprochen werden kann. Hierbei können die gestellten Anforderungen (Input-Variablen) als Eingangsgrößen definiert werden, während die empfohlenen Fertigungsverfahren (Output-Variablen) als Ausgangsgröße dienen, die die KI explizieren soll. Das Ziel ist, eine KI-basierte Empfehlung von Fertigungsverfahren zu erhalten, die durch die Eingabe von neuen Anforderungen generiert werden. Die Supervised Learning-Algorithmen

erlernen eine Funktion $f(x)$, die anhand der Anforderungen eine Vorhersage für das geeignete Fertigungsverfahren erstellt. Dies kann vereinfacht so dargestellt werden:

$$f(\text{Input=Anforderungen}) = \sum w_i * x_i$$

wobei w_i die Gewichte und x_i die Input-Variablen sind.

Die Gewichte w_i werden durch das Training des Supervised Learning-Algorithmus angepasst, um eine möglichst genaue Vorhersage für das empfohlene Fertigungsverfahren zu erzielen.³⁶ Um diese Funktion zu trainieren, müssen größere Datensätze von gelabelten Beispielen von Input-Variablen und den entsprechenden empfohlenen Fertigungsverfahren verwendet werden. Sobald die Funktion trainiert ist, kann sie verwendet werden, um Vorhersagen für neue Datensätze von Input-Variablen zu treffen und damit empfohlene Fertigungsverfahren auszugeben.

³⁶ Siehe hierzu bspw. den Iterative Dichotomiser 3 (ID3)-Algorithmus, welcher als eine mögliche KI-Methode zur Entscheidungsfindung dient.

Literaturverzeichnis

- [1] “Global MEMS market revenues by industry 2014-2024,” Statista. Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/796333/worldwide-mems-market-revenues-by-revenue/>
- [2] M. R. F. <https://www.marketresearchfuture.com>, “Markttrends und Prognosen für MEMS und Sensoren bis 2030 | MEMS Market.” Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <https://www.marketresearchfuture.com/de/reports/mems-sensors-market-1059>
- [3] E. Barraud, “Ein neuartiges Implantat zur Behandlung von Lähmungen,” Feb. 2022, Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://actu.epfl.ch/news/ein-neuartiges-implantat-zur-behandlung-von-lahmun/>
- [4] “A European strategy for Key Enabling Technologies – A bridge to growth and jobs.” Jun. 26, 2012. Accessed: Jul. 19, 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0341:FIN:EN:PDF>
- [5] “A Stronger European Industry for Growth and Economic Recovery.” Oct. 10, 2012. Accessed: Jul. 19, 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0582:FIN:EN:PDF>
- [6] T. Greshake, “A clear-cut trajectory towards a batch size of 1 — just not in the automotive industry - Industry 4.0 Index,” Stauf. Accessed: Mar. 29, 2022. [Online]. Available: <https://en.staufen.ag/news/industry-4-0-index-a-clear-cut-trajectory-towards-a-batch-size-of-1-just-not-in-the-automotive-industry/>
- [7] J. Gausemeier and Gausemeier-Dumitrescu-Rammig-Schäfer-Trächtler, Eds., *Entwurf mechatronischer Systeme: Grundlagen, Methoden und Werkzeuge, Adaption, Selbstoptimierung und Verlässlichkeit, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung*; 9. Paderborner Workshop Entwurf Mechatronischer Systeme, 18 und 19. April 2013, Heinz Nixdorf MuseumsForum ; [unter dem Dach der Veranstaltung Wissenschaftsforum 2013 - Intelligente Technische Systeme]. in HNI-Verlagsschriftenreihe, no. 310. Paderborn: Univ., Heinz Nixdorf Inst, 2013.
- [8] U. Lindemann, Ed., *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser, 2016.
- [9] P. Heisig *et al.*, “Challenges and future fields of research for modelling and management of engineering processes,” Jan. 2009.
- [10] T. R. Browning, J. J. Deyst, S. D. Eppinger, and D. E. Whitney, “Adding value in product development by creating information and reducing risk,” *IEEE Trans. Eng. Manage.*, vol. 49, no. 4, pp. 443–458, Nov. 2002, doi: 10.1109/TEM.2002.806710.
- [11] K. Ehrlenspiel, *Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozeßorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*. München Wien: Hanser, 1995.

- [12] K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, M. Mörtl, and U. Lindemann, *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*, 8. Auflage. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2020.
- [13] B. von Regius, *Qualität in der Produktentwicklung: vom Kundenwunsch bis zum fehlerfreien Produkt*. München: Hanser, 2006.
- [14] D. Maffin, “Engineering Design Models: Context, theory and practice,” *Journal of Engineering Design*, vol. 9, no. 4, pp. 315–327, Dec. 1998, doi: 10.1080/095448298261462.
- [15] C. Hollauer and U. Lindemann, “Design Process Tailoring: A Review and Perspective on the Literature,” in *Research into Design for Communities, Volume 1*, vol. 65, A. Chakrabarti and D. Chakrabarti, Eds., in Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 65. , Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 609–618. doi: 10.1007/978-981-10-3518-0_53.
- [16] H. Timinger, M. Schmidtner, and F. Reiche, “A Framework for the Construction and Tailoring of Engineering Development Process Models,” *IEEE Trans. Eng. Manage.*, pp. 1–22, 2022, doi: 10.1109/TEM.2021.3132699.
- [17] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product design and development*, 5th ed. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2012.
- [18] D. C. Wynn and P. J. Clarkson, “Process models in design and development,” *Res Eng Design*, vol. 29, no. 2, pp. 161–202, Apr. 2018, doi: 10.1007/s00163-017-0262-7.
- [19] S. Brinkkemper, “Method engineering: engineering of information systems development methods and tools,” *Information and Software Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 275–280, Jan. 1996, doi: 10.1016/0950-5849(95)01059-9.
- [20] B. Bender and M. Steven, “Erfolgsindikatoren in der technischen Produktentwicklung Die Autorinnen danken zwei anonymen Gutachtern, deren wertvolle Kommentare erheblich zur Verbesserung des Beitrags beigetragen haben.,” *Die Unternehmung*, vol. 69, no. 4, pp. 354–370, 2015, doi: 10.5771/0042-059X-2015-4-354.
- [21] R. Watty, *Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik*. in Bericht / KTD, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, no. 533. Stuttgart: KTD, 2006.
- [22] M. Huff, *Process Variations in Microsystems Manufacturing*. Springer Nature, 2020.
- [23] G. Lanza, T. Blank, and B. Haefner, “Design for Testability for Micro-mechatronic Systems,” in *Smart Product Engineering*, M. Abramovici and R. Stark, Eds., in Lecture Notes in Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 283–292. doi: 10.1007/978-3-642-30817-8_28.
- [24] F. Michel and W. Ehrfeld, “Mechatronic micro devices,” in *MHS’99. Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (Cat. No.99TH8478)*, Nagoya, Japan: IEEE, 1999, pp. 27–34. doi: 10.1109/MHS.1999.819978.
- [25] “Duden | Prozess | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft.” Accessed: Nov. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Prozess>

- [26] W. Engeln, *Methoden der Produktentwicklung*. in Skripten Automatisierungstechnik. München: Oldenbourg-Industrieverlag, 2006.
- [27] T. H. Davenport, *Process innovation: reengineering work through information technology*. Boston, Mass: Harvard Business School Press, 1993.
- [28] F.-L. Krause, H.-J. Franke, and J. Gausemeier, Eds., *Innovationspotenziale in der Produktentwicklung*, 1. Aufl. München: Hanser, 2007.
- [29] M. Kreimeyer and U. Lindemann, *Complexity metrics in engineering design: managing the structure of design processes*. Heidelberg ; New York: Springer, 2011.
- [30] W. Eversheim and G. Schuh, Eds., *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. in VDI. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [31] V. Hubka, *Principles of Engineering Design*. 1982.
- [32] J. M. K. Roelofsen, *Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen*, 1. Aufl. in Produktentwicklung. München: Hut, 2011.
- [33] P. M. Bican and A. Brem, “Managing innovation performance: Results from an industry-spanning explorative study on R&D key measures,” *Creat Innov Manage*, vol. 29, no. 2, pp. 268–291, Jun. 2020, doi: 10.1111/caim.12370.
- [34] M. Gaitanides, Ed., *Prozeßmanagement: Konzepte, Umsetzungen und Erfahrungen des Reengineering*. München: Hanser, 1994.
- [35] E. Kirchner, *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-61762-5.
- [36] R. Dekkers, *Applied Systems Theory*, 2nd ed. 2017. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-57526-1.
- [37] E. Brauchlin and R. Heene, *Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik: eine Einführung*, 4., Vollst. überarb. Aufl. in Uni-Taschenbücher, no. 1738. Bern: Haupt, 1995.
- [38] VDI-Richtlinie 2217, “Datenverarbeitung in der Konstruktion - Begriffserläuterungen,” p. S. 19, 1979.
- [39] J. Steinschaden, “Entwicklung mechanischer Systeme,” in *Handbuch Produktentwicklung*, B. Schäppi, Ed., München Wien: Hanser, 2005.
- [40] U. Lindemann, *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-642-01423-9.
- [41] K. Ehrlenspiel and H. Meerkamm, *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 6th ed. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017. doi: 10.3139/9783446449084.

- [42] J. Schober, *Systematische Methoden Anwendung im dynamischen Qualitätsmanagement bei KMU*. in Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019.
- [43] C. Hales, *Analysis of the engineering design process in an industrial context*. Eastleigh, Hampshire: Gants Hill Publ, 1987.
- [44] V. Hubka and W. E. Eder, *Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge*. Cham: Springer International Publishing.
- [45] J. Gausemeier, Ed., *Kooperatives Produktengineering: ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens*. in HNI-Verlagsschriftenreihe, no. Bd. 79. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst, 2000.
- [46] J. P. Wulfsberg, T. Redlich, M. Moritz, and Helmut-Schmidt-Universität, Eds., 1. *Interdisziplinäre Konferenz zur Zukunft der Wertschöpfung: Konferenzband*. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr, Laboratorium Fertigungstechnik, 2016.
- [47] Y. Koren, M. Shpitalni, P. Gu, and S. J. Hu, “Product Design for Mass-Individualization,” *Procedia CIRP*, vol. 36, pp. 64–71, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.03.050.
- [48] Y. Wang, H.-S. Ma, J.-H. Yang, and K.-S. Wang, “Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production,” *Adv. Manuf.*, vol. 5, no. 4, pp. 311–320, Dec. 2017, doi: 10.1007/s40436-017-0204-7.
- [49] M. Ozdemir, J. Verlinden, and G. Cascini, “Design methodology for mass personalisation enabled by digital manufacturing,” *Des. Sci.*, vol. 8, p. e7, 2022, doi: 10.1017/dsj.2022.3.
- [50] S. M. Davis, *Future perfect*. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1987.
- [51] B. J. Pine, *Mass customization: the new frontier in business competition*. Boston, Mass: Harvard Business School Press, 1993.
- [52] M. Agrawal, T. V. Kumaresh, and G. A. Mercer, “The false promise of mass customization,” *The McKinsey Quarterly*, p. 71, 2001.
- [53] F. T. Piller and C. M. Stotko, “Mass customization: four approaches to deliver customized products and services with mass production efficiency,” in *IEEE International Engineering Management Conference*, Cambridge, UK: IEEE, 2002, pp. 773–778. doi: 10.1109/IEMC.2002.1038535.
- [54] D. M. Anderson, *Build-to-order & mass customization: the ultimate supply chain management and lean manufacturing strategy for low-cost on-demand production without forecasts or inventory*, Nachdr. Cambria, Calif: CIM Press, 2008.
- [55] T. Blecker and N. Abdelkafi, “Mass Customization: State-of-the-Art and Challenges,” in *Mass Customization: Challenges and Solutions*, vol. 87, T. Blecker and G. Friedrich, Eds., in International Series in Operations Research & Management Science, vol. 87., Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006, pp. 1–25. doi: 10.1007/0-387-32224-8_1.

- [56] F. T. Piller, “Observations on the present and future of mass customization,” *Int J Flex Manuf Syst*, vol. 19, no. 4, pp. 630–636, Dec. 2007, doi: 10.1007/s10696-008-9042-z.
- [57] U. Lindemann, R. Reichwald, and M. Zäh, Eds., *Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion*. in VDI-Buch. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [58] N. Arora *et al.*, “Putting one-to-one marketing to work: Personalization, customization, and choice,” *Mark Lett*, vol. 19, no. 3–4, pp. 305–321, Dec. 2008, doi: 10.1007/s11002-008-9056-z.
- [59] M. M. Tseng, R. J. Jiao, and C. Wang, “Design for mass personalization,” *CIRP Annals*, vol. 59, no. 1, pp. 175–178, 2010, doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.097.
- [60] F. D. Keskin, K. Ventura, H. Soyuer, and I. Kabasakal, “From mass customization to product personalization in automotive industry: potentials of industry 4.0,” *Pressacademia*, vol. 4, no. 3, pp. 244–250, Apr. 2017, doi: 10.17261/Pressacademia.2017.486.
- [61] J. Spallek and D. Krause, “Process Types of Customisation and Personalisation in Design for Additive Manufacturing Applied to Vascular Models,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 281–286, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.022.
- [62] R. Duray, P. T. Ward, G. W. Milligan, and W. L. Berry, “Approaches to mass customization: configurations and empirical validation,” *Journal of Operations Management*, vol. 18, no. 6, pp. 605–625, Nov. 2000, doi: 10.1016/S0272-6963(00)00043-7.
- [63] “Konfigurator - M&M’S Jetzt gestalten! | M&M’S.” Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.mms.com/de/de/configurator?method=load&customerType=B2C>
- [64] F. T. Piller and C. Stotko, Eds., *Mass Customization und Kundenintegration: Neue Wege zum innovativen Produkt; Begleitdienst zu diesem Buch: www.symposion.de/masscustom*. Düsseldorf: Symposion, 2003.
- [65] F. Jacob, *Produktindividualisierung, (in German)*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1995. doi: 10.1007/978-3-322-86558-8.
- [66] G. C. Baumberger, “Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten,” Dissertation, Universität München, München, 2007.
- [67] S. Büttgenbach, I. Constantinou, A. Dietzel, and M. Leester-Schädel, *Case Studies in Micromechatronics: From Systems to Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-61320-7.
- [68] K. Uchino, *Micromechatronics*, Second edition. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019.
- [69] G. Gerlach, Ed., *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*. in Hanser-Lehrbuch. München Wien: Hanser, 1997.

- [70] N. Schwesinger, C. Dehne, and F. Adler, *Lehrbuch Mikrosystemtechnik: Anwendungen, Grundlagen, Materialien und Herstellung von Mikrosystemen*. München: Oldenbourg, 2009.
- [71] U. Hilleringmann, *Mikrosystemtechnik*. Wiesbaden: Teubner, 2006. doi: 10.1007/978-3-8351-9022-1.
- [72] acatech — Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2011, Ed., *Cyber-Physical Systems*, vol. 11. in acatech Position, vol. 11. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-27567-8.
- [73] L. Stiny, *Aktive elektronische Bauelemente: Aufbau, Struktur, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-24752-2.
- [74] A. Zimmermann, “Einführung der Mikrotechnik,” Stuttgart, 2021. [Online]. Available: https://www.uni-stuttgart.de/studium/studienangebot_assets/medizintechnik_msc/pdf/Fachuebersichtsvortrag_Mikrosystemtechnik_Medizintechnik_2021.pdf
- [75] F. Völklein and T. Zetterer, *Einführung in die Mikrosystemtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2000. doi: 10.1007/978-3-322-91572-6.
- [76] W. Menz, J. Mohr, and O. Paul, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, Dritte, Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [77] W.-J. Fischer and M. Plötner, Eds., *Mikrosystemtechnik*, 1. Aufl. in Vogel-Fachbuch. Würzburg: Vogel, 2000.
- [78] U. Mescheder, *Mikrosystemtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2000. doi: 10.1007/978-3-322-94037-7.
- [79] J. Franke, J. Gausemeier, C. Goth, and R. Dumitrescu, Eds., *MID-Studie 2011: Markt- und Technologieanalyse*. Erlangen: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID, 2011.
- [80] J. Franke, Ed., *Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID): Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. doi: 10.3139/9781569905524.
- [81] G. Zickert, *Leiterplatten: Stromlaufplan, Layout und Fertigung: ein Lehrbuch für Einsteiger*, 2., Aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018.
- [82] J. Gausemeier and T. Bigl, Eds., *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. München Wien: Hanser, 2006.
- [83] C. Goth, *Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)*. in Fertigungstechnik Erlangen, no. 232. Bamberg: Meisenbach, 2013.

- [84] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID, Ed., *Technologie 3D-MID: räumliche elektronische Baugruppen ; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Hanser, 2004.
- [85] P. Eyerer, Ed., *Polymer Engineering: Technologien und Praxis ; mit 155 Tabellen*. in VDI. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [86] C. Jürgehake and Heinz Nixdorf Institut, “Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices) = Systematic for prototype-based development of mechatronic systems in the technology MID (Molded Interconnect Devices),” 2017.
- [87] K. Werum *et al.*, “Aerosol Jet Printing and Interconnection Technologies on Additive Manufactured Substrates,” *JMMP*, vol. 6, no. 5, p. 119, Oct. 2022, doi: 10.3390/jmmp6050119.
- [88] D. Grotian and M. D. Galus, *Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: vorbehandeln, beschichten, bedrucken, funktionalisieren, prüfen, 2., Aktualisierte Auflage*. München: Hanser, 2016.
- [89] A. Risse, *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. doi: 10.1007/978-3-8348-8312-4.
- [90] M. Lake, *Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung Vorbehandeln, Beschichten, Bedrucken, Funktionalisieren, Prüfen, 2. Auflage*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [91] “3D-MID Prozesse | HARTING Technology Group.” Accessed: Jan. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.harting.com/DE/de/loesungen/3d-mid-prozesse#Metallisierung>
- [92] R. A. Krüger and R. Ostholt, “Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitfähigen Struktur sowie ein mit diesem Verfahren hergestelltes Trägermaterial,” DE102014114986A1, Apr. 21, 2016 Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/DE102014114986A1/de>
- [93] N. Dambrowsky, S. Giselbrecht, and R. Truckenmüller, “Verfahren zur herstellung einer schicht auf einem formkörper,” EP1987707B1, Jul. 29, 2009 Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/EP1987707B1/de>
- [94] J. Bliedtner, H. Müller, and A. Barz, *Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele ; mit 110 Tabellen*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, 2013.
- [95] S. Beichter *et al.*, *Functionalized Sensor Packaging Based on Thermoset Injection Molding and Selective Metallization Technology*. in 2015 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC) date: 14-16 Sept. 2015. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.
- [96] T. Graf, *Laser: Grundlagen der Laserstrahlquellen ; mit 20 Übungen*, 1. Aufl. in Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.

- [97] F. Civelek, K.-P. Fritz, and A. Zimmermann, “Towards a Tailored Engineering Design Process for Individualized Micro-Mechatronic Systems with a Novel Case-Based Methodology,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, p. 7909, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11177909.
- [98] E. H. D. Ribeiro da Silva, J. Angelis, and E. P. de Lima, “In pursuit of Digital Manufacturing,” *Procedia Manufacturing*, vol. 28, pp. 63–69, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2018.12.011.
- [99] R. Anderhofstadt and M. Disselkamp, *Disruptiver 3D-Druck: neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten*. München: Hanser, 2022.
- [100] A. Gebhardt, *Generative Fertigungsverfahren: additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping, Tooling, Produktion*, 4., neu Bearb. u. erw. Aufl. München: Hanser, 2013.
- [101] M. Schmid, *Additive Fertigung mit selektivem Lasersintern (SLS): Prozess- und Werkstoffüberblick*. in Essentials. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [102] “VDI-Richtlinie 3405 - Additive Fertigungsverfahren,” pp. 1–3, 2015.
- [103] “DIN EN ISO 17296-2 - Prozessgrundlagen der Additiven Fertigung,” 2016.
- [104] A. Gebhardt, *Additive Fertigungsverfahren: additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 5., neu Bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2016.
- [105] M. Kumke, T. Vietor, and S. Wartzack, *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. in AutoUni – Schriftenreihe, no. Band 124. Wiesbaden: Springer, 2018.
- [106] H. Müller, S. Weser, Y. Liu, T. Guenther, W. Eberhardt, and A. Zimmermann, “Rapid-Prototyping von MID mittels generativer Verfahren,” presented at the Workshop: Vision to Products - MID and Beyond, Stuttgart, Oct. 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/282648268_Rapid-Prototyping_von_MID_mittels_generativer_Verfahren
- [107] P. Komarnicki, “A Review of Fused Deposition Modeling Process Models,” in *Proceedings of the 13th International Scientific Conference*, E. Rusiński and D. Pietrusiak, Eds., in Lecture Notes in Mechanical Engineering. , Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 241–247. doi: 10.1007/978-3-319-50938-9_25.
- [108] E. O. Olakanmi, R. F. Cochrane, and K. W. Dalgarno, “A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties,” *Progress in Materials Science*, vol. 74, pp. 401–477, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.
- [109] J. Huang, Q. Qin, and J. Wang, “A Review of Stereolithography: Processes and Systems,” *Processes*, vol. 8, no. 9, p. 1138, Sep. 2020, doi: 10.3390/pr8091138.
- [110] R. Chaudhary, P. Fabbri, E. Leoni, F. Mazzanti, R. Akbari, and C. Antonini, “Additive manufacturing by digital light processing: a review,” *Prog Addit Manuf*, Aug. 2022, doi: 10.1007/s40964-022-00336-0.

- [111] P. Börsting, “Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik und deren Überwindung durch einen Funktionskatalog = Obstacles in Microsystems Design and Development of a Functions Catalogue,” 2012, doi: 10.5445/IR/1000031514.
- [112] J. Feldhusen and K.-H. Grote, Eds., *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-29569-0.
- [113] “VDI-Richtlinien 2221: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung,” vol. 1, p. 56, Nov. 2019.
- [114] T. E. Braun, *Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld*. München: Hut, 2005.
- [115] E. Smith, *Carl Adam Petri life and science*. Berlin: Springer, 2016.
- [116] D. Marca and C. L. McGowan, *SADT: structured analysis and design technique*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [117] J. Zimmermann, J. Rieck, and C. Stark, *Projektplanung: Modelle, Methoden, Management*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [118] T. Allweyer, *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. [Place of publication not identified: publisher not identified], 2016.
- [119] J. Pfeffer, *Grundlagen der agilen Produktentwicklung: Basiswissen zu Scrum, Kanban, Lean Development*, Erste Auflage (intern: v2.0). Wangen im Allgäu: peppair Verlag, 2019.
- [120] J. Herter, *Eine Methode zur Unterstützung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit in der Produktentwicklung auf Grundlage einer integrierten Visualisierung konzeptioneller Modelle*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017.
- [121] H. Timinger, *Modernes Projektmanagement: mit traditionellem, agilem und hybridem Vorgehen zum Erfolg*, 1. Auflage. Weinheim: Wiley, 2017.
- [122] W. W. Royce, “Managing the development of large software systems: concepts and techniques,” in *Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering*, 1987, pp. 328–338.
- [123] A. Khandelwal and G. Tyagi, “Review Paper on Suitability of Traditional Prototype Model and Spiral Model used for Mobile Application Development Life Cycle,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 31, Apr. 2018, doi: 10.17577/IJERTCONV3IS31008.
- [124] J. Leute, *Eine neue Definition agilen Projektmanagements: Analyse konzeptioneller Merkmale agilen Projektmanagements*, 1. Auflage. in Reihe: Wirtschaftsinformatik, no. Band 81. Lohmar: Eul Verlag, 2014.
- [125] S. Vajna, H. Guo, and M. Schabacker, “Optimize Engineering Processes With Simultaneous Engineering (SE) and Concurrent Engineering (CE),” in *Volume 3: 25th Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B*, Long Beach, California, USA: ASMEDC, Jan. 2005, pp. 711–720. doi: 10.1115/DETC2005-84389.

- [126] VDI 2206, *Design Methodology for mechatronic system- VDI 2206*. in Verein Deutsche Ingenieure. Beuth Publications, 2004.
- [127] C. Hales and S. Gooch, *Managing Engineering Design*. London: Springer London, 2004. doi: 10.1007/978-0-85729-394-7.
- [128] J. Reitmeier, *Eigenschaftsorientierte Simulationsplanung: ein Beitrag zur effizienten virtuellen Absicherung der Produktfunktionalität*, 1. Aufl. in Produktentwicklung. München: Dr. Hut, 2015.
- [129] K. Gericke, M. Meißner, and K. Paetzold, “Understanding the context of product development,” *DS 75-3: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies, Vol. 3: Design Organisation and Management, Seoul, Korea 19-22.08.2013*, pp. 191–200, 2013.
- [130] H. Eigler, *Entwurf signalverarbeitender Mikrosysteme: Einführung und Grundlagen*. Heidelberg: Hüthig, 1994.
- [131] E. Antonsson, J. Cavallaro, R. Mcnc, M. Ann, and F. Intellisense, “Structured Design Methods for MEMS Final Report,” Aug. 1997.
- [132] A. Zimmermann, “Skript: Aufbau- und Verbindungstechnologien für Mikrosysteme,” 2017.
- [133] I. Kaiser, *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices)*. Paderborn: Universität Paderborn, 2009. Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <http://digital.ub.uni-paderborn.de/hsmig/1204>
- [134] F. T. Piller and M. Tseng, *Handbook Of Research In Mass Customization And Personalization (In 2 Volumes) - Volume 1: Strategies And Concepts; Volume 2: Applications And Cases*. World Scientific, 2009.
- [135] V. G. Hildebrand, *Individualisierung als strategische Option der Marktbearbeitung: Determinanten und Erfolgswirkungen kundenindividueller Marketingkonzepte*. in Gabler Edition Wissenschaft : Forum Marketing. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. [u.a.], 1997.
- [136] E. Bogner, “Strategies of product individualization within the manufacturing industry in the context of digitalizationStrategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung,” FAU University Press, 2019. doi: 10.25593/978-3-96147-247-5.
- [137] S. Yang and Y. F. Zhao, “Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 80, no. 1–4, pp. 327–342, Sep. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6994-5.
- [138] B. Leutenecker-Twelsiek, C. Klahn, and M. Meboldt, “Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 408–413, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.016.
- [139] M. Kumke, H. Watschke, and T. Vietor, “A new methodological framework for design for additive manufacturing,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, no. 1, pp. 3–19, Jan. 2016, doi: 10.1080/17452759.2016.1139377.

- [140] T. Künneke, S. Bucker, T. Lieneke, and D. Zimmer, “Ein Beitrag zur Anpassung bestehender Konstruktionsmethodiken an die additiven Fertigungsverfahren,” in *Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show + Conference for Additive Manufacturing: Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 5 – 7 June 2018*, M. Kynast, M. Eichmann, and G. Witt, Eds., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018. doi: 10.3139/9783446458123.
- [141] J. J. Wach, *Problemspezifische Hilfsmittel für die integrierte Produktentwicklung*. in Konstruktionstechnik München, no. 12. München Wien: Hanser, 1994.
- [142] J. Ponn, *Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte*. in Produktentwicklung. München: Verl. Dr. Hut, 2007.
- [143] P. Badke-Schaub and E. Frankenberger, *Management Kritischer Situationen: Produktentwicklung erfolgreich gestalten*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg : Imprint : Springer, 2004.
- [144] K. M. DeWalt and B. R. DeWalt, *Participant observation: a guide for fieldworkers*. Walnut Creek, CA: AltaMira Press, 2002.
- [145] M. S. Schwartz and C. G. Schwartz, “Problems in Participant Observation,” *American Journal of Sociology*, vol. 60, no. 4, pp. 343–353, Jan. 1955, doi: 10.1086/221566.
- [146] L. T. M. Blessing, “A process-based approach to computer-supported engineering design,” University of Twente, Enschede, 1994. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/33148/A+process-based+approach+to+computer-supported+engineering+design>
- [147] J. C. Tang and L. J. Leifer, “An Observational Methodology for Studying Group Design Activity,” in *Mechanical Design: Theory and Methodology*, M. B. Waldron and K. J. Waldron, Eds., New York, NY: Springer New York, 1996, pp. 52–70. doi: 10.1007/978-1-4757-2561-2_5.
- [148] P. Mayring, “Qualitative Content Analysis: Theoretical Background and Procedures,” in *Approaches to Qualitative Research in Mathematics Education*, A. Bikner-Ahsbals, C. Knipping, and N. Presmeg, Eds., in *Advances in Mathematics Education*. , Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, pp. 365–380. doi: 10.1007/978-94-017-9181-6_13.
- [149] W. C. Adams, “Conducting Semi-Structured Interviews,” in *Handbook of Practical Program Evaluation*, K. E. Newcomer, H. P. Hatry, and J. S. Wholey, Eds., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015, pp. 492–505. doi: 10.1002/9781119171386.ch19.
- [150] L. A. Stauffer, M. Diteman, and R. Hyde, “Eliciting and Analysing Subjective Data about Engineering Design,” *Journal of Engineering Design*, vol. 2, no. 4, pp. 351–366, Jan. 1991, doi: 10.1080/09544829108901691.
- [151] M. Polke, U. Epple, and M. Heim, Eds., *Process control engineering*. Weinheim ; New York: VCH, 1994.
- [152] A. C. Ward, *Lean product and process development*. Cambridge, MA, USA: Lean Enterprise Institute, 2007.

- [153] K. Moll, "Lean Development," in *Handbuch Produktentwicklung*, München: Hanser, 2016.
- [154] G. Barczak, A. Griffin, and K. B. Kahn, "PERSPECTIVE: Trends and Drivers of Success in NPD Practices: Results of the 2003 PDMA Best Practices Study *," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 26, no. 1, pp. 3–23, Jan. 2009, doi: 10.1111/j.1540-5885.2009.00331.x.
- [155] S. Franke, R. Kirschner, A. Kain, I. Becker, and U. Lindemann, "Managing Early Phases of Innovation Processes and the Use of Methods within Empirical Results From an Industry Survey," *DS 58-1: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 1, Design Processes, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009*, pp. 193–204, 2009.
- [156] V. Mahajan and J. Wind, "New Product Models: Practice, Shortcomings and Desired Improvements," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 9, no. 2, pp. 128–139, Jun. 1992, doi: 10.1111/1540-5885.920128.
- [157] E. J. Nijssen and R. T. Frambach, "Determinants of the Adoption of New Product Development Tools by Industrial Firms," *Industrial Marketing Management*, vol. 29, no. 2, pp. 121–131, Mar. 2000, doi: 10.1016/S0019-8501(98)00043-1.
- [158] M. Graner, *Der Einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. doi: 10.1007/978-3-658-01278-6.
- [159] A. A. Fernandes, S. da Silva Vieira, A. P. Medeiros, and R. M. Natal Jorge, "Structured Methods of New Product Development and Creativity Management: A Teaching Experience," *Creativity and Innovation Management*, vol. 18, no. 3, pp. 160–175, Sep. 2009, doi: 10.1111/j.1467-8691.2009.00529.x.
- [160] J. Kim and D. Wilemon, "An empirical investigation of complexity and its management in new product development," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 21, no. 4, pp. 547–564, May 2009, doi: 10.1080/09537320902819296.
- [161] C. W. Thia, K. Chai, J. Bauly, and Y. Xin, "An exploratory study of the use of quality tools and techniques in product development," *The TQM Magazine*, vol. 17, no. 5, pp. 406–424, Oct. 2005, doi: 10.1108/09544780510615924.
- [162] M. Smerlinski, M. Stephan, and C. Gundlach, "Innovationsmanagement in hessischen Unternehmen: Eine empirische Untersuchung zur Praxis in klein- und mittelständischen Unternehmen," *Discussion Papers on Strategy and Innovation*, Art. no. 09–01, 2009, Accessed: Feb. 15, 2023. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/p/zbw/martim/0901.html>
- [163] U. Lindemann, "Flexible Adaptation of Methods within the Design Process," *DS 30: Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference, Dubrovnik*, pp. 81–86, 2002.
- [164] J. Klose, "Neue Wege zur Produktentwicklung," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 90, no. 9, pp. 454–454, Sep. 1995, doi: 10.1515/zwf-1995-900924.
- [165] J. Ponn, "Absicherung der technischen Entwicklungsziele," in *Handbuch Produktentwicklung*, München: Hanser, 2016.

- [166] C. Carlson, *Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. in Quality and reliability engineering series, no. 1. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2012.
- [167] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis*. Quality Press, 2003.
- [168] “ISO 14971:2019 - Medical devices — Application of risk management to medical devices.” Jul. 14, 2020. Accessed: May 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/72704.html>
- [169] C. Schmittner, T. Gruber, P. Puschner, and E. Schoitsch, “Security Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA),” in *Computer Safety, Reliability, and Security*, vol. 8666, A. Bondavalli and F. Di Giandomenico, Eds., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 8666. , Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 310–325. doi: 10.1007/978-3-319-10506-2_21.
- [170] B. Bertsche and M. Stohrer, “Zuverlässigkeit und Sicherheit,” in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Ed., München: Hanser, 2016.
- [171] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. A. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly*, 0 ed. CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781420089288.
- [172] D. M. Anderson, *Design for manufacturability: how to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*. Boca Raton, Florida: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2014.
- [173] H. Linde, D. M. Hall, and G. H. Herr, “The Integration of existing Tools and Techniques into a powerful and structured Innovation Strategy,” in *WDK 26: Proceedings of ICED 99, International Conference on Engineering Design*, U. Lindemann, Ed., in Schriftenreihe WDK. München: Techn. Univ. [u.a.], 1999.
- [174] T. Braun and U. Lindemann, “Supporting the selection, adaptation and application of methods in product development,” in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003, pp. 629–630.
- [175] W. Zanker, *Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden*, Als Ms. gedr. in Reihe Konstruktionstechnik München, no. 36. Aachen: Shaker, 1999.
- [176] L. V. Velsen, “User-Centered design for personalization,” 2011, doi: 10.13140/2.1.3843.0081.
- [177] J. D. Gould and C. Lewis, “Designing for usability: key principles and what designers think,” *Commun. ACM*, vol. 28, no. 3, pp. 300–311, Mar. 1985, doi: 10.1145/3166.3170.
- [178] M. Holle, I. Straub, M. Roth, and U. Lindemann, “Customer individual product development: Methodology for product architecture modification,” in *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, Orlando, FL, USA: IEEE, Apr. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/SYSCON.2016.7490627.
- [179] M. Kajtaz, B. Witherow, C. Usma, M. Brandt, and A. Subic, “An Approach for Personalised Product Development,” *Procedia Technology*, vol. 20, pp. 191–198, 2015, doi: 10.1016/j.protcy.2015.07.031.

- [180] M. Helander and H. Khalid, “Affective and Pleasurable Design,” in *Handbook on Human Factors and Ergonomics*, N. Hoboken, Ed., Wiley, 2006, pp. 543–572.
- [181] F. Pöhlau, *Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)*. in *Fertigungstechnik - Erlangen*, no. 86. Bamberg: Meisenbach, 1999.
- [182] T. Peitz, *Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices)*. in *HNI-Verlagsschriftenreihe*, no. Bd. 221. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst, 2008.
- [183] Y. Zhuo, *Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)*. in *Fertigungstechnik - Erlangen*, no. 180. Bamberg: Meisenbach, 2007.
- [184] “MECADTRON.” Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.mecadtron.de/de/nextra/system-nextra/system-nextra.html>
- [185] R. M. Eastman, “Engineering information release prior to final design freeze,” *IEEE Trans. Eng. Manage.*, vol. EM-27, no. 2, pp. 37–42, 1980, doi: 10.1109/TEM.1980.6447387.
- [186] T. Eger, C. Eckert, and P. J. Clarkson, “The role of design freeze in product development,” in *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08. 2005*, 2005.
- [187] M. Wiboonrat, “Systems Engineering approach to final design freeze in uncertain project environments,” in *2015 IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Calabria, Italy: IEEE, May 2015, pp. 516–522. doi: 10.1109/CSCWD.2015.7231013.
- [188] B. J. Zirger and J. L. Hartley, “The effect of acceleration techniques on product development time,” *IEEE Trans. Eng. Manage.*, vol. 43, no. 2, pp. 143–152, May 1996, doi: 10.1109/17.509980.
- [189] K. Roth, *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. doi: 10.1007/978-3-642-17466-7.
- [190] J. Hoerber, J. Glasschroeder, M. Pfeffer, J. Schilp, M. Zaeh, and J. Franke, “Approaches for Additive Manufacturing of 3D Electronic Applications,” *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 806–811, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.01.090.
- [191] J. Lienig and M. Dietrich, Eds., *Entwurf integrierter 3D-Systeme der Elektronik*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [192] F. Weiss, “Untersuchung des Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile mittels Bereitstellung einer elementaren Informationsstruktur,” 2019.
- [193] D. Bauer *et al.*, *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*. VDI, 2016.
- [194] P. Pradel, Z. Zhu, R. Bibb, and J. Moultrie, “Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice,” *Journal of Engineering Design*, vol. 29, no. 4–5, pp. 165–200, May 2018, doi: 10.1080/09544828.2018.1454589.

- [195] M. Varl, J. Duhovnik, and J. Tavčar, “Changeability and agility enablers in one-of-a-kind product development and design processes,” *Res Eng Design*, vol. 33, no. 1, pp. 111–128, Jan. 2022, doi: 10.1007/s00163-021-00377-6.
- [196] G. Schuh and M. Riesener, *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools*, 3., Vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2018.
- [197] L. T. M. Blessing and A. Chakrabarti, *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London, 2009. doi: 10.1007/978-1-84882-587-1.
- [198] M. Cantamessa, “An empirical perspective upon design research,” *Journal of Engineering Design*, vol. 14, no. 1, pp. 1–15, Mar. 2003, doi: 10.1080/0954482031000078126.
- [199] “Forschungsprojekt MikroBO - Bundesministerium für Bildung und Forschung,” Forschungsbericht, 2020. [Online]. Available: <https://www.elektronikforschung.de/projekte/mikrobo>
- [200] <https://www.hahn-schickard.de>, “Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung im Ohr (MikroBO),” Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.hahn-schickard.de/projekt-detail/mikroelektronik-fuer-permanente-nichtinvasive-blutdruckmessung-im-ohr-mikrobo>
- [201] “Leistungsanalysen an Antriebssträngen mit mehreren Elektromotoren - Anwendungsbeispiele,” CSM GmbH. Accessed: Feb. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.csm.de/de/anwendungen/anwendungsfaelle/hochvolt-leistungsmessung/1335-leistungsanalysen-an-antriebsstraengen-mit-mehreren-elektromotoren>
- [202] “HV DTemp IC Sensors,” CSM GmbH. Accessed: Feb. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.csm.de/en/products/hv-dtemp-measurement-system/hv-dtemp-ic-sensors>
- [203] P. Liamputtong, Ed., *How to conduct qualitative research in social science*. Cheltenham, UK ; Northampton, MA: Edward Elgar Publishing, 2023.
- [204] M. B. Miles, A. M. Huberman, and J. Saldaña, *Qualitative data analysis: a methods sourcebook*, Fourth edition. Los Angeles: SAGE, 2020.
- [205] R. P. Jagadeesh Chandra Bose and W. M. P. van der Aalst, “Abstractions in Process Mining: A Taxonomy of Patterns,” in *Business Process Management*, U. Dayal, J. Eder, J. Koehler, and H. A. Reijers, Eds., in Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 159–175. doi: 10.1007/978-3-642-03848-8_12.
- [206] I. Jacobson, *Object-oriented software engineering: a use case driven approach*. [New York] : Wokingham, Eng. ; Reading, Mass: ACM Press ; Addison-Wesley Pub, 1992.
- [207] J. Fernandes, E. Henriques, A. Silva, and M. A. Moss, “Requirements change in complex technical systems: an empirical study of root causes,” *Res Eng Design*, vol. 26, no. 1, pp. 37–55, Jan. 2015, doi: 10.1007/s00163-014-0183-7.
- [208] B. Hamraz, N. H. M. Caldwell, D. C. Wynn, and P. J. Clarkson, “Requirements-based development of an improved engineering change management method,” *Journal of*

- Engineering Design*, vol. 24, no. 11, pp. 765–793, Nov. 2013, doi: 10.1080/09544828.2013.834039.
- [209] “Kunststoff unter Strom,” Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Accessed: Mar. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/kunststoff-unter-strom.html>
- [210] T. Vieten, D. Stahl, P. Schilling, F. Civelek, and A. Zimmermann, “Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides,” *Micromachines*, vol. 12, no. 7, p. 730, Jun. 2021, doi: 10.3390/mi12070730.
- [211] A. Bryman, *Social research methods*, Fifth Edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2016.
- [212] J. Oehmen, “Risiko- und Chancenmanagement in der Produktentwicklung,” in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Ed., München: Hanser, 2016.
- [213] K. Dalkir, *Knowledge management in theory and practice*, 2nd ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 2011.
- [214] A. Schatten, *Best Practice Software-Engineering: eine praxiserprobte Zusammenstellung von komponentenorientierten Konzepten, Methoden und Werkzeugen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
- [215] B. Vogel-Heuser, *Systems Software Engineering: angewandte Methoden des Systementwurfs für Ingenieure*. München: Oldenbourg Industrieverl, 2003.
- [216] M. Sajan, *Software engineering*. Place of publication not identified: S Chand & Co Ltd, 2010.
- [217] M. Gepp, P. Golzer, and B. Grobholz, “Engineer-to-order companies are reserved on adoption of current engineering trends - an empirical study,” in *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, Singapore: IEEE, Dec. 2015, pp. 1525–1530. doi: 10.1109/IEEM.2015.7385902.
- [218] A. Tripathy and S. D. Eppinger, “Organizing Global Product Development for Complex Engineered Systems,” *IEEE Trans. Eng. Manage.*, vol. 58, no. 3, pp. 510–529, Aug. 2011, doi: 10.1109/TEM.2010.2093531.
- [219] J. J. Francis *et al.*, “What is an adequate sample size? Operationalising data saturation for theory-based interview studies,” *Psychology & Health*, vol. 25, no. 10, pp. 1229–1245, Dec. 2010, doi: 10.1080/08870440903194015.
- [220] J. Gläser and G. Laudel, *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*, 4. Auflage. in Lehrbuch. Wiesbaden: VS Verlag, 2010.
- [221] D. A. Gioia, K. G. Corley, and A. L. Hamilton, “Seeking Qualitative Rigor in Inductive Research: Notes on the Gioia Methodology,” *Organizational Research Methods*, vol. 16, no. 1, pp. 15–31, Jan. 2013, doi: 10.1177/1094428112452151.

- [222] A. Strauss and J. Corbin, “Grounded theory methodology: An overview,” in *Handbook of qualitative research*, Thousand Oaks, CA, US: Sage Publications, Inc, 1994, pp. 273–285.
- [223] G. Schreiber, Ed., *Knowledge engineering and management: the CommonKADS methodology*. Cambridge, Mass: MIT Press, 2000.
- [224] W. Horn, “Knowledge Engineering,” in *Expertensysteme*, G. Gottlob, T. Frühwirth, and W. Horn, Eds., in *Springers Angewandte Informatik*, Vienna: Springer Vienna, 1990, pp. 73–89. doi: 10.1007/978-3-7091-9094-4_4.
- [225] I. Baumkart, “Requirements Engineering,” in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Ed., München: Hanser, 2016.
- [226] C. Klahn, M. Meboldt, F. Fontana, B. Leutenecker-Twelsiek, and J. Jansen, *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten*, 1. Auflage. in Ein Fachbuch von Konstruktionspraxis. Würzburg: Vogel Business Media, 2018.
- [227] “ECAD / MCAD | Altium,” Altium Resources. Accessed: Mar. 18, 2023. [Online]. Available: <https://resources.altium.com/de/ecad-mcad>
- [228] V. Ramaswamy and F. J. Gouillart, “The Power of Co-Creation: Build It with Them to Boost Growth, Productivity, and Profits,” Oct. 2010. Accessed: Mar. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Power-of-Co-Creation%3A-Build-It-with-Them-to-and-Ramaswamy-Gouillart/a64a2cebb7689d4337a8c885f95a66b945ad4432>
- [229] K. R. Ranjan and S. Read, “Value co-creation: concept and measurement,” *J. of the Acad. Mark. Sci.*, vol. 44, no. 3, pp. 290–315, May 2016, doi: 10.1007/s11747-014-0397-2.
- [230] B. Fein, *Kunststoffdatenblätter Spritzgießen*, 1. Auflage. in *Werkstoffe*. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [231] LPKF, “3D-MIDs with Laser Direct Structuring (LDS).” Accessed: Mar. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/electronics-manufacturing/3d-mids-with-laser-direct-structuring-lds>
- [232] G. Tapia and A. Elwany, “A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, no. 6, p. 060801, Dec. 2014, doi: 10.1115/1.4028540.
- [233] W. L. Belcher, *Writing your journal article in 12 weeks: a guide to academic publishing success*. Thousand Oaks, Calif: SAGE Publications, 2009.
- [234] C. Herstatt, K. Kalogerakis, and M. Schulthess, *Innovationen durch Wissenstransfer: Mit Analogien schneller und kreativer Lösungen entwickeln*. in *Innovationen durch Wissenstransfer*.
- [235] M. G. Möhrle, L. Walter, and S. Schumann, “Viele Wege führen nach Rom,” in *Innovationen durch Wissenstransfer: Mit Analogien schneller und kreativer Lösungen*

- entwickeln*, C. Herstatt, K. Kalogerakis, and M. Schulthess, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014, pp. 63–81. doi: 10.1007/978-3-658-01566-4_3.
- [236] J. J. Kaufman and R. Woodhead, *Stimulating Innovation in Products and Services: With Function Analysis and Mapping*. John Wiley & Sons, 2006.
- [237] J. Trischler, P. Kristensson, and D. Scott, “Team diversity and its management in a co-design team,” *JOSM*, vol. 29, no. 1, pp. 120–145, Jan. 2018, doi: 10.1108/JOSM-10-2016-0283.
- [238] E. B.-N. Sanders and P. J. Stappers, “Co-creation and the new landscapes of design,” *CoDesign*, vol. 4, no. 1, pp. 5–18, Mar. 2008, doi: 10.1080/15710880701875068.
- [239] A. N. Garman, J. Corbett, J. Grady, and J. Benesh, “Ready-to-use-simulation: THE HIDDEN COSTS OF EMPLOYEE TURNOVER,” *Simulation & Gaming*, vol. 36, no. 2, pp. 274–281, Jun. 2005, doi: 10.1177/1046878104273254.
- [240] A. Bernard, M. Monzón, and E. Pei, Eds., *Additive Manufacturing - Developments in Training and Education*, 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-76084-1.

Publikationen

F. Civelek, A. Brem, K.-P. Fritz, und A. Zimmermann, „Product Development Processes for Individualized Products: A Case Study“, IEEE Transactions on Engineering Management, S. 1–15, 2023, doi: 10.1109/TEM.2023.3277019

F. Civelek, K.-P. Fritz, und A. Zimmermann, „Towards a Tailored Engineering Design Process for Individualized Micro-Mechatronic Systems with a Novel Case-Based Methodology“, Applied Sciences, Bd. 11, Nr. 17, Art. Nr. 17, 2021, doi: 10.3390/app11177909

T. Vieten, D. Stahl, P. Schilling, F. Civelek, und A. Zimmermann, „Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides“, Micromachines, Bd. 12, Nr. 7, Art. Nr. 7, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-13209>

F. Civelek u. a., „Open-Eco-Innovation for SMEs with Pan-European Key Enabling Technology Centres“, Clean Technologies, Bd. 2, Nr. 4, Art. Nr. 4, 2020, doi: 10.3390/cleantechnol2040026

Begleitende studentische Arbeiten

Autor	Art	Titel	Jahr
Samet Halvaci	Bachelorarbeit	Systematische Literaturrecherche über Produktentwicklungsprozesse unter Berücksichtigung der Adaptierbarkeit	2021
Enes Kardas	Bachelorarbeit	Systematische Auswahl von Fertigungsverfahren für die Herstellung von individualisierten 3D-Schaltungsträgern mit digitalen Prozessketten und deren Gestaltungsregeln	2022

Anhang

Anhang A

Das grundlegende Datenbankfenster sowie die dazugehörigen Funktionalitäten, wie etwa das Hinzufügen und Entfernen von Prozessen und Features, wird über diesen Code ausgeführt. Zudem wird in diesem Code auch die Verbindung zum GUI hergestellt.

```
from PyQt5 import Qt, QSql, QtWidgets
from PyQt5.QtCore import QFile, QFileInfo, QSettings, Qt
from PyQt5.QtWidgets import QTableView, QGridLayout, QPushButton, QWidget

class dbMainWindow(object):
    def setupUi(self, MainWindow):
        MainWindow.setObjectName("Datenbank")
        root = QFileInfo(__file__).absolutePath()
        MainWindow.setAttribute(Qt.WA_DeleteOnClose)
        self.settings = QSettings('setting', MainWindow.setObjectName())
        self.viewer = QTableView()
        self.db = QSql.QSqlDatabase.addDatabase('QSQLITE')
        self.model = QSql.QSqlTableModel()
        self.viewer.verticalHeader().setVisible(False)
        self.viewer.setModel(self.model)
        #self.viewer.keyPressEvent = self.tableKeyPressEvent //zul auskommentiert

        self.layout = QGridLayout()
        self.layout.addWidget(self.viewer, 0, 0, 1, 4)

        self.add_button = QPushButton("Neuen Prozess hinzufügen")
        self.add_button.setFixedWidth(self.add_button.sizeHint().width())
        self.layout.addWidget(self.add_button, 1, 0)

        self.delete_button = QPushButton("Prozess entfernen")
        self.delete_button.setFixedWidth(self.delete_button.sizeHint().width())
        self.layout.addWidget(self.delete_button, 1, 1)

        self.feature_button = QPushButton("Feature hinzufügen")
        self.feature_button.setFixedWidth(self.feature_button.sizeHint().width())
        self.layout.addWidget(self.feature_button, 2, 0)

        self.feature_delButton = QPushButton("Feature entfernen")
        self.feature_delButton.setFixedWidth(self.feature_delButton.sizeHint().width())
        self.layout.addWidget(self.feature_delButton, 2, 1)

        self.myWidget = QWidget()
        self.myWidget.setLayout(self.layout)

        MainWindow.setCentralWidget(self.myWidget)
        MainWindow.setGeometry(1000, 200, 1000, 1200)
        MainWindow.setWindowTitle("Datenbank")

if __name__ == "__main__":
    import sys

    app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
    MainWindow = QtWidgets.QMainWindow()
    ui = dbMainWindow()
    ui.setupUi(MainWindow)
    MainWindow.show()
    sys.exit(app.exec_())
```

Eingabe von Daten in die Datenbank; beinhaltet Felder für Informationen wie Feature-Bezeichnung, Einheit, anzuwendende Regel sowie ggf. Toleranz und zugehörige Funktion.

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2
3  # Form implementation generated from reading ui file 'add.ui'
4  #
5  # Created by: PyQt5 UI code generator 5.15.7
6  #
7  # WARNING: Any manual changes made to this file will be lost when pyuic5 is
8  # run again. Do not edit this file unless you know what you are doing.
9
10
11 from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets
12
13
14 class Ui_dbAddWindow(object):
15     def setupUi(self, dbAddWindow):
16         dbAddWindow.setObjectName("dbAddWindow")
17         dbAddWindow.resize(744, 229)
18         self.centralwidget = QtWidgets.QWidget(dbAddWindow)
19         self.centralwidget.setObjectName("centralwidget")
20         self.verticalLayout_4 = QtWidgets.QVBoxLayout(self.centralwidget)
21         self.verticalLayout_4.setObjectName("verticalLayout_4")
22         self.horizontalLayout = QtWidgets.QHBoxLayout()
23         self.horizontalLayout.setObjectName("horizontalLayout")
24         self.verticalLayout = QtWidgets.QVBoxLayout()
25         self.verticalLayout.setObjectName("verticalLayout")
26         self.label_feature = QtWidgets.QLabel(self.centralwidget)
27         self.label_feature.setObjectName("label_feature")
28         self.verticalLayout.addWidget(self.label_feature)
29         self.label_einheit = QtWidgets.QLabel(self.centralwidget)
30         self.label_einheit.setObjectName("label_einheit")
31         self.verticalLayout.addWidget(self.label_einheit)
32         self.label_anzwr = QtWidgets.QLabel(self.centralwidget)
33         self.label_anzwr.setObjectName("label_anzwr")
34         self.verticalLayout.addWidget(self.label_anzwr)
35         self.label_toleranz = QtWidgets.QLabel(self.centralwidget)
36         self.label_toleranz.setObjectName("label_toleranz")
37         self.verticalLayout.addWidget(self.label_toleranz)
38         self.label = QtWidgets.QLabel(self.centralwidget)
39         self.label.setObjectName("label")
40         self.verticalLayout.addWidget(self.label)
41         self.horizontalLayout.addLayout(self.verticalLayout)
42         self.verticalLayout_2 = QtWidgets.QVBoxLayout()
43         self.verticalLayout_2.setObjectName("verticalLayout_2")
44         self.lineEdit_feature = QtWidgets.QLineEdit(self.centralwidget)
45         self.lineEdit_feature.setObjectName("lineEdit_feature")
46         self.verticalLayout_2.addWidget(self.lineEdit_feature)
47         self.lineEdit_einheit = QtWidgets.QLineEdit(self.centralwidget)
48         self.lineEdit_einheit.setObjectName("lineEdit_einheit")
49         self.verticalLayout_2.addWidget(self.lineEdit_einheit)
50         self.comboBox = QtWidgets.QComboBox(self.centralwidget)
51         self.comboBox.setObjectName("comboBox")
52         self.comboBox.addItem("")
53         self.comboBox.addItem("")
54         self.comboBox.addItem("")
55         self.comboBox.addItem("")
56         self.comboBox.addItem("")
57         self.comboBox.addItem("")
58         self.verticalLayout_2.addWidget(self.comboBox)

```

```

59 self.lineEdit.toleranz = QtWidgets.QLineEdit(self.centralwidget)
60 self.lineEdit.toleranz.setObjectName("lineEdit_toleranz")
61 self.verticalLayout_2.addWidget(self.lineEdit_toleranz)
62 self.gridLayout = QtWidgets.QGridLayout()
63 self.gridLayout.setObjectName("gridLayout")
64 self.radioButton_Firstcheck = QtWidgets.QRadioButton(self.centralwidget)
65 self.radioButton_Firstcheck.setObjectName("radioButton_Firstcheck")
66 self.gridLayout.addWidget(self.radioButton_Firstcheck, 0, 0, 1, 1)
67 self.radioButton_NormalAbfrage = QtWidgets.QRadioButton(self.centralwidget)
68 self.radioButton_NormalAbfrage.setObjectName("radioButton_NormalAbfrage")
69 self.gridLayout.addWidget(self.radioButton_NormalAbfrage, 0, 1, 1, 1)
70 self.gridLayout_2.addWidget(self.gridLayout)
71 self.horizontalLayout.addWidget(self.verticalLayout_2)
72 self.verticalLayout_4.addWidget(self.horizontalLayout)
73 self.verticalLayout_3 = QtWidgets.QVBoxLayout()
74 self.verticalLayout_3.setObjectName("verticalLayout_3")
75 self.pushButton = QtWidgets.QPushButton(self.centralwidget)
76 self.pushButton.setObjectName("pushButton")
77 self.verticalLayout_3.addWidget(self.pushButton)
78 self.pushButton_2 = QtWidgets.QPushButton(self.centralwidget)
79 self.pushButton_2.setObjectName("pushButton_2")
80 self.verticalLayout_3.addWidget(self.pushButton_2)
81 self.verticalLayout_4.addWidget(self.verticalLayout_3)
82 dbAddWindow.setCentralWidget(self.centralwidget)
83
84 self.retranslateUi(dbAddWindow)
85 QtCore.QMetaObject.connectSlotsByName(dbAddWindow)
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
def retranslateUi(self, dbAddWindow):
    translate = QtCore.QCoreApplication.translate
    dbAddWindow.setWindowTitle(translate("dbAddWindow", "Feature hinzufügen"))
    self.label_Feature.setText(translate("dbAddWindow", "Feature Bezeichnung:"))
    self.label_Einheit.setText(translate("dbAddWindow", "Einheit:"))
    self.label_anzwr.setText(translate("dbAddWindow", "Anzuwendende Regel:"))
    self.label_toleranz.setText(translate("dbAddWindow", "Toleranz:"))
    self.label.setText(translate("dbAddWindow", "Funktion:"))
    self.comboBox.setitemText(0, translate("dbAddWindow", "Regel 1: Werte werden angezeigt, die gleich oder höher sind als die Eingabe"))
    self.comboBox.setitemText(1, translate("dbAddWindow", "Regel 2: Werte werden angezeigt, die gleich oder kleiner sind als die Eingabe"))
    self.comboBox.setitemText(2, translate("dbAddWindow", "Regel 3: Keines der erwähnten Wörter darf vorkommen (KO-Kriterium)"))
    self.comboBox.setitemText(3, translate("dbAddWindow", "Regel 4: Ausgewählte Wörter müssen vorkommen (OK-Kriterium)"))
    self.comboBox.setitemText(4, translate("dbAddWindow", "Regel 5: Ja / Nein Abfrage"))
    self.comboBox.setitemText(5, translate("dbAddWindow", "Regel 6: Wert im Rahmen der Toleranz muss zutreffen"))
    self.radioButton_Firstcheck.setText(translate("dbAddWindow", "Firstcheck"))
    self.radioButton_NormalAbfrage.setText(translate("dbAddWindow", "Normale Abfrage"))
    self.pushButton.setText(translate("dbAddWindow", "Übernehmen"))
    self.pushButton_2.setText(translate("dbAddWindow", "Übernehmen und weitere hinzufügen"))

if __name__ == "__main__":
    import sys
    app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
    dbAddWindow = QtWidgets.QMainWindow()
    ui = Ui_dbAddWindow()
    ui.setupUi(dbAddWindow)
    dbAddWindow.show()
    sys.exit(app.exec_())

```

Das Kernstück von KETTS wird in diesem Code durchgeführt. Diese sind die Erkennung von Anforderungen, die im KETTS mit „First-Check“- und „Diverse-Werte“ abgefragt werden. Die Daten werden aus der Datenbank geladen und entsprechend der GUI zugewiesen, inklusive aller zugehörigen Elemente wie Eingabefeldern. Die Eingabe des Nutzers wird in diesem Code für die Berechnung des Outputs genutzt.

```

1  import os
2  import sqlite3
3  import sys
4  import pandas as pd
5  import time
6
7  from PyQt5 import QtWidgets, QtCore
8  from PyQt5.QtCore import Qt
9  from PyQt5.QtGui import QDoubleValidator, QColor
10 from PyQt5.QtWidgets import QComboBox, QMessageBox, QGraphicsDropShadowEffect, QPushButton
11 from PyQt5.QtWidgets import QFileDialog
12
13 from database import MyWindow
14 from gui_main import Ui_MainWindow
15 from ui_splash_screen import Ui_SplashScreen
16
17 import numpy as np
18 import qtmodern.styles
19 import qtmodern.windows
20
21
22 counter = 0
23
24
25 #Darstellung des Spalsh-Screens
26 class SplashScreen(QtWidgets.QMainWindow):
27     def __init__(self):
28         QtWidgets.QMainWindow.__init__(self)
29         self.ui = Ui_SplashScreen()
30         self.ui.setupUi(self)
31
32         self.setWindowFlag(QtCore.Qt.FramelessWindowHint)
33         self.setAttribute(QtCore.Qt.WA_TranslucentBackground)
34
35         self.shadow = QGraphicsDropShadowEffect(self)
36         self.shadow.setBlurRadius(20)
37         self.shadow.setXOffset(0)
38         self.shadow.setYOffset(0)
39         self.shadow.setColor(QColor(0, 0, 0, 60))
40         self.ui.dropShadowFrame.setGraphicsEffect(self.shadow)
41
42         self.timer = QtCore.QTimer()
43         self.timer.timeout.connect(self.progress)
44         self.timer.start(18)
45         self.show()
46
47
48     def progress(self):
49         global counter
50         self.ui.progressBar.setValue(counter)
51
52         if counter > 100:
53             self.timer.stop()
54             self.main = calculatorWindow()
55             self.main.show()
56             self.close()

```

```

57
58     counter += 1
59
60
61 class calculatorWindow(QMainWindow, Ui_MainWindow):
62
63
64     def __init__(self):
65         super().__init__()
66         self.setupUi(self)
67         self.show()
68         self.pushButton_searchDB.clicked.connect(self.buttonpressed_suche)
69         self.pushButton_editDB.clicked.connect(self.buttonpressed2_database)
70         self.pushButton_newDatabase.clicked.connect(self.createDB)
71         self.pushButton_firstCheck.clicked.connect(self.firstcheck)
72         self.pushButton_loadDB.clicked.connect(self.loadDB)
73         self.pushButton_importDB.clicked.connect(self.import_excel_to_sqlite)
74
75         self.pushButton_searchDB.setDisabled(True)
76         self.tableWidget.setDisabled(True)
77         self.groupBox_firstCheck.setDisabled(True)
78         self.groupBox_firstCheck.setVisible(False)
79         self.pushButton_firstCheck.setDisabled(True)
80         self.pushButton_editDB.setDisabled(True)
81
82         self.groupBox_result.setVisible(False)
83         self.groupBox_secondSearch.setVisible(False)
84         self.resize(500, 0)
85
86
87         # Löschung von temp. Daten
88         if os.path.exists('tmp2.tmp'):
89             os.remove('tmp2.tmp')
90
91         self.alreadysearched = 0
92
93     def import_excel_to_sqlite(self):
94         # Dateiauswahldialog für Excel-Datei öffnen
95         file_path, _ = QFileDialog.getOpenFileName(None, "Excel-Datei auswählen", "", "Excel-Dateien (*.xlsx)")
96         # Excel-Datei in ein pandas-DataFrame laden
97         try:
98             df = pd.read_excel(file_path)
99         except Exception as e:
100             # ggf. Fehlermeldung als Fenster ausgeben
101             QMessageBox.critical(None, "Fehler beim Laden der Excel-Datei", "Fehlerhaftes Format der Excel-Datei.")
102             print("Fehler beim Laden der Excel-Datei.\n" + str(e))
103             return
104
105         # Speicherdialog für SQLite-Datenbank öffnen
106         db_path, _ = QFileDialog.getSaveFileName(None, "Datenbank speichern", "", "SQLite-Datenbank (*.db)")
107
108         # Mit der SQLite-Datenbank verbinden
109         try:
110             conn = sqlite3.connect(db_path)
111         except Exception as e:
112             # Fehlermeldung als Fenster ausgeben

```

```

113     QMessageBox.critical(None, "Fehler beim Herstellen der Verbindung zur SQLite-Datenbank", str(e))
114     return
115
116     # Datentypen der Spalten basierend auf den Regeln anpassen
117     for col in df.columns:
118         if "Regel 1" in col or "Regel 2" in col or "Regel 6" in col:
119             try:
120                 df[col] = df[col].astype(float)
121             except Exception as e:
122                 # ggf. Fehlermeldung als Fenster ausgeben
123                 QMessageBox.critical(None, "Fehler beim Ändern des Datentyps für die Spalte " + col, str(e))
124                 return
125         elif "Regel 3" in col or "Regel 4" in col or "Regel 5" in col:
126             try:
127                 df[col] = df[col].astype(str)
128             except Exception as e:
129                 # ggf. Fehlermeldung als Fenster ausgeben
130                 QMessageBox.critical(None, "Fehler beim Ändern des Datentyps für die Spalte " + col, str(e))
131                 return
132
133     # Das Dataframe in eine SQLite-Tabelle mit den angepassten Datentypen konvertieren
134     try:
135         df.to_sql('Datenbank', conn, if_exists='replace', index=False,
136                  dtype={'Regel 1': 'REAL DEFAULT 0', 'Regel 2': 'REAL DEFAULT 0',
137                        'Regel 3': 'TEXT DEFAULT "0"', 'Regel 4': 'TEXT DEFAULT "0"',
138                        'Regel 5': 'TEXT DEFAULT "0"', 'Regel 6': 'REAL DEFAULT 0'})
139     except Exception as e:
140         # ggf. Fehlermeldung als Fenster ausgeben
141         QMessageBox.critical(None, "Fehler beim Konvertieren des Dataframes in eine SQLite-Tabelle", str(e))
142         return
143
144     # Die Verbindung zur Datenbank schließen
145     conn.close()
146     print(str(db_path))
147     self.dbpath = db_path
148     self.load()
149
150     # Datenbank wird hier erstellt. Ein Dialog öffnet sich, um Dateinamen eingeben zu können
151     def createDB(self):
152         self.dbpath, _ = QFileDialog.getSaveFileName(None, "Save as DB", "database.db",
153                                                    "DB-File (*.db)")
154         print(self.dbpath)
155
156     # Wenn Datei bzw. Pfad erfolgreich erstellt worden ist, dann aktiviere Buttons
157     if self.dbpath:
158         self.pushButton_firstCheck.setDisabled(False)
159         self.pushButton_editDB.setDisabled(False)
160         self.activateWindow()
161
162     #Löschung der Datei, falls existent
163     if os.path.exists(self.dbpath):
164         os.remove(self.dbpath)

```

```

165 # .....connect/create database.....
166 # Im folgenden wird die Datenbank erstellt und mit den unteren Daten initialisiert
167 db_conn = sqlite3.connect(self.dbpath)
168 c = db_conn.cursor() # cursor
169
170 # Füge in die Datenbank ein: Prozess (Typ = Text, Default = Prozess_Bezeichnung), Bild (Typ = Text, Default = none),
171 # Material (Typ = Text, Default = Material_Bezeichnung), Preis (Typ = REAL, Default = 0)
172 c.execute(
173     'CREATE TABLE "Datenbank" (Prozess TEXT DEFAULT "Prozess_Bezeichnung", Bild TEXT DEFAULT "none")')
174 db_conn.commit()
175 db_conn.close() # schliesse die DB
176 self.dbpath() # siehe dbPath()
177 QMessageBox.about(self, "Hinweis",
178     "Neue Datenbank wurde erstellt. Um eine Suche starten zu können, müssen Sie Features und Prozesse hinzufügen.")
179 self.buttonPressed2.database() # öffne Datenbankansicht, da keine Daten enthalten sind
180 self.pushButton_loadDB.setVisible(False)
181 self.pushButton_loadDB.setVisible(False)
182
183 # Falls button "Datenbank laden" geklickt wird, so öffnet sich ein Dialog um die DB zu öffnen
184 def loadDB(self):
185     self.dbpath, _ = QFileDialog.getOpenFileName(None, "Open DB-Database", "",
186         "Database (*.db);; Alle Dateien (*.*)"
187     )
188     if self.dbpath:
189         self.load()
190
191 # Falls "Datenbank laden" geklickt oder die Datenbank erfolgreich erstellt worden ist, dann:
192 def load(self):
193
194     self.groupBox_firstCheck.setDisabled(False)
195     self.groupBox_firstCheck.setVisible(True)
196     self.pushButton_searchDB.setDisabled(False)
197     self.pushButton_newDatabase.setVisible(False)
198     self.pushButton_loadDB.setVisible(False)
199     self.pushButton_importDB.setVisible(False)
200     self.pushButton_editDB.setText("Datenbank bearbeiten")
201
202     self.pushButton_firstCheck.setDisabled(False)
203     self.pushButton_editDB.setDisabled(False)
204     self.dbPath() # siehe dbPath()
205
206 # verbinde mit datenbank
207 table = 'Datenbank'
208 db_conn = sqlite3.connect(self.dbpath)
209 c = db_conn.cursor() # cursor
210
211 self.df = pd.read_sql_query("SELECT * FROM Datenbank", db_conn)
212 self.row_count = self.df.shape[0] # Returns number of rows
213 self.col_count = self.df.shape[1] # Returns number of columns
214 self.arr = np.zeros((self.row_count, self.col_count))
215
216
217
218
219

```

```

220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271

# lese die erste zeile (spaltennamen) aus, um die Bezeichnungen zu finden
# bsp.: ['Prozess', 'Bild', 'Material', 'Preis', 'Länge (mm) [FirstCheck]', 'Breite (mm) [FirstCheck]', 'Höhe (mm) [FirstCheck]']
column_list = list(pd.read_sql_query(f"SELECT * FROM {table} limit 1", db_conn).columns)

# print(len(column_list)) # anzahl der liste
# print(column_list[0]) # an der stelle 0
# print(column_list[:3]) # schneide nach der dritten
# print(column_list[:3]) # schneide die letzten drei
# print(column_list[3:]) # schneide nach ersten drei

# listen werden initialisiert
list_added_Rs = []
self.list_value_forFirstCheck_search = []
self.list_value_for1_search = []
self.list_value_for2_search = []
self.list_value_for3_search = []
self.list_value_for4_search = []
self.list_value_for5_search = []
self.list_value_for6_search = []

####firstcheck lists
self.list_value_forR1FC_search = []
self.list_value_forR2FC_search = []
self.list_value_forR3FC_search = []
self.list_value_forR4FC_search = []
self.list_value_forR5FC_search = []
self.list_value_forR6FC_search = []

# falls eine datenbank bereits geladen worden ist, so lösche alle Elemente in den Layouts, damit die Positionen stimmen.
# Positionen sind wichtig, da alles dynamisch ist
for i in reversed(range(self.verticalLayout.count())):
    self.verticalLayout.itemAt(i).widget().setParent(None)
for i in reversed(range(self.verticalLayout_3.count())):
    self.verticalLayout_3.itemAt(i).widget().setParent(None)
for i in reversed(range(self.verticalLayout_19.count())):
    self.verticalLayout_19.itemAt(i).widget().setParent(None)
for i in reversed(range(self.verticalLayout_20.count())):
    self.verticalLayout_20.itemAt(i).widget().setParent(None)
for i in reversed(range(self.verticalLayout.count())):
    self.verticalLayout.itemAt(i).widget().setParent(None)

# if len(column_list) > 16: # alles neue danach (zählt ignorieren)
i = 0 # zu speichernde Position
i_first = 0 # zu speichernde Position für die Regeln
start_rule = 0 # zu speichernde Position in FirstCheck
print("-----Liste column_list:-----")
print(column_list)

```



```
self.combo_xx = CheckableComboBox()
# entnehme die Daten der Zelle
sqlsearch_nichtbest = 'SELECT "' + element + '" from Datenbank'
c.execute(sqlsearch_nichtbest)
result = str(c.fetchall())
# wandle Ergebnis für die Weiterverarbeitung um
strippedText = str(result).replace('(', '').replace(')', '').replace("'", "").replace('"').replace(
    '\n', '').replace(' ', '')
listRes = list(strippedText.split(", "))
listRes = list(dict.fromkeys(listRes)) # füge die Daten in listRes ein

# füge Daten in die ComboBox ein
for elements in listRes:
    self.combo_xx.addItem(elements)

self.verticalLayout.addWidget(self.combo_xx)
self.verticalLayout_3.addWidget(QtWidgets.QLabel(labelstring[:start_einheit - 1]))
self.combo_xx.setEditable(True)
self.combo_xx.setCurrentText("")
i_first += 1

if labelstring[start_rule:] == "[Regel 4FC]":
    self.list_value_forR4FC_search.append(i_first)
    self.list_value_forR4FC_search.append(element)
    list_added_Rs.append(element)
    #####
    removespace = 'UPDATE DATENBANK SET "' + element + '" = replace("'" + element + "'", " ", "")'
    addcomma = 'UPDATE DATENBANK SET "' + element + '" = replace("'" + element + "'", ",", "")'
    c.execute(removespace)
    c.execute(addcomma)
    db_conn.commit()
    #####
    self.combo_yy = CheckableComboBox()
    sqlsearch_okkriterium = 'SELECT "' + element + '" from Datenbank'
    c.execute(sqlsearch_okkriterium)
    result = str(c.fetchall())
    strippedText = str(result).replace('(', '').replace(')', '').replace("'", "").replace('"').replace(
        '\n', '').replace(' ', '')
    listRes = list(strippedText.split(", "))
    listRes = list(dict.fromkeys(listRes))

    for elements in listRes:
        self.combo_yy.addItem(elements)
```

```

378
379 self.verticalLayout.addWidget(self.combo_yy)
380 self.verticalLayout_3.addWidget(QtWidgets.QLabel(labelstring[:start_einheit - 1]))
381 self.combo_yy.setEditable(True)
382 self.combo_yy.setCurrentText("")
383 i_first += 1
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431

```

```

if labelstring[start_rule:] == "[Regel 5FC]":
    self.list_value_for5FC_search.append(i_first)
    self.list_value_for5FC_search.append(element)
    list_added_Rs.append(element)
    self.verticalLayout_3.addWidget(QtWidgets.QLabel(labelstring[:start_einheit - 1]))
    self.verticalLayout.addWidget(QtWidgets.QComboBox())
    comboboxxx = self.verticalLayout.itemAt(i_first).widget()
    if isinstance(comboboxxx, QtWidgets.QComboBox):
        comboboxxx.addItem("Ja")
        comboboxxx.addItem("Nein")
        comboboxxx.setCurrentIndex(-1)
    i_first += 1

if labelstring[start_rule:start_rule + 11] == "[Regel 6FC]":
    self.list_value_for6FC_search.append(i_first)
    self.list_value_for6FC_search.append(element)
    list_added_Rs.append(element)
    self.verticalLayout_3.addWidget(QtWidgets.QLabel(labelstring[:start_einheit - 1]))
    self.verticalLayout.addWidget(QtWidgets.QLineEdit())
    self.item_left = self.verticalLayout.itemAt(i_first).widget()
    if isinstance(self.item_left, QtWidgets.QLineEdit):
        self.item_left.setPlaceholderText(labelstring[start_einheit + 1:start_rule - 2])
        self.item_left.setValidator(QDoubleValidator(0, 1000000000, 8))
    i_first += 1

#####

# Wenn es sich bei dem labelstring an position start_rule es sich um die Regel FirstCheck handelt, so füge es der entsprechenden Liste an und
# füge den entsprechenden Layouts in der GUI die Elemente zu (Label und QLineEdit)
if labelstring[start_rule:] == "[FirstCheck]":
    self.list_value_forFirstCheck_search.append(
        i_first) # im ersten Durchlauf handelt es sich um die Position 0
    self.list_value_forFirstCheck_search.append(
        element) # "Länge (mm) [FirstCheck]", "Breite (mm) [FirstCheck]" usw. (laut obigem Bsp)
    list_added_Rs.append(element)
    self.verticalLayout_3.addWidget(QtWidgets.QLabel(labelstring[:start_einheit - 1]))
    self.verticalLayout.addWidget(QtWidgets.QLineEdit())
    self.item_left = self.verticalLayout.itemAt(i_first).widget()
    # --> dasselbe passiert in den folgenden listen auch, nur für die entsprechenden Regeln und positionen
    if isinstance(self.item_left, QtWidgets.QLineEdit):
        self.item_left.setPlaceholderText(labelstring[start_einheit + 1:start_rule - 2])
        self.item_left.setValidator(QDoubleValidator(0, 1000000000, 8))
    i_first += 1

```

Year	Value
432	432
433	433
434	434
435	435
436	436
437	437
438	438
439	439
440	440
441	441
442	442
443	443
444	444
445	445
446	446
447	447
448	448
449	449
450	450
451	451
452	452
453	453
454	454
455	455
456	456
457	457
458	458
459	459
460	460
461	461
462	462
463	463
464	464
465	465
466	466
467	467
468	468
469	469
470	470
471	471
472	472
473	473
474	474
475	475
476	476
477	477
478	478
479	479
480	480
481	481
482	482


```

538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594

        comboBoxxx.setCurrentIndex(-1)
        i += 1

        if labelstring[start_rule:start_rule + 9] == "Regel 6":
            self.list_value_forR6_search.append(i)
            self.list_value_forR6_search.append(element)
            list_added_R6.append(element)
        self.verticalLayout_19.addWidget(QWidget(labelstring[start_einheit - 1]))
        self.verticalLayout_20.addWidget(QWidget(i))
        self.item_left = self.verticalLayout_20.itemAt(i).widget()
        if isinstance(self.item_left, QWidget.QLineEdit):
            self.item_left.setPlaceholderText(labelstring[start_einheit + 1:start_rule - 2])
            self.item_left.setValidator(QDoubleValidator(0, 1000000000, 8))
            i += 1

# printe alle Listen im Terminal aus
print("-----Alle Regeln-Listen:-----")

print("Anzahl verticalLayout 3 : " + str(self.verticalLayout_3.count()))
print(str(self.list_value_forR1C_search) + " ----Liste R1C")
print(str(self.list_value_forR2C_search) + " ----Liste R2C")
print(str(self.list_value_forR3C_search) + " ----Liste R3C")
print(str(self.list_value_forR4C_search) + " ----Liste R4C")
print(str(self.list_value_forR5C_search) + " ----Liste R5C")
print(str(self.list_value_forR6C_search) + " ----Liste R6C")

print("Anzahl verticalLayout 19 : " + str(self.verticalLayout_19.count()))
print(str(self.list_value_forFirstCheck_search) + " ----Liste R1")
print(str(self.list_value_forR1_search) + " ----Liste R1")
print(str(self.list_value_forR2_search) + " ----Liste R2")
print(str(self.list_value_forR3_search) + " ----Liste R3")
print(str(self.list_value_forR4_search) + " ----Liste R4")
print(str(self.list_value_forR5_search) + " ----Liste R5")
print(str(self.list_value_forR6_search) + " ----Liste R6")

# wenn die liste "list_value_forFirstCheck_search" keine Features hat, so werden die Buttons in der GUI angepasst mit Rückmeldung
if len(column_list) == 2:
    self.groupBox_firstCheck.setVisible(False)
    self.groupBox_secondSearch.setVisible(False)
    self.pushButton_editDB.setText("Datenbank enthält keine Features - Bitte ergänzen")
elif not self.list_value_forR1C_search and not self.list_value_forR2C_search and not self.list_value_forR3C_search and not self.list_value_forR4C_search:
    self.groupBox_firstCheck.setVisible(False)
    self.pushButton_editDB.setText("Datenbank enthält keine Features mit der Regel FirstCheck - Bitte ergänzen")
    self.groupBox_secondSearch.setVisible(True)

def firstcheck(self):
    self.missingInput = 0
    self.finalsql = "SELECT * FROM Datenbank WHERE" # SQL-Suche, Grundsuche, der alles zugefügt wird
    db_conn = sqlite3.connect(self.dbpath) # db einbinden
    c = db_conn.cursor() # cursor

```

```

595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651

```

```

if self.list_value_forR1FC_search:

    i = 1
    for item in self.list_value_forR1FC_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QLineEdit):
                if self.item_right.text() == "":
                    print("Item ist leer.")
                    self.item_right.setStyleSheet("border: 1px solid red;")
                    self.missingInput = 1
                    i += 2
                else:
                    self.item_right.setStyleSheet("")
                    item_entered_value = self.item_right.text().replace(',', '.')
                    item_entered_value = float(item_entered_value)
                    item_get_max_sql = 'SELECT MAX(' + self.list_value_forR1FC_search[
                        i] + ') FROM DATENBANK'
                    item_max_sql_df = pd.read_sql_query(item_get_max_sql, db_conn)
                    item_max_value = item_max_sql_df.iat[0, 0]
                    item_text = ' AND (' + self.list_value_forR1FC_search[
                        i] + ' BETWEEN ' + str(item_entered_value) + ' AND ' + str(item_max_value) + ')'
                    self.finalsql = "".join((self.finalsql, item_text))

                    for index, row in self.df.iterrows():
                        # mindestens -- wert -- max
                        if item_entered_value <= row[self.list_value_forR1FC_search[i]] <= item_max_value:
                            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR1FC_search[i])
                            self.arr[index, value] = 1
                        else:
                            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR1FC_search[i])
                            self.arr[index, value] = -1

                    #####

                    i += 2

# selber Ablauf wie FirstCheck
if self.list_value_forR2FC_search:
    i = 1
    for item in self.list_value_forR2FC_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QLineEdit):
                if self.item_right.text() == "":
                    print("Item ist leer.")
                    self.item_right.setStyleSheet("border: 1px solid red;")
                    self.missingInput = 1
                    i += 2
                else:
                    self.item_right.setStyleSheet("")
                    print(self.item_right.text())
                    item_entered_value = self.item_right.text().replace(',', '.')
                    item_entered_value = float(item_entered_value)

```

```

652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704

item_text = ' AND (' + self.list_value_forR2FC_search[
    i] + ' BETWEEN 0 AND ' + str(item_entered_value) + ')'
self.finalsq = "".join((self.finalsq, item_text))

for index, row in self.df.iterrows():
    # mindestens -- wert -- max
    if 0 <= item_entered_value + 1 <= row[self.list_value_forR2FC_search[i]]:
        # ***print(row[self.list_value_forR1FC_search[i]])
        value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR2FC_search[i])
        self.arr[index, value] = -1
    else:
        value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR2FC_search[i])
        self.arr[index, value] = 1

####

i += 2

# selber Ablauf
if self.list_value_forR3FC_search:
    for item in self.list_value_forR3FC_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout.itemAt(item).widget()
            self.item_right.setStyleSheet("border: 1px solid red;")
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QComboBox):
                for i in range(self.item_right.count()):
                    if self.item_right.itemChecked(i) == True:
                        self.item_right.setStyleSheet("")
                        self.item_right.setCurrentIndex(i)
                        pos = (self.list_value_forR3FC_search.index(item) + 1)
                        item_text = ' AND (' + str(self.list_value_forR3FC_search[
                            pos]) + ' NOT LIKE "%'" + self.item_right.currentText() + '%"')
                        self.finalsq = "".join((self.finalsq, item_text))

                for index, row in self.df.iterrows():
                    if row[self.list_value_forR3FC_search[
                        pos]] != None and self.item_right.currentText() in row[
                        self.list_value_forR3FC_search[pos]]:
                        # ***print(row[self.list_value_forR1FC_search[i]])
                        value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR3FC_search[pos])
                        self.arr[index, value] = -1
                    else:
                        value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR3FC_search[pos])
                        if self.arr[index, value] == -1:
                            self.arr[index, value] = -1
                        else:
                            self.arr[index, value] = 1

                ####

```

```

705
706 # selber Ablauf
707 if self.list_value_forR4FC_search:
708     for item in self.list_value_forR4FC_search:
709         if type(item) == int:
710             self.item_right = self.verticalLayout.itemAt(item).widget()
711             self.item_right.setStyleSheet("border: 1px solid red;")
712             if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QComboBox):
713                 for i in range(self.item_right.count()):
714                     if self.item_right.itemChecked(i) == True:
715                         self.item_right.setStyleSheet("")
716                         self.item_right.setCurrentIndex(i)
717                         pos = (self.list_value_forR4FC_search.index(item) + 1)
718                         item_text = ' AND (' + str(self.list_value_forR4FC_search[
719                             pos]) + ' LIKE "%' + self.item_right.currentText() + '%" )'
720                         self.finalsq = "".join((self.finalsq, item_text))
721
722                 for index, row in self.df.iterrows():
723                     if row[self.list_value_forR4FC_search[
724                         pos]] != None and self.item_right.currentText() in row[
725                         self.list_value_forR4FC_search[pos]]:
726                         value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR4FC_search[pos])
727                         if self.arr[index, value] == -1:
728                             self.arr[index, value] = -1
729                         else:
730                             self.arr[index, value] = 1
731                     else:
732                         value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR4FC_search[pos])
733                         self.arr[index, value] = -1
734
735 #####
736
737 # selber Ablauf
738 if self.list_value_forR5FC_search:
739     i = 1
740     for item in self.list_value_forR5FC_search:
741         if type(item) == int:
742             self.item_right = self.verticalLayout.itemAt(item).widget()
743             if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QComboBox):
744                 if self.item_right.currentIndex() == -1:
745                     self.item_right.setStyleSheet("border: 1px solid red;")
746                     self.missingInput = 1
747                 if self.item_right.currentIndex() == 0:
748                     self.item_right.setStyleSheet("")
749                     item_text = ' AND (' + self.list_value_forR5FC_search[i] + ' like "%ja%" )'
750                     self.finalsq = "".join((self.finalsq, item_text))
751
752                 for index, row in self.df.iterrows():
753                     if row[self.list_value_forR5FC_search[i]] != None and "ja" in str(
754                         row[self.list_value_forR5FC_search[i]].lower()):
755                         value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR5FC_search[i])
756                         self.arr[index, value] = 1
757                     else:
758                         value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR5FC_search[i])
759                         self.arr[index, value] = -1
760 #####

```

A box plot showing the distribution of the number of children per family in the 1990s. The x-axis is labeled 'Number of children' and ranges from 0 to 16. The plot shows a right-skewed distribution with a median of 2. The interquartile range (IQR) is from 1 to 3. Whiskers extend from 0 to 15. There are several outliers represented by individual points at 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827,

```

817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871

    multiplier = "1." + str(tolernanz_value)
    item_max2_value = item_entered_value * float(multiplier)
    item_text = ' AND (' + self.list_value_forReFC_search[i] + " BETWEEN ' + str(
        item_min_value) + ' AND ' + str(item_max2_value) + ') '
    self.finalesql = "".join(self.finalesql, item_text)

    for index, row in self.df.iterrows():
        # mindestens -- wert -- max
        if round(row[self.list_value_forReFC_search[i]] / 100 * (100 - toleranz_value),
            5) <= item_entered_value <= round(
                row[self.list_value_forReFC_search[i]] / 100 * (100 + toleranz_value), 5):
            # if item_min_value <= row[self.list_value_forReFC_search[i]] <= item_max2_value:
            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forReFC_search[i])
            self.arr[index, value] = 1
        else:
            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forReFC_search[i])
            self.arr[index, value] = -1

    #####
    i += 2

if self.missingInput == 0:
    self.andDeleter()
    c.execute(self.finalesql) # führe SQL aus
    result = c.fetchall()
    #####CREATE COPY DATABASE WITH NEW RESULTS#####
    #Neue Tabelle --> Tabelle ohne FirstCheck Anschluss
    self.commandcopy = 'copy "' + self.dbpath + '" "' + self.dbpath + '.Dbcopy"'
    self.commandtocopy = self.commandcopy.replace("/", "\\")

    ###Löschen falls vorhanden
    if os.path.exists(self.dbpath + '.Dbcopy'):
        os.remove(self.dbpath + '.Dbcopy')
    #####
    os.popen(self.commandtocopy)
    db_conn_copy = sqlite3.connect(self.dbpath + '.Dbcopy')
    ccopy = db_conn_copy.cursor()

    whilebreaker = 0
    while True:
        try:
            ccopy.execute("DELETE FROM Datenbank")
            break
        except Exception as e:
            time.sleep(1)
            whilebreaker += 1
            if whilebreaker == 10:
                QMessageBox.about(self, "Fehler copy", "Applikation muss beendet werden.") #wenn das kommt, dann existiert Table Datenbank nicht, siehe output von str(e)
                sys.exit()

    continue

```

```

872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926

#Leere Tabelle muss zunächst mit '?' gefüllt werden,
#sodass das Format der zu kopierenden Tabelle gleich ist
fragezeichenkette = ""
hinzuuegen = "?"
for i in range(0, self.col_count):
    fragezeichenkette = "".join((fragezeichenkette, hinzuuegen))
sql_statement = "INSERT INTO Datenbank VALUES (' + fragezeichenkette[:-2] + ')"
copy.executeMany(sql_statement, result)

db.conn_copy.commit()
db.conn_copy.close()

#####
self.alreadysearched = 0
if result: # falls Ergebnis vorhanden
    self.groupBox_secondsearch.setEnabled(False)
    self.groupBox_search.setEnabled(True)
    self.pushButton_search.setEnabled(False)
    self.pushButton_suche()
    self.pushButton_firstCheck.setEnabled(False)
    if not result: # falls kein Ergebnis vorhanden
        self.pushButton_firstCheck.setEnabled(True)
        self.groupBox_result.setEnabled(False)
        self.groupBox_secondsearch.setEnabled(False)
        QMessageBox.about(self, "Hinweis",
            "Mit Ihren Eingaben wurden keine Prozesse gefunden.")

def buttonpressed_suche(self):
    ##neu:
    self.air = np.zeros((self.row_count, self.col_count))
    #####
    self.groupBox_result.setEnabled(True)
    self.alreadysearched = 1:
    if not self.list_value_forBFC_search and not self.list_value_forBFC_search and not self.list_value_forBFC_search and not self.list_value_forBFC_search:
        self.alreadysearched = 0
        self.buttonpressed_suche()
    else:
        self.firstcheck()
    $ .....connect database.....

```

```

926 # '.....'connect database'.....'
927 db_conn = sqlite3.connect(self.dbpath) # db verbinden
928 c = db_conn.cursor() # cursor
929
930 # selber Ablauf wie FirstCheck
931 if self.list_value_forR1_search:
932     i = 1
933     for item in self.list_value_forR1_search:
934         if type(item) == int:
935             self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
936             if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QLineEdit):
937                 if self.item_right.text() == "":
938                     print("Item ist leer.")
939                     i += 2
940                 else:
941                     item_entered_value = self.item_right.text().replace(',', '.')
942                     item_entered_value = float(item_entered_value)
943                     item_get_max_sql = 'SELECT MAX("' + self.list_value_forR1_search[
944                         i] + '" ) FROM DATENBANK'
945                     item_max_sql_df = pd.read_sql_query(item_get_max_sql, db_conn)
946                     item_max_value = item_max_sql_df.iat[0, 0]
947                     item_text = ' AND (" + self.list_value_forR1_search[
948                         i] + "' BETWEEN ' + str(item_entered_value) + ' AND ' + str(item_max_value) + ' )'
949
950                     print(self.list_value_forR1_search[i])
951                     for index, row in self.df.iterrows():
952                         # mindestens -- wert -- max
953                         if item_entered_value <= row[self.list_value_forR1_search[i]] <= item_max_value:
954                             value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR1_search[i])
955                             self.arr[index, value] = 1
956                         else:
957                             value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR1_search[i])
958                             self.arr[index, value] = -1
959                     i += 2
960
961 # selber Ablauf wie FirstCheck
962 if self.list_value_forR2_search:
963     i = 1
964     for item in self.list_value_forR2_search:
965         if type(item) == int:
966             self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
967             if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QLineEdit):
968                 if self.item_right.text() == "":
969                     print("Item ist leer.")
970                     i += 2
971                 else:
972                     print(self.item_right.text())
973                     item_entered_value = self.item_right.text().replace(',', '.')
974                     item_entered_value = float(item_entered_value)
975                     item_text = ' AND (" + self.list_value_forR2_search[
976                         i] + "' BETWEEN 0 AND ' + str(item_entered_value) + ' )'
977                     for index, row in self.df.iterrows():
978                         # mindestens -- wert -- max
979                         if 0 <= item_entered_value + 1 <= row[self.list_value_forR2_search[i]]:
980                             value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR2_search[i])
981                             self.arr[index, value] = -1

```

```

982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038

else:
    value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR2_search[i])
    self.arr[index, value] = 1

####
i += 2

# selber Ablauf
if self.list_value_forR3_search:
    for item in self.list_value_forR3_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QComboBox):
                for i in range(self.item_right.count()):
                    if self.item_right.itemChecked(i) == True:
                        self.item_right.setCurrentIndex(i)
                        pos = (self.list_value_forR3_search.index(item) + 1)
                        item_text = ' AND (' + str(self.list_value_forR3_search[
                            pos]) + ' NOT LIKE "%' + self.item_right.currentText() + '%"')

                        for index, row in self.df.iterrows():
                            if row[self.list_value_forR3_search[
                                pos]] != None and self.item_right.currentText() in row[
                                    self.list_value_forR3_search[pos]]:
                                value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR3_search[pos])
                                self.arr[index, value] = -1
                            else:
                                value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR3_search[pos])
                                if self.arr[index, value] == -1:
                                    self.arr[index, value] = -1
                                else:
                                    self.arr[index, value] = 1

                        ####

# selber Ablauf
if self.list_value_forR4_search:
    for item in self.list_value_forR4_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QComboBox):
                for i in range(self.item_right.count()):
                    if self.item_right.itemChecked(i) == True:
                        self.item_right.setCurrentIndex(i)
                        pos = (self.list_value_forR4_search.index(item) + 1)
                        item_text = ' AND (' + str(self.list_value_forR4_search[
                            pos]) + ' LIKE "%' + self.item_right.currentText() + '%"')

                        for index, row in self.df.iterrows():
                            if row[self.list_value_forR4_search[
                                pos]] != None and self.item_right.currentText() in row[
                                    self.list_value_forR4_search[pos]]:
                                value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR4_search[pos])
                                if self.arr[index, value] == -1:
                                    self.arr[index, value] = -1
                                else:
                                    self.arr[index, value] = 1

```

```

1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095

else:
    value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR4_search[pos])
    self.arr[index, value] = -1

#####

# selber Ablauf
if self.list_value_forR5_search:
    i = 1
    for item in self.list_value_forR5_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QComboBox):
                if self.item_right.currentIndex() == 0:
                    item_text = ' AND (' + self.list_value_forR5_search[i] + ' like "%ja%"'

                    for index, row in self.df.iterrows():
                        if row[self.list_value_forR5_search[i]] != None and "ja" in str(
                            row[self.list_value_forR5_search[i]]).lower():
                            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR5_search[i])
                            self.arr[index, value] = 1
                        else:
                            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR5_search[i])
                            self.arr[index, value] = -1
                    #####

                if self.item_right.currentIndex() == 1:
                    item_text = ' AND (' + self.list_value_forR5_search[i] + ' like "%nein%" or "'
                    # self.finalsq = "".join((self.finalsq, item_text))

                    #####neu // terminalausgabe
                    for index, row in self.df.iterrows():
                        if row[self.list_value_forR5_search[i]] != None and "nein" in str(
                            row[self.list_value_forR5_search[i]]).lower():
                            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR5_search[i])
                            self.arr[index, value] = 1
                        else:
                            value = self.df.columns.get_loc(self.list_value_forR5_search[i])
                            self.arr[index, value] = -1

                    i += 2

        i += 2

if self.list_value_forR6_search:
    i = 1
    for item in self.list_value_forR6_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, QtWidgets.QLineEdit):
                if self.item_right.text() == "":
                    print("Item ist leer.")
                    i += 2
                else:
                    # hier der Unterschied, dass wir vom Spaltennamen die Tolernaz auslesen müssen.
                    # dazu lesen wir den string von hinten aus und suchen die
                    # position des "*", um den Wert ablesen zu können, der sich dazwischen befindet
                    skip = 0 # von hinten die Toleranz auslesen, wegen slicing
                    for symbol in reversed(range(len(self.list_value_forR6_search[i]))):
                        if self.list_value_forR6_search[i][symbol] == "*":

```



```

1152
1153 # sortiere die Resultate nach der summe aus dem array arr indem sie in ein tuple gepackt werden und man das tuple sortiert
1154 # dadurch sind folglich auch die resultate nach demselben schema sortiert
1155 result = [x for _, x in sorted(zip(self.arr, result), key=lambda x: x[0].sum(), reverse=True)]
1156 self.arr = np.array(sorted(self.arr, key=sum, reverse=True))
1157
1158 self.tableWidget.setDisabled(False) # blende die Tabelle ein
1159 # im restlichen wird die datenbank mit den ergebnissen dargestellt
1160 table = "Datenbank"
1161 self.tableWidget.setRowCount(0)
1162 self.tableWidget.setColumnCount(
1163     len(result[0])) # len(result[0]) --> anzahl spalten oder evtl len(c.description)
1164 self.tableWidget.setHorizontalHeaderLabels(
1165     list(psql.read_sql_query(f"SELECT * FROM {table} limit 1", db_conn).columns))
1166
1167 for row_number, row_data in enumerate(result):
1168     self.tableWidget.insertRow(row_number)
1169     for column_number, data in enumerate(row_data):
1170         self.tableWidget.setItem(row_number, column_number, QTableWidgetItem(str(data)))
1171
1172 # Farbe die Zeilen der Tabelle rot, die nicht der Regel entsprechen
1173 if (self.arr[row_number][column_number] == -1):
1174     self.tableWidget.setItem(row_number, column_number).setBackground(QColor(255, 0, 0))
1175
1176 # in der Tabelle wird an der zweiten stelle pro Zeile ein Button eingefügt, um die Grafik anzeigen zu können. Der Pfad dazu wird im
1177 # jeweiligen feld ausgeben, siehe Showpicture
1178 for index in range(row_number + 1):
1179     name = self.tableWidget.item(index, 1).text()
1180
1181     if name == "bilder/":
1182         name = "None"
1183         name = os.path.basename(name)
1184         self.btn_sell = QPushButton(name)
1185         self.btn_sell.clicked.connect(self.showPicture)
1186         self.tableWidget.setCellWidget(index, 1, self.btn_sell)
1187         self.tableWidget.resizeColumnsToContents()
1188
1189 if not result:
1190     self.tableWidget.clear()
1191     self.tableWidget.setRowCount(0)
1192     self.tableWidget.setColumnCount(0)
1193     self.tableWidget.setDisabled(True)
1194
1195 # Zeilen- bzw. Prozessanzahl der Tabelle "Datenbank"
1196 c.execute("select count(*) from Datenbank")
1197 countRow = c.fetchone()
1198 countRow = int(countRow[0])
1199
1200 db_conn.commit()
1201 db_conn.close()
1202 self.db_refresh()
1203
1204 print(self.arr)
1205
1206 #####
1207
1208

```

```

1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261

def showPicture(self):
    button = self.sender()
    index = self.tableWidget.indexAt(button.pos())
    if index.isValid():
        if self.tableWidget.item(index.row(), index.column()).text() == "Bilder/":
            QMessageBox.about(self, "Hinweis",
                              "Grafik konnte nicht gefunden werden. Bitte in der Datenbankansicht erneut hinzufügen.")
        else:
            pathofile = os.getcwd() + '/' + self.tableWidget.item(index.row(), index.column()).text()
            print(pathofile)
            try:
                os.startfile(pathofile)
            except FileNotFoundError:
                QMessageBox.about(self, "Hinweis",
                                  "Grafik konnte nicht gefunden werden. Bitte in der Datenbankansicht erneut hinzufügen.")

# Folgende Funktion stellt sicher, dass nach der Suche innerhalb der CheckBoxen alle Elemente angezeigt werden, die ausgewählt worden sind
def cb_refresh(self):
    for item in self.list_value_forR3_search:
        if type(item) == int:
            self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
            if isinstance(self.item_right, CheckableComboBox):
                for i in range(self.item_right.count()):
                    self.item_right.hidePopup()
            for item in self.list_value_forR4_search:
                if type(item) == int:
                    self.item_right = self.verticalLayout_20.itemAt(item).widget()
                    if isinstance(self.item_right, CheckableComboBox):
                        for i in range(self.item_right.count()):
                            self.item_right.hidePopup()

def buttonpressed2_database(self): # Zeige Datenbankansicht an
    self.w = MyWindow()
    self.w.window_closed.connect(self.load)
    self.w.show()

def dbPath(self): # speichert den Pfad zur DB in der tmp2.tmp
    with open('tmp2.tmp', 'w') as f:
        f.write(str(self.dbpath))

# der andDeleter löscht "AND" sofern an Stelle 30 vorhanden
def andDeleter(self):
    try:
        if self.finalsql[30] == "A":
            i = 1
            while i < 5:
                index = 30
                if len(self.finalsql) > index:
                    self.finalsql = self.finalsql[0: index] + self.finalsql[index + 1::]
                    i += 1
    except:
        print("String nicht vollständig..?")

```

```

1262 # ComboBox wird anlickbar gemacht
1263
1264 class CheckableComboBox(QComboBox):
1265     def __init__(self):
1266         super().__init__()
1267         self._changed = False
1268         self.view().pressed.connect(self.handleItemPressed)
1269
1270
1271     def setItemChecked(self, index, checked=False): # QStandardItem object
1272         item = self.model().item(index, self.modelColumn())
1273
1274         if checked:
1275             item.setCheckState(Qt.Checked)
1276         else:
1277             item.setCheckState(Qt.Unchecked)
1278
1279
1280     def handleItemPressed(self, index):
1281         item = self.model().itemFromIndex(index)
1282
1283         if item.checkState() == Qt.Checked:
1284             item.setCheckState(Qt.Unchecked)
1285         else:
1286             item.setCheckState(Qt.Checked)
1287             self._changed = True
1288
1289
1290     def hidePopup(self):
1291         if not self._changed:
1292             super().hidePopup()
1293             list = []
1294             for i in range(super().count()):
1295                 if self.itemChecked(i) == True:
1296                     self.setCurrentIndex(i)
1297                     list.append(self.currentText())
1298                     super().setCurrentText(str(list).replace('[', '').replace(']', '').replace("'", "")) # die ausgewählten Positionen der Liste werden nach schliessen der Checkbox angezeigt
1299
1300             # falls nichts ausgewählt, dann setCurrentText leer
1301             blabla = 0
1302             for i in range(super().count()):
1303                 if self.itemChecked(i) == False:
1304                     blabla += 1
1305                 if super().count() == blabla:
1306                     super().setCurrentText("")
1307                     self._changed = False
1308
1309
1310     def itemChecked(self, index):
1311         item = self.model().item(index, self.modelColumn())
1312         return item.checkState() == Qt.Checked
1313
1314
1315 if __name__ == "__main__":
1316     import sys
1317
1318     app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
1319     MainWindow = QtWidgets.QMainWindow()
1320
1321     window = SplashScreen()
1322     qtmodern.styles.light(app)

```

Anhang B

Datenbank Digitale Prozesskette

Instanzen		Datenbank-digitale Prozesskette für IMST						
Prozess	Kunststoff	Glasübergangstemperatur (°C)	E-Modul (N/m²)	Nicht-Besandigkeit	HF-Anwendung	Biokompatibilität	Kosten [€]	Losgröße [Stk.]
Rapid Tooling	ABS	-30 bis +55	2300	Nicht-Besandigkeit: konzentrierte Mineralsäuren, aromatische Kohlenwasserstoffe, Trichlorethylen	Ja	nein		20
Rapid Tooling	PC/ABS	-50 bis +90	2200	aromatische Kohlenwasserstoffe, oxidierende Säuren, Lauge, Aceton, Perchlorethylen, Trichlorethylen	Ja			20
Rapid Tooling	PC	-100 bis +125	2400	Lauge, Aceton, Benzin, helles Wasser, oxidierende Säuren, aromatische Kohlenwasserstoffe, Trichlorethylen, Perchlorethylen	Ja			20
Rapid Tooling	PET	-50 bis +100	2800	Aceton, konzentrierte Säuren u. Lauge, helles Wasser				20
Rapid Tooling	PPA	-30 bis +165	3800	oxidierende Säuren, starke organische und Mineralsäuren				20
Rapid Tooling	PA6	-40 bis +90	3000	starke Lauge, Phenole, Mineralsäuren	Ja			20
Rapid Tooling	PBT	-40 bis +140	2500	helles Wasser, Aceton, starke Lauge, Trichlorethylen, Oxidierende Säuren, starke organische Säuren				20
Rapid Tooling	PPO	-50 bis +105	2300	Aceton, Trichlorethylen, Perchlorethylen, Benzin, aromatische Kohlenwasserstoffe				20
Rapid Tooling	PPE	-30 bis +90	2300	Aceton, starke Lauge				20
Rapid Tooling	LCP	-200 bis 220	15000	starke Lauge, oxidierende Säuren				20
Rapid Tooling	PEI	-100 bis +170	3200	Oxidierende Säuren, Aceton, starke Lauge				20
Rapid Tooling	PEEK	-65 bis +240	3600	UV-Strahlung, konzentrierte Salpetersäure	Ja			20
Rapid Tooling	PET/PBT (Pocan)	-40 bis +200	12700	Aceton, Phenol, Perchlorethylen, starke Lauge			35	20
Rapid Tooling	LCP (Vectra)	-100 bis +260	9300			Ja	10	20
FDMLack	PLA	-10 bis +45	3800	UV-Bestrahlung, helles Wasser, Außeneinsatz, Aceton				10
FDMLack	PETG	-40 bis +65	2200	UV-Bestrahlung, starke Säuren, alkalische Lösungen, Phenol, helles Wasser			20	10
FDMLack	PC	-100 bis +125	2400	Benzin, Oxidierende Säuren, Lauge, Aceton, helles Wasser, Trichlorethylen	Ja		55	10
FDMLack	PMMA	-40 bis +90	3200	Benzolhaltiges Benzin, Spiritus, Nitrolack, Oxidierende Säuren, Lauge, Aceton			30	10
FDM	PC/ABS (Xantar)	-50 bis +90	2200	Aromatische Kohlenwasserstoffe, oxidierende Säuren, Lauge, Aceton, Perchlorethylen, Trichlorethylen	Ja			5

Anhang C

Datenbank Materialauswahl

	Biegefestigkeit [MPa]	Farbe	Wasseraufnahme in %	Dichte [g/cm³]	Mögliche Einsatztemperatur in °C	Nach DIN zugelassen Medizinprodukt	Beständigkeit Öl	Verarbeitung SPG Extrusion	Preis
Infino EF-1032	93	transparent	0,36	1,32	120	Ja	Nein	SPG	1,28 €
TEREZ PC 1005	98	transparent	0,1	1,23	160	Nein	Ja	SPG	1,34 €
Kostil B 266	82	natur	0,32	1,28	120	Ja	Ja	SPG	1,26 €
SINKRAL B532	98	natur	0,42	1,42	270	Nein	Nein	SPG	1,23 €
Starex SD-0150 U	82	Natur	0,6	1,21	120	Ja	Ja	SPG	2,34 €
Starex TX-0520T	85	Natur	0,12	1,31	140	Ja	Ja	SPG	4,32 €
TEREZ ASA 8010	92	Natur	0,14	1,28	280	Ja	Ja	SPG	4,34 €
Peek	120	natur	0,01	1,34	380	Ja	Ja	SPG	6,00 €
Ultrason 2900L	110	natur	0,014	1,32	360	Ja	Ja	SPG	4,56 €

Anhang D

Swim-Lane bzw. Lean-Development Darstellung des Pilotprojekts zur Ist-Analyse und Identifikation von Schwachstellen bei der Entwicklung und Herstellung eines iMST.

