

Entwicklung eines modellbasierten hybriden Vorgehensmodells im Kontext der virtuellen Produktentwicklung unter Adaption agiler Prozessmodelle

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Hendrik Schuck

Tag der mündlichen Prüfung:

09. März 2026

Erstgutachterin:

Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Karl Kleinmann

Kurzfassung

Der Produktentwicklungsprozess hat in den letzten Jahren einen starken Wandel erfahren. Ursachen hierfür sind die Globalisierung, der steigende Wettbewerb und immer komplexer werdende Produkte. Einstige Schwellenländer wie z. B. China haben in vielen Bereichen eine technologische Vorreiterrolle eingenommen. Die Themen Industrie 4.0 und die zunehmende Digitalisierung stellen dabei Erfolgsfaktoren dar. Die Entwicklung von hochkomplexen cyber-physischen Produkten oder Komponenten hält in vielen Unternehmensbereichen Einzug. Dies zeigt sich auch im Produktentwicklungsprozess. Der mechanische Anteil oder auch Kostenanteil der Komponenten eines Produkts in der Produktentwicklung sinkt immer weiter oder stagniert. Hingegen nimmt der Elektronik- und Softwareanteil immer weiter zu. Dies sorgt für eine zunehmende Interdisziplinarität im Produktentstehungsprozess. Das Aufeinandertreffen mehrerer Fachdisziplinen ist mittlerweile Alltag. Die Hintergründe und Alltagssprache der Entwickler der verschiedenen Disziplinen unterscheiden sich jedoch nach wie vor deutlich. Dies spiegelt sich auch in den Prozessen und insbesondere in den Methoden des Projektmanagements wider.

Eine weitere Herausforderung ist der sinkende Technologielebenszyklus bei steigender Produktkomplexität. Der Verbraucher fordert neue innovative Produkte, die die neuesten Technologiestandards beinhalten, sei es im Automobil- oder im Telekommunikationsbereich. Die Unternehmen stehen im massiven Wettbewerb zueinander, um die Anforderungen der Kunden in ihre zukünftigen Produkte zu integrieren. Der klassische Produktentwicklungsprozess kann diesen Anforderungen nicht mehr gerecht werden. Der Technologielebenszyklus ist oft deutlich kürzer als der Produktlebenszyklus. Dies führt dazu, dass der klassische Produktentwicklungsprozess zeitlich hinter den Anforderungen der Kunden zurückbleibt. Der Gewinner des zukünftigen Wettbewerbs ist derjenige, der die zukünftigen Bedürfnisse und Anforderungen der Kunden erkennt und diese in ein gut funktionierendes Produkt überführen sowie erfolgreich auf dem Markt etablieren kann.

Diese Herausforderungen erfordern eine neue Vorgehensweise und einen ganzheitlichen Produktentwicklungsprozess. Dieser muss nicht nur den Verbrauchern gerecht werden, sondern auch den neueren industriellen Entwicklungen, u. a. der Digitalisierung, standhalten. Die Digitalisierung hält dabei nicht nur Einzug in das Unternehmen, sondern betrifft auch in besonderem Maße den Kunden. Cyber-physische Produkte erzeugen kontinuierlich Daten bei Produzenten und Kunden. Die Analyse dieser Informationen kann erfolgsentscheidend sein und muss in Zukunft im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden.

Eine Möglichkeit, diese Herausforderung anzunehmen, ist ein Umdenken in zahlreichen Ebenen des Produktentwicklungsprozesses. Klassische statische Prozesse in Unternehmen müssen überdacht und dynamische iterative Prozesse etabliert werden. Auch die klassischen Zuständigkeiten oder Abteilungen sind davon betroffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine umfassende Methodik erarbeitet, die den genannten Herausforderungen gerecht werden soll. In Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit erfolgten, hat sich ergeben, dass ‚Rahmenwerk‘ ein passenderer Begriff wäre, da ein zu großer Detaillierungsgrad nicht sinnvoll ist. Des Weiteren werden in dieser Arbeit der aktuelle Stand der Technik sowie der Handlungsbedarf mit dessen Anforderungen aufgezeigt. Am Ende dieser Untersuchung wird die erarbeitete Methodik durch eine erste praktische Nutzung auf ihre Funktionsfähigkeit bzw. Anwendbarkeit überprüft, zudem erfolgt ein Ausblick auf den Produktentwicklungsprozess der Zukunft.

Abstract

The product development process has undergone significant changes in recent years. The driving forces behind this are globalization, increasing competition, and the growing complexity of products. Former developing countries such as China have taken a technological leadership role in many areas. Key success factors include the rapid adoption of technology and increasing digitalization, a process known as Industry 4.0.

The use of highly complex cyber-physical products or components by companies is reflected in the development process. The mechanical share, or cost share, of components in products is either stagnating or steadily decreasing, while the share of electronics and software continues to rise. This has led to an increasing level of interdisciplinarity in the product creation process. The intersection of multiple disciplines has become standard practice, yet the backgrounds and everyday language of developers from different fields still vary significantly. This is also reflected in the processes, and especially in the methods, of project management.

Another challenge is the shortening technology lifecycle, paired with increasing product complexity. Consumers demand new, innovative products that include the latest technological standards, whether in the automotive or telecommunications sectors. Companies are in fierce competition to integrate customer requirements into their future products, yet the traditional product development process can no longer meet these demands. As the technology lifecycle is often significantly shorter than the product lifecycle, the classical product development process lags behind customer expectations. The future winner in this competitive landscape will be the one who can anticipate customers' future needs and requirements, translate them into a well-functioning product, and successfully establish it in the market.

These challenges call for a new approach and a holistic product development process. This must not only cater to consumers but also keep pace with the latest industrial developments, including digitalization. Digitalization affects not only companies but also customers in particular. Cyber-physical products continuously generate data from both producers and customers. The analysis of this information could be decisive for success and must be integrated into the future product development process.

Addressing this challenge requires a shift in thinking across many levels of the product development process. Traditional static processes in companies must be reconsidered, and dynamic, iterative processes must be established. This shift also affects traditional responsibilities and departments.

This work presents a comprehensive methodology designed to address these challenges. Investigations conducted in the course of this study have revealed that the term “framework” would be more fitting, as excessive detail is not useful. In the course of this work, the current state of technology will be examined, along with the needs and requirements for action. At the conclusion of this paper, the developed methodology will be tested for its functionality and applicability through initial practical use, and an outlook on the future of the product development process will be provided.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xiv
Abkürzungsverzeichnis	xv
Vorwort	xvii
1 Einleitung.....	1
1.1 Herausforderung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1 Die Produktentstehung.....	9
2.1.1 Der Produktlebenszyklus.....	9
2.1.2 Technologielebenszyklus.....	11
2.1.3 Der Produktentstehungsprozess.....	12
2.1.4 Stage-Gate-Modell	15
2.1.5 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung.....	17
2.1.6 Prozesse	19
2.1.7 Prozessplanung im Produktentstehungsprozess.....	20
2.1.8 Produktverbesserung und Kundenfeedback.....	23
2.1.9 Projektmanagement	24
2.2 Produktentwicklung disziplinspezifisch	26
2.2.1 Softwareentwicklung	26
2.2.2 Maschinenbau.....	35
2.2.3 Elektrotechnik.....	37
2.2.4 Mechatronik.....	39
2.2.5 Cyber-physische Systeme.....	40
2.2.6 Interdisziplinarität.....	43
2.2.7 Kollaboration.....	44
2.3 Produktentwicklung interdisziplinär	45
2.3.1 Definition und Bedeutung der Interdisziplinarität	45
2.3.2 Herausforderungen in der interdisziplinären Produktentwicklung	46
2.3.3 Methoden und Modelle zur Förderung der Interdisziplinarität.....	46
2.3.4 Vorteile der interdisziplinären Produktentwicklung	47
2.4 Agile Vorgehensmodelle	47
2.4.1 Grundprinzipien agiler Vorgehensmodelle.....	48
2.4.2 Agile Methoden im Maschinenbau.....	48
2.4.3 Vorteile agiler Vorgehensmodelle im Maschinenbau.....	49

2.4.4	Herausforderungen der Implementierung agiler Methoden im Maschinenbau	49
2.5	Virtuelle Produktentwicklung.....	50
2.5.1	Definition und Ziele der virtuellen Produktentwicklung.....	51
2.5.2	Methoden und Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung	51
2.5.3	Virtual Engineering	52
2.5.4	Vorteile der virtuellen Produktentwicklung	53
2.5.5	Virtuelle Produktentwicklung und Front Loading.....	54
2.5.6	Produktdatenmanagement	57
2.6	Wissensmanagement.....	58
2.6.1	Zusammenhang von Daten, Informationen und Wissen.....	59
2.6.2	Der Wissenstransferprozess.....	61
2.6.3	Wissensmanagementmodelle.....	62
2.6.4	Informationstechnische Unterstützung für das Wissensmanagement.....	66
2.7	Change-Prozesse.....	68
2.7.1	Grundlagen des Change-Managements	68
2.7.2	Ursachen und Auslöser von Change-Prozessen.....	68
2.7.3	Change-Management im Kontext agiler und virtueller Produktentwicklung	69
2.7.4	Werkzeuge und Methoden zur Unterstützung des Change-Managements	70
2.7.5	Herausforderungen und Lösungen im Change-Management	70
2.8	Intelligente Systeme und ihre Integration in den Produktentwicklungsprozess.....	71
2.8.1	Definition und Arten intelligenter Systeme	71
2.8.2	Rolle intelligenter Systeme in der Produktentwicklung	72
2.8.3	KI-gestützte Entscheidungsfindung und Optimierung.....	73
2.8.4	Integration intelligenter Systeme in den virtuellen Produktentwicklungsprozess	74
3	Handlungsbedarf und abgeleitete Anforderungen	76
3.1	Handlungsbedarf aufgrund steigender Komplexität in der Produktentwicklung	76
3.2	Abgeleitete Anforderungen an den Produktentwicklungsprozess.....	77
3.3	Anforderungen an intelligente Systeme in der Produktentwicklung.....	78
3.4	Herausforderungen bei der Implementierung und Nutzung intelligenter Systeme	79
3.5	Implementierung und Praxisanwendungen.....	80
4	Konzeptionelle und methodische Vorgehensweise.....	81
4.1	Agile Produktentwicklung für physische Produkte.....	82
4.2	Modellbasiertes Vorgehen	84
4.2.1	Grundprinzipien des modellbasierten Vorgehens.....	84
4.2.2	Virtuelle Produktumgebung als Basis	85
4.2.3	Phasen des modellbasierten Vorgehens.....	85
4.2.4	Vorteile und Herausforderungen des modellbasierten Vorgehens.....	86
4.3	Interaktive Simulationsumgebung	87
4.3.1	Grundlegende Prinzipien der interaktiven Simulationsumgebung	88
4.3.2	Anwendung in der virtuellen Produktentwicklung	88
4.3.3	Vorteile der Interaktivität in Simulationsumgebungen.....	89
4.3.4	Technologische Voraussetzungen	89
4.3.5	Herausforderungen bei der Implementierung.....	90
5	Hybrides modellbasiertes Vorgehensmodell in der virtuellen Produktentwicklung.....	92
5.1	Allgemeiner Aufbau der hybriden Methodik.....	93
5.2	Fragmentierung der Methodik	96

5.2.1	Konventionelles Vorgehen	97
5.2.2	Agiles Vorgehen und Rollendefinitionen	99
5.2.3	Modellbasierte und virtuelle Produktentwicklung.....	104
5.2.4	Requirements-Management.....	109
5.3	Wissensmanagement in der hybriden Methodik.....	111
5.3.1	Entwicklung eines Referenzplanungsprozesses als Lösungshilfe für das projektübergreifende Wissensmanagement	112
5.4	Predictive Development.....	117
5.4.1	Kategorisierung	122
5.4.2	Predictive Hardware-Development	124
5.4.3	Predictive Software-Development.....	124
5.5	Generisches Bewertungsmodell.....	125
5.5.1	Bewertung der Komplexität und Unsicherheit	125
5.5.2	Cynefin-Modell	127
5.5.3	Entscheidungsfindung – agil vs. klassisch.....	128
5.6	Transformationsprozess	129
5.7	IoT-Datenmanagement	130
6	Anwendung und Bewertung der Methodik.....	135
6.1	Einführung	135
6.2	Aufgabenstellung.....	136
6.3	Kurzvorstellung SimViDekont Forschungsprojekt.....	137
6.4	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	138
6.5	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	140
6.6	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	143
6.7	Durchführung und Anwendung des Vorgehensmodells	145
6.7.1	AP1: Koordination und Dokumentation.....	145
6.7.2	AP2: Problemanalyse	149
6.7.3	AP3: Simulationsmodell.....	154
6.7.4	AP4: Nutzergerechte Schnittstellen.....	171
6.7.5	AP5: Validierung.....	179
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	196
	Literaturverzeichnis	199
	Anhang.....	210

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau dieser Arbeit.....	7
Abbildung 2-1: Erweiterte Integrationstiefe durch PLM nach (Eigner & Stelzer, 2009)	10
Abbildung 2-2: Technologielebenszyklus nach (Ford & Ryan, 1981).....	12
Abbildung 2-3:Produktentstehungsprozess nach (Pahl, et al., 2007).....	13
Abbildung 2-4: Spannungsfeld des PEP.....	14
Abbildung 2-5: Stage-Gate-Prozess/System nach (Cooper, 1990)	16
Abbildung 2-6: Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach (Gausemeier & Feldmann, 2006)	18
Abbildung 2-7: Schematische Struktur eines Projekts nach [DIN 69901-5:2009-01] (DIN), 2009)	25
Abbildung 2-8: Basismodell der Softwareentwicklung nach (Brandt-Pook & Kollmeier, 2020)	27
Abbildung 2-9: Arbeitsschritt beim Konstruieren nach (Pahl, et al., 2007).....	36
Abbildung 2-10: Einsatzgebiete von CAx-Systemen nach (Hehenberger, 2011).....	37
Abbildung 2-11: Unterdisziplinen der Elektrotechnik nach (Eigner & Stelzer, 2009) ...	38
Abbildung 2-12: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach VDI 2206.....	39
Abbildung 2-13: Cyber-physisches System nach (Kühnl, 2010)	41
Abbildung 2-14: Prozesssicht des Virtual Engineering (Ovtcharova J., 2005).....	53
Abbildung 2-15: Integriertes Simulationsmodell nach (Schuck, et al., 2015)	57
Abbildung 2-16: SECI-Modell nach (Nonaka & Takeuchi, 1995)	63
Abbildung 2-17: Wissensmanagement-Modell nach (Probst, et al., 2010).....	65
Abbildung 5-1: Schematischer Aufbau	92
Abbildung 5-2: Allgemeiner Aufbau des PEP	95
Abbildung 5-3: Das Rahmenmodell des agilen Entwicklungsprozesses	101
Abbildung 5-4: Das Rollenmodell des agilen Entwicklungsprozesses	103
Abbildung 5-5: Darstellung des Ablaufs der Sprints in einem Teilprojekt und modellbasierten Vorgehen sowie den Prototypen.....	105
Abbildung 5-6: Agiles modellbasiertes Vorgehensmodell.....	106
Abbildung 5-7:Einordnung des Predictive Developments	119
Abbildung 5-8: Interaktion in der Produktentwicklung	120
Abbildung 5-9: Schematische Darstellung und Informationsfluss des Predictive Developments	121

Abbildung 5-10: Kategorisierung im PEP	123
Abbildung 5-11: Stacey-Matrix nach (Goll & Hommel, 2015)	126
Abbildung 5-12: Cynefin-Modell nach (Lange, 2015).....	127
Abbildung 6-1: Aufgabengebiete im Projekt.....	139
Abbildung 6-2: Balkenplan und Arbeitspakete im Projekt	142
Abbildung 6-3: Prozessmodell des Virtual Engineerings (Ovtcharova J., 2005).....	146
Abbildung 6-4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221, 1993)	148
Abbildung 6-5: Funktionsschema des Verfahrens.....	152
Abbildung 6-6: Integriertes Simulationsmodell	156
Abbildung 6-7: Beschleunigung über der gemeinsamen Längenänderung mit Trendlinie	159
Abbildung 6-8: Konstruktionszeichnung der Unwucht.....	161
Abbildung 6-9: Konstruktionszeichnung des Gehäuses – Schnittansicht.....	161
Abbildung 6-10: Konstruktionszeichnung des Adapters – Schnittansicht.....	162
Abbildung 6-11: Konstruktionszeichnung der Verschlusskappe	162
Abbildung 6-12: Konstruktionszeichnung des Wellenadapters – Schnittansicht	163
Abbildung 6-13: Zusammenbau des Werkzeugträgers im Schnitt.....	163
Abbildung 6-14: Explosionszeichnung des neu konstruierten Werkzeugträgers.....	164
Abbildung 6-15:Konzept der Vorschubvorrichtung.....	164
Abbildung 6-16: Unterschiedliche Konzepte der Werkzeuggeometrien.....	165
Abbildung 6-17: Simulationsmodell im Schnitt mit Bauteilbezeichnungen.....	166
Abbildung 6-18: Komplettes Simulationsmodell in 3D	167
Abbildung 6-19: FEM Modell für bruchmechanische Untersuchungen	168
Abbildung 6-20: Erzeugung des parametrisierten CAD-Modells	172
Abbildung 6-21: Aktivitätsdiagramm der automatisierten Berechnung/Geometrieerstellung	175
Abbildung 6-22: PolyVR Framework	176
Abbildung 6-23: Virtueller Versuchsstand des Prototyps	177
Abbildung 6-24: Aufbau einer virtuellen Testumgebung und Darstellung einer MKS- Berechnung mit Amplitudenverlauf (rot)	178
Abbildung 6-25: Aufbau der virtuellen Gesamtanlage, inkl. Prozessdarstellung	179
Abbildung 6-26: Interaktive Betrachtung des Werkzeugs bzw. der Baugruppe	180
Abbildung 6-27: Beschleunigungsverteilung bei Messung und Simulation: mit Werkzeug	182

Abbildung 6-28: Beschleunigungsverteilung bei Messung und Simulation: ohne Werkzeug	183
Abbildung 6-29: Position der Messpunkte 1 und 2	184
Abbildung 6-30: Beschleunigung und Masse über dem Unwuchtdurchmesser.....	185
Abbildung 6-31: Exzentrizität der Unwucht über dem Unwuchtdurchmesser.....	186
Abbildung 6-32: Beschleunigung und Masse über der Unwuchtlänge	187
Abbildung 6-33: Beschleunigung und Masse über der Dichte der Unwucht.....	187
Abbildung 6-34: Beschleunigung und Masse über dem Gehäusedurchmesser.....	188
Abbildung 6-35: Beschleunigung und Masse über der Gehäuselänge	189
Abbildung 6-36: Beschleunigung und Masse über der Dichte des Gehäuses	190
Abbildung 6-37: Beschleunigung und Masse über der gemeinsamen Durchmesseränderung.....	190
Abbildung 6-38: Beschleunigung und Masse über der gemeinsamen Längenänderung	191
Abbildung 6-39: Beschleunigung und Masse über dem Durchmesser des Werkzeugs	192
Abbildung 6-40: Theoretische Kraft und Masse des Werkzeugs über dem Durchmesser	193
Abbildung 7-1: Rohr 1 mit den untersuchten Bereichen (rot).....	210
Abbildung 7-2: Präparierte Rohrprobe 1	210
Abbildung 7-3: Metallographische Untersuchung an Rohr 1.....	211
Abbildung 7-4: Rohr 3 mit Eindruck 06 Vickers HV0,5 40x	212
Abbildung 7-5: Rohr 3 mit Verlauf von Eindruck 06 Vickers HV0,5	212
Abbildung 7-6: Explosionszeichnung: Rüttelflasche Wacker Neuson	213
Abbildung 7-7: 3D-Ansicht der neukonstruierten Unwucht	215
Abbildung 7-8: Gefertigtes Gehäuse des neuen Werkzeugträgers.....	216
Abbildung 7-9: Gefertigter Adapter des neuen Werkzeugträgers.....	216
Abbildung 7-10: Gefertigte Verschlusskappe des neuen Werkzeugträgers	216
Abbildung 7-11: Gefertigter Wellenadapter des neuen Werkzeugträgers.....	217
Abbildung 7-12: Komplett montierter Werkzeugträger	217
Abbildung 7-13: Konstruierte Vorschubvorrichtung	217
Abbildung 7-14: Geometrische Variante der Gesamtbaugruppe	218
Abbildung 7-15: Unwucht, verschiedene Ansichten – v. Mises-Vergleichsspannung [MPa]	218
Abbildung 7-16: Verschiebungen der Unwucht [mm].....	218
Abbildung 7-17: Verschiebung der Unwucht [mm].....	219

Abbildung 7-18: Gehäuse, verschiedene Ansichten - Mises-Vergleichsspannung [MPa]
.....219

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Typische Geschäftsprozesse nach (Brugger-Gebhardt, 2016)	20
Tabelle 4-1: Auswahlkriterien für die Projektsteuerung	83
Tabelle 6-1: Kooperationsmodell	140
Tabelle 6-2: Vergleich der Massen.....	165
Tabelle 6-3: Vergleich der Beschleunigungen bei Messung, Simulation und Berechnung: Werkzeugträger mit Werkzeug.....	170
Tabelle 6-4: Vergleich der Beschleunigungen bei Messung, Simulation und Berechnung: Werkzeugträger ohne Werkzeug	171
Tabelle 6-5: Federsteifigkeiten der Einspannung im Simulationsmodell	181
Tabelle 6-6: Längen- und Durchmesseränderung bei der Untersuchung	185
Tabelle 7-1: Mögliche Ablagerungen und ihre Zusammensetzung in Rohr 1	211
Tabelle 7-2: Bezeichnung der Einzelteile der Rüttelflasche	213
Tabelle 7-3: Wertebereiche für die Parameter.....	214
Tabelle 7-4: Anforderungsliste.....	215

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
B2B	Business to Business
B2C	Business to Consumer
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CPS	Cyber-Physical System
DMU	Digital Mock-Up
FEM	Finite-Element-Method
IMI	Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen
KI	Künstliche Intelligenz (Artificial Intelligence)
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LPM	Lean Product-Management
MBS	Multi-Body-Simulation
MKS	Mehrkörpersimulation
PDM	Product-Data-Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product-Lifecycle-Management
TDD	Test-Driven Development
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
AMDD	Agile Model-Driven Development
DSDM	Dynamic-Systems-Development-Method
E-CAD	Electrical Computer-Aided Design

FDD	Feature-Driven Development
LESC	Lifecycle-Engineering-Solution-Center
MBSE	Model-Based Systems-Engineering
RFLP	Requirements, Functional, Logical and Physical
SOP	Start of Production
VE	Virtual Engineering
VPE	Virtual Product-Engineering

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen der Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie. Ich war schon früh im Rahmen meines Industriepraktikums während des Studiums im praktischen Produktentwicklungsprozess involviert und konnte auch in diesem die klassischen Herausforderungen erfassen. Im Verlauf meiner Tätigkeit am Institut war es mir möglich, einen tiefgehenden Einblick in die Theorie und Praxis des Produktentstehungsprozesses zu erhalten, auch durch industrielle Kooperation. Der immer kürzer werdende Technologielebenszyklus steht dabei im Widerspruch zu langen Entstehungsprozessen sowie der zunehmenden Interdisziplinarität, die dafür sorgt, dass die Produktkomplexität immer weiter steigt. Aus dieser Problemstellung hat sich die Thematik der vorliegenden Arbeit ergeben.

An dieser Stelle danke ich all denjenigen, die mich bei der Entstehung dieser Dissertation unterstützt haben, allen voran Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Sie hat mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben, mich in den Promotionsgesprächen beraten und Hinweise zur aktuellen Forschung gegeben bzw. mich in meinen Ideen bekräftigt. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Kleinmann für die Übernahme des Zweitgutachtens und sein Interesse an dieser Arbeit.

Dank gilt auch in besonderer Weise allen Mitarbeitern des Instituts für Informationsmanagement im Ingenieurwesen und den Mitarbeitern des Forschungszentrums Informatik sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich besonders bei meiner Familie, meinen Freunden sowie allen Kolleginnen und Kollegen herzlich bedanken, die mir meine Ausbildung ermöglicht, mich auf meinem Weg begleitet und mit ihrer Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zu guter Letzt danke ich herzlichst meiner Frau Nikola sowie meinen Töchtern Mona Charlotte und Isabel Sophie für ihre Geduld und Unterstützung in guten sowie in schwierigen Zeiten.

In dieser Arbeit wird das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich gleichermaßen auf alle Geschlechter; die verkürzte Sprachform dient ausschließlich der besseren Lesbarkeit.

Bergisch Gladbach, Dezember 2025

Hendrik Schuck

1 Einleitung

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt eine Einleitung in die vorliegende Arbeit. In Abschnitt 1.1 wird auf die Herausforderung und Motivation der zugrunde liegenden Problematik eingegangen. Die Zielsetzung dieser Arbeit wird in Abschnitt 1.2 definiert. In Abschnitt 1.3 werden der Aufbau sowie die Vorgehensweise der Untersuchung beschrieben.

1.1 Herausforderung und Motivation

Der Standort Deutschland gehört mit seiner Industrie zu den exportstärksten Ländern weltweit. Der Maschinenbau nimmt dabei eine besondere Rolle ein und gehört zu den größten Wirtschaftszweigen Deutschlands. Der deutsche Maschinenbau rangiert dabei vor den Branchen der Elektrotechnik-, Automobil- und Chemieindustrie. Er ist stark durch den deutschen Mittelstand geprägt und konnte in den letzten 20 Jahren ein durchschnittliches Wirtschaftswachstum von 2,21 % vorweisen (Statistisches Bundesamt, 2017). In der Regel wird vom Maschinen- und Anlagenbau gesprochen, der ca. 6.400 Unternehmen umfasst. Dieser bildet mit ca. einer Million Beschäftigten das Rückgrat der deutschen Wirtschaft und ist damit auch der größte industrielle Arbeitgeber Deutschlands. Dies spiegelt sich auch in der Innovationskraft der deutschen Industrie wider, die mit Patenten weltweit einen Spitzenplatz einnimmt (Bundesministerium für Wirtschaft, 2017). So sichert er Deutschland eine weltweite Technologieführerschaft. Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau unterteilt sich weiter in einzelne Teilbereiche, dies beinhaltet u. a. Maschinen für das Hüttenwesen, Werkzeugmaschinen, Förderanlagen, Baumaschinen, Fluidtechnik, Präzisionswerkzeuge, Bau- und Baustoffmaschinen sowie die Landtechnik. Weiter werden Produktionsmaschinen und -anlagen bereitgestellt, die zur direkten und stetigen Herstellung unterschiedlicher Produkte genutzt werden. Im Gegensatz zum Maschinenbau wird beim Anlagenbau oder den Anlagen von einem Produktionssystem aus mehreren Maschinenapparaten, Armaturen, Mess- und Regelungstechnik, elektrotechnischen Systemen sowie Rohrleitungen gesprochen. Diese Vielfalt sorgt für eine große Varianz an hergestellten Produkten, die über die Massenproduktion bis hin zu Sonderanfertigungen oder Einzelprodukten reicht.

Die Komplexität der einzelnen produzierten Güter und Produkte nimmt dabei stetig zu. Gründe hierfür sind u. a. die zunehmende Digitalisierung sowie die Integration von Sensoren und Aktuatoren, um ein Steuern und Regeln der Systeme zu ermöglichen. Aus diesem Grund bestehen die meisten Systeme aus mechanischen, elektrotechnischen sowie informationstechnischen Komponenten. Die informationstechnische Entwicklung hat in

den letzten Jahren stetig zugenommen und wird in Zukunft den größten Teil der Entwicklungskosten ausmachen. Dies betrifft auch die Prozesse außerhalb des Produkts. Der klassische Maschinenbau bzw. die mechanischen Komponenten sind hingegen auf dem Rückzug, was den Entwicklungsaufwand betrifft. Ein Grund ist u. a. die Zunahme von automatisierten und rechnerunterstützten Prozessen im Bereich der zu entwickelnden Mechanik. Moderne CAx-Systeme unterstützen den Konstrukteur bei seiner Arbeit und ermöglichen ihm die Automatisierung bestimmter Aktivitäten in der Prozesskette, u. a. in den Bereichen der Simulation (CAE) und der Produktionsplanung (DiFa).

In zunehmendem Maß steigt die Dynamik der Anforderungen an die Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus. Dies kann bedeuten, dass die Anforderungen erst im Verlauf eines Entwicklungsprozesses konkret werden, was die Planungssicherheit des Unternehmens erschwert und manchmal den Prozess kaum konkret planbar macht. Ein häufiges Anpassen der Anforderungen und Kundenwünsche hat dies zur Folge. Es ergibt sich eine Diskrepanz zwischen der Organisation eines Unternehmens, die meist langfristig aufgestellt und auf Planungssicherheit angewiesen ist, und dem Interesse, dem Kunden individuelle Produkte mit Spielraum bei der konkreten Gestaltung anbieten zu können. Diese zunehmende Entwicklung hat Auswirkungen auf die gesamte Wertkette, sodass nicht nur das produzierende Unternehmen, sondern auch deren Lieferanten davon betroffen sein können. Dies ist eine Entwicklung, die besonders bei langfristigen Projekten und in den hochtechnologischen Bereichen vorherrscht. Die in den meisten Unternehmen vorhandene Matrixorganisation kann dieser Dynamik nur schwer gerecht werden. Der Erfolg eines Produkts wird in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses definiert. Die Freiheitsgrade von Änderungen im Verlaufe eines Projektes nehmen mit fortschreitender Zeit ab und die Kosten sowie der Aufwand für die Durchführung von Änderungen massiv zu. In der Entwicklung, die weniger als 10 % ausmacht, werden hingegen ca. 70 % der festgelegten Kosten bestimmt (Ehrlenspiel, 2009).

Der Maschinen- und Anlagenbau steht mit der steigenden Interdisziplinarität vor einer der größten Herausforderungen der letzten Jahrzehnte. Zusammen mit der Zunahme der dynamischen Anforderungen, die der Verbraucher oder Kunde impliziert, entsteht ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Prozesse. Hinzu kommt der sinkende Technologielebenszyklus, der einen entsprechend kürzeren Produktlebenszyklus zur Folge hat. Das Unternehmen steht nun vor der Aufgabe, dabei die Kundenbedürfnisse bzw. Kundenzufriedenheit stets zu befriedigen – auch aufgrund der nicht mehr stark vorhandenen Verbundenheit des Kunden mit einer bestimmten Marke. Es gilt nun eine Balance zwischen allen Beteiligten, d. h. dem Kunden, dem Unternehmen und den eigenen Mitarbeitern zu finden. Dabei spielen die Flexibilität und die ständige kontinuierliche Verbesserung aller Prozesse im Unternehmen eine große Rolle. Aus der Softwareentwicklung ist

diese Problematik hinreichend bekannt und spiegelt sich in den kundenorientierten Vorgehensmodellen der Softwareentwicklung wider. In den letzten Jahren haben diese auch die ersten Bereiche der Mechatronik und Elektrotechnik erreicht. Hierbei wird allerdings noch nicht von einer einheitlichen Systematik gesprochen, da diese zu individuell und unternehmensspezifisch umgesetzt worden. Dies liegt auch daran, dass eine IT- bzw. rechnerunterstützte Lösung noch nicht umgesetzt wurde oder sich erst in einigen spezifischen Tools finden lässt. Die IT-unterstützte Produktentwicklung spielt bei der erfolgreichen Umsetzung dieser Systematik eine Schlüsselrolle. Als zentrale Aufgabe ist hierbei die Vernetzung der verschiedenen Disziplinen anzusehen, das Zusammenspiel der verschiedenen Fachbereiche sowie der unterschiedlichen Methoden ist hier besonders bedeutsam. Das parallele Arbeiten muss durch einen kontinuierlichen und synchronisierten Informationsfluss gewährleistet werden. Das Product-Lifecycle-Management entstand als Folge des mangelnden Informationsflusses des Produktdatenmanagements innerhalb des Produktentwicklungsprozesses und darüber hinaus. Das PLM ist historisch aus dem Maschinen- und Anlagenbau entstanden und sollte über den gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden. Andere Bereiche wie die Elektrotechnik oder Softwareentwicklung waren an diesem Prozess im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus nicht beteiligt, sondern wiesen eigene Ansätze zur Schaffung einer IT-Infrastruktur auf, womit eigene Software-Tools gemeint sind. Obwohl eine Zusammenführung der verschiedenen Disziplinen wünschenswert gewesen wäre und den Informationsfluss verbessert hätte, war das Gegenteil der Fall. Jeder der einzelnen IT-Bereiche, also Mechanik, Elektronik und Softwareentwicklung, wuchs kontinuierlich. Die Hauptaufgabe des IT-Service-Managements war die Schaffung gemeinsamer Schnittstellen. Dies hat kostenintensive lizenzrechtliche und entwicklungstechnische Konsequenzen. Es gibt seit geraumer Zeit erste Ansätze, auch von Softwareanbietern, diese Strukturen zusammenzuführen, um eine Zusammenarbeit zu ermöglichen. Aber es gibt noch massive Unterschiede in der IT-technischen Zusammenarbeit der verschiedenen Fachdisziplinen.

Eine weitere Herausforderung bei der Zusammenführung und dem Erfassen der Problematik liegt im mangelnden Wissen über disziplinübergreifende Methoden und wie diese eingesetzt werden können. Ein Schnittstellendenken ist hier notwendig, was jeden einzelnen Beteiligten betrifft. Es ist aber auch notwendig, dass die Unternehmensleitung bzw. das Management in diesem Fall aktiv wird. Es ist eine vermittelnde Rolle erforderlich, z. B. durch einen interdisziplinären Projektmanager mit geeignetem Fachwissen, der die Einführung und Anwendung der Methoden überwacht. Dieser muss mit allen Fachdisziplinen interagieren können. Ein Maschinenbauingenieur, der nur das mechanische Problem betrachtet, oder ein Softwareentwickler, der nur den Quellcode sieht, ist hier nicht gefordert. Aus diesem Grund ist es erforderlich, im Bereich des Projektmanagements geeignete Maßnahmen zu ergreifen oder Schulungen zu initiieren, um diesem Wissensmangel zu begegnen. Diese Problematik ist für viele mittelständische Maschinenbauer nicht neu,

aber sie wird in Zukunft wettbewerbsentscheidend sein, sodass ein Handeln erforderlich ist.

In den letzten zehn Jahren haben sich die agilen Prozessmodelle der Softwareentwicklung stark verbreitet. Diese flexiblen und adaptierbaren Werkzeuge sind aus der Notwendigkeit entstanden, kundenorientiert zu arbeiten und schnelle Ergebnisse zu ermöglichen. Die Anwendung dieser Methoden ist an gewisse Voraussetzungen gekoppelt, die in der Softwareentwicklung in den meisten Fällen gegeben sind. Die Anwendungen der meisten agilen Methoden sind ausschließlich für die Softwareentwicklung geeignet. Im klassischen Engineering wird dagegen diese Voraussetzung nur zum Teil erfüllt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf diese Problematik genauer eingegangen. Unterstützt von den Werkzeugen der virtuellen Produktentwicklung sind die agilen Methoden zudem zugänglich für den klassischen Engineering-Prozess, was auch Inhalt dieser Arbeit ist. Die Kundenorientierung spiegelt sich in der iterativen Entwicklung und der inkrementellen Auslieferung funktionierender Prototypen bzw. Arbeitspakete wider. Es ist möglich, ein direktes Feedback durch den Kunden zu erhalten und dieses in der nächsten Iteration zu integrieren. Als weitere Vorteile für den Einsatz von agilen Methoden werden u. a. verkürzte Zeiten bei der Fehlerbeseitigung, Reduzierung der Entwicklungskosten, Produktivitätssteigerungen und ein früheres Time-to-Markets genannt (Gloger, 2016). Als derzeit bedeutsamste Methode des agilen Projektmanagements kann Scrum genannt werden. Zwar wird seine Bedeutung für die Softwareentwicklung angeführt, jedoch ist es im engeren Sinne keine auf eine bestimmte Fachdisziplin bezogene Methode. Es handelt sich um eine allgemeine Methode, die auch dem Bereich des Lean Developments zugeordnet werden kann. Im Kern besteht Scrum nur aus wenigen Regeln, die sich in Aktivitäten, Artefakte und Rollen untergliedern. Diese Scrum-Methodik ist schon in einigen Bereichen außerhalb der Software-Entwicklung präsent und ein integraler Bestandteil moderner Projektmanagementmethoden. In der Vergangenheit gab es erste erfolgreiche praktische Umsetzungen im Umfeld der Mechatronik. Dabei ist anzumerken, dass es keine einheitliche Vorgehensweise bei der Integration der agilen Scrum-Methode gibt.

Während die Softwareentwicklung rechnerunterstützt und die Arbeit rein digital abläuft, musste das klassische Engineering häufig noch auf analoge Methoden, d. h. Zeichnungen, Berechnungen, Tabellen usw. zurückgreifen. Ein großes Problem stellten dabei die Schnittstellen der verschiedenen Prozesse in der Produktentwicklung dar. Hier herrschte kein durchgehender IT-unterstützter Informations- und Datenfluss. Dies gestaltete die Adaption von Methoden aus der Softwareentwicklung schwierig. Die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung der Daten und informationstechnischen Prozesse der letzten Jahre machen die Methoden der Softwareentwicklung wieder interessant für den klassischen Engineering-Prozess. So muss hier der Begriff der virtuellen Produktentwicklung oder der Ansatz des IMI, des Virtual Engineerings, genutzt werden (Ovtcharova J., 2005).

Das Virtual Engineering steht für die „frühzeitige, kontinuierliche, vernetzte (Prozesssicht) und integrierte (IT-Systemsicht) Unterstützung des gesamten Produktlebenszyklus hinsichtlich Abstimmung, Bewertung und Konkretisierung der Ergebnisse aller Partner mit Einsatz der virtuellen Realität“ (Ovtcharova). Die virtuelle Produktentwicklung ist keine geschlossene Theorie. Zwar existiert eine Vielzahl von Ansätzen, aber es kann hier vielmehr von einer Digitalisierung und Optimierung der einzelnen Prozessschritte während der Produktentwicklung gesprochen werden. Durch eine Vielzahl von IT-Tools entlang der CAx-Prozesskette ist die Erzeugung eines rein virtuellen Produkts möglich, dies wird auch durch einen verbesserten IT-unterstützten Datenfluss gewährleistet. Der Informationsverlust entlang der Prozesskette hat sich deutlich reduziert. So sind die Entwicklung und Validierung komplett digital möglich. Prototypen lassen sich mit Ansätzen des Systems Engineerings und der CAx-Software schnell realisieren und iterativ testen, um direkt das Produktionsumfeld zu simulieren. Der Begriff ‚iterativ‘ ist von besonderer Bedeutung. Die Vervielfältigung und Reproduktion verschiedener Prototypen bzw. Varianten innerhalb sehr kurzer Zeit können hier als großer Vorteil gegenüber den klassischen Engineering-Prozessen genannt werden. Die Informationsgewinnung über ein Produkt lässt sich auf diese Weise maximieren. Durch weitere Schritte der Automatisierung in der CAx-Prozesskette kann der Produktentwicklungsprozess weiter optimiert werden.

Die Kombination von Ansätzen des agilen Managements und der virtuellen Produktentwicklung soll auch im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, um auf diese Weise einen Vorschlag für eine neue Methodik zu entwickeln.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit umfasst die Entwicklung einer allgemeingültigen hybriden Methodik, die im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung bzw. des Virtual Engineerings genutzt werden kann. Unter Berücksichtigung des Standes der Wissenschaft und Technik soll diese Methodik abgeleitet werden. Dies erfolgt mithilfe agiler Prozessmodelle der Softwareentwicklung und konventionellen Vorgehensmethoden, die sich in der Vergangenheit bewährt haben. Auf diese Weise sollen die Vorteile verschiedener Methoden kombiniert werden, sodass eine Symbiose entsteht.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen alle Techniken genau betrachtet und analysiert werden. Die agilen Techniken, die heute in der Softwareentwicklung weitverbreitet sind, werden in dieser Arbeit untersucht und adaptiert. In ersten einfachen Anwendungsfällen konnten sich diese Methoden auch im konventionellen Engineering behaupten. Auch in anderen Forschungsarbeiten gab es bereits erste Vorschläge zur Adaption dieser Methoden, wobei der Fokus meist auf einer kompletten Adaption und Übertragung agiler Techniken lag. Aus der Natur und Technik ist bekannt, dass die Kombination verschiedener Mittel und

Methoden erfolgversprechender ist als eine Methode allein (Eckstein, 2013). Ein weiterer zentraler Punkt ist die Prozesssicherheit, die oft bei den agilen Methoden kritisiert wird. Die Anforderungen an die neue Methodik sind dabei vielfältig. Diese muss allen Beteiligten in irgendeiner Weise gerecht werden, sei es dem Projektmanager wie auch dem Projektmitarbeiter bzw. Entwickler. Während bei den agilen Methoden der Entwickler im Mittelpunkt steht, liegt der Fokus bei den konventionellen Methoden auf den Prozessen und Meilensteinen. Auch um der individuellen Problematik eines Entwicklungsprojektes gerecht zu werden, sind kombinierte Methoden besser geeignet (Eckstein, 2013). Aber nicht das zu entwickelnde Produkt soll den Prozessen angepasst werden, sondern umgekehrt.

Das Anwendungsfeld der zu entwickelnden Methodik soll sich nicht auf einen Teilbereich beschränken, sondern vielmehr Anwendung finden im Maschinen- und Anlagenbau sowie bei der Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme. Ziel ist eine langfristige Etablierung der Methodik in einem produzierenden Unternehmen wie auch bei externen Dienstleistern. Ein weiteres Ziel ist die umfängliche Vernetzung verschiedener Disziplinen in der Produktentwicklung – eine vertikale und horizontale Integration soll möglich sein. Dem Leser soll die Möglichkeit gegeben werden, die Methodik disziplinübergreifend zu adaptieren und anzuwenden, auch um den Arbeitsprozess zu optimieren, d. h. dessen Verkürzung und Parallelisierung zu erreichen. Ebenso soll die Anwendung im Rahmen von Turnaround-Projekten ermöglicht werden. Da die Methoden bei bereits laufenden Projekten flexibel anwendbar sind, bietet dies die Möglichkeit einer Adaption und Integration.

Wesentliche Fragestellungen dieser Arbeit sind in den letzten Jahren im Rahmen von Forschungsprojekten und Kooperationsprojekten aufgetreten. Diese Fragen wurden extrahiert und in der vorliegenden Arbeit integriert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, die in Abbildung 1-1 dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden. Im einleitenden Kapitel 1 werden die Herausforderungen und Motivation, die Zielsetzung sowie der Aufbau dieser Arbeit vorgestellt.

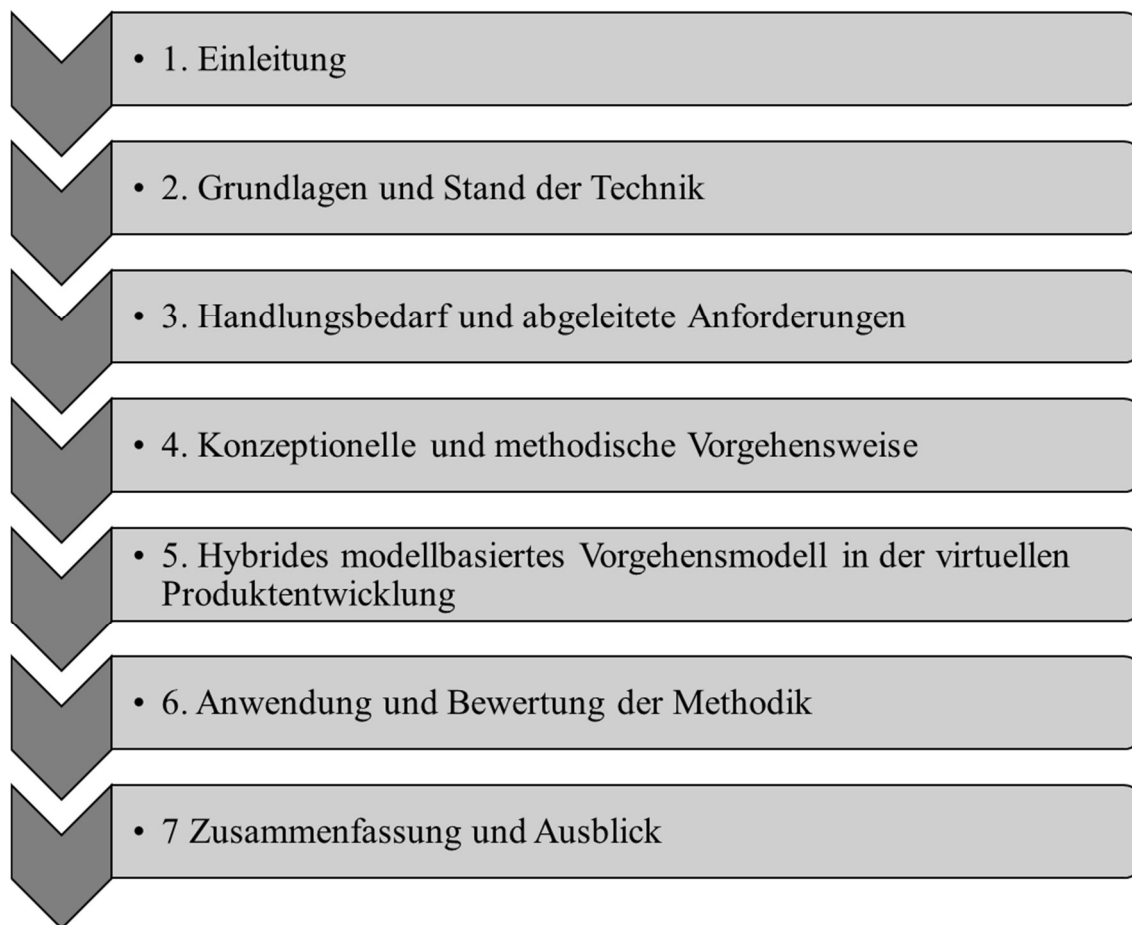


Abbildung 1-1: Aufbau dieser Arbeit

In Kapitel 2 wird der genaue Stand der Wissenschaft und Technik ermittelt, genauer betrachtet bzw. erläutert und anschließend diskutiert. Dies umfasst u. a. die Betrachtung statischer und klassischer Vorgehensmodelle sowie dynamischer und agiler Vorgehensmodelle aller Fachdisziplinen. Diese Disziplinen werden systematisch voneinander abgegrenzt und erläutert. Weiter werden zentrale Themengebiete erfasst, u. a. das Changemanagement bzw. Change-Prozesse, da diese eine wesentliche Rolle bei der erfolgreichen Umsetzung bzw. dem späteren Einsatz neuer Vorgehensmodelle spielen. Zudem wird kurz auf die strategische Produktentwicklung sowie die IT- Infrastruktur und Systemlandschaft eingegangen.

In Kapitel 3 steht der Handlungsbedarf im Fokus, der aus dem Stand der Wissenschaft und Technik abgeleitet wird. Aus diesen werden anschließend die Anforderungen ermittelt und dargelegt. Des Weiteren wird der zu untersuchende Bereich eingegrenzt und mit der anfänglichen Zielsetzung dieser Arbeit abgestimmt. Nach diesem Schritt werden die konkreten und systematischen Anforderungen festgelegt, die die neu entwickelte agile Methodik erfüllen muss.

In Kapitel 4 wird auf das konzeptionelle und methodische Vorgehen eingegangen. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der Untersuchung der einzelnen Prozesse der zukünftigen Methodik. Dabei soll ermittelt werden, wie und welche Methoden aus der gesamten Produktentwicklung genutzt und adaptiert werden können. Hierbei stehen meist Methoden und Modelle der Softwareentwicklung im Fokus, welche einen Hauptpunkt dieser Arbeit ausmachen. Dieses Kapitel gilt als Vorbereitung und Wegbereiter für das folgende Kapitel, das die Hauptmethodik beinhaltet.

In Kapitel 5 wird auf Basis des Handlungsbedarfs und der abgeleiteten Anforderungen systematisch die hybride Methodik für die virtuelle Produktentwicklung konzipiert. Das Modell wird allgemein vorgestellt und im späteren Verlauf in verschiedene Gebiete aufgeteilt. Im Weiteren wird das Modell fragmentiert, d. h., es werden verschiedene zentrale Aspekte, die über diese Methodik berücksichtigt und integriert werden müssen, vorgestellt. Zudem werden Empfehlungen zur Anwendung ausgesprochen. Dabei werden auch neue Begrifflichkeiten eingeführt, die allerdings nur als Vorschlag dienen und ein besseres Verständnis an dieser Stelle fördern sollen. Es wird darauf geachtet, dass ein allgemeines und disziplinübergreifendes Verständnis besteht.

In Kapitel 6 wird beschrieben, wie die Methodik im Rahmen eines Forschungsprojekts erstmals angewendet wurde. Konkret wird ein Forschungsprojekt beschrieben, das in der Vergangenheit erfolgreich abgeschlossen wurde. In diesem Fall wird konkret auf den Soll-Ist-Vergleich unterschiedlicher Methoden bzw. Vorgehensmodelle eingegangen, die hier Anwendung fanden. Der Anwendungsbereich erstreckt sich hier vom klassischen Engineering bis hin zu mechatronischen Fragestellungen. Der Aufbau bzw. die Erläuterungen der Anwendungsfälle orientieren sich dabei am Vorschlag aus Kapitel 5 zum Aufbau der Methodik. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Methodik auf Basis dieser Anwendungsfälle. Es wird untersucht, ob die gesetzten Anforderungen sowie die gestellten Forschungsfragen aus den vorherigen Kapiteln erfolgreich umgesetzt wurden.

Kapitel 7 umfasst die Zusammenfassung und den Ausblick. Hierbei werden die erreichten Ziele begutachtet und es erfolgt ein Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Um der wissenschaftlichen Vollständigkeit gerecht zu werden, wird der eigentlichen Arbeit ein Kapitel zu den Grundlagen und allgemeinen Begrifflichkeiten vorangestellt. In diesem werden die Grundlagen und etablierten Begriffsbestimmungen der verschiedenen Fachdisziplinen sowie der übergeordneten Themen erläutert. Es dient dazu, im späteren Verlauf die Zusammenführung der einzelnen Fachdisziplinen und deren Prozesse besser zu verstehen. Zu Beginn erfolgt eine Einführung in das Thema der Produktentwicklung und deren Begrifflichkeiten. Die Softwareentwicklung wird hierbei zur Produktentwicklung gezählt. Im Weiteren wird auf das Virtual Engineering, dessen Prozesse sowie die resultierende Kollaboration eingegangen. Im nächsten Schritt wird in die Thematik des Product-Lifecycle-Managements eingeführt, die die Basis der vorangegangenen Abschnitte bildet. In Abschnitt 2.6 wird das Wissensmanagement kurz erläutert.

2.1 Die Produktentstehung

In diesem Abschnitt soll der Produktentstehungsprozess erläutert und übergreifend eingeordnet werden. Der Produktentstehungsprozess beschreibt den gesamten Zyklus, von der Idee bis zur Serienproduktion eines Produkts. Er umfasst mehrere Phasen wie die Konzeptentwicklung, die Konstruktion, das Prototyping und die Fertigungsvorbereitung. Ziel ist es, innovative, marktfähige Produkte effizient zu entwickeln und dabei technische, wirtschaftliche und kundenbezogene Anforderungen optimal zu berücksichtigen (Eigner & Stelzer, 2009).

2.1.1 Der Produktlebenszyklus

Der Produktlebenszyklus ist ein zentraler Prozess in produzierenden Unternehmen und umfasst sämtliche zeitlichen Abschnitte eines Produkts, von der Planung und Entwicklung über den Einsatz bis hin zur Außerbetriebnahme und dem Recycling. Der Produktlebenszyklus (engl.: Product Lifecycle, Abk.: PLC) fördert eine ganzheitliche Sichtweise, die die Grenzen zwischen den verschiedenen Lebenszyklusphasen, Abteilungen und IT-Systemen auflöst (Eigner & Stelzer, 2009). Neben der Produktplanung und -entwicklung beinhaltet der Produktlebenszyklus auch die Planung der zugehörigen Betriebsmittel, Ressourcen sowie der Fertigungs- und Montageprozesse, deren Erstellung, Nutzung und Recycling (Eigner & Stelzer, 2009). Eine schematische Darstellung der Phasen und Aufgabenbereiche im Produktlebenszyklus zeigt Abbildung 2-1.

Die Phase der Produktentwicklung spielt eine entscheidende Rolle im Produktlebenszyklus, da sie die Grundlage für die nachfolgenden Phasen bildet. Ziel der Produktentwicklung ist es, das Produkt für den gesamten Lebenszyklus zu optimieren, indem Faktoren wie effiziente Wartbarkeit und angemessenes Recycling bereits in dieser Phase berücksichtigt werden (Sendler, 2013). Dadurch entsteht ein Regelkreis zwischen Fertigung und Entwicklung, der für die fertigungsgerechte Umsetzung von Produkten unerlässlich ist (Gausemeier & Feldmann, 2006). Ein bidirektionaler Datenaustausch zwischen der Produktentwicklung und der Produktnutzungsphase bietet darüber hinaus die Möglichkeit, bisher ungenutzte Potenziale zu erschließen. So lassen sich beispielsweise Produktverbesserungen schneller umsetzen, indem Daten aus der Nutzungsphase analysiert werden (Abramovici, et al., 2008).

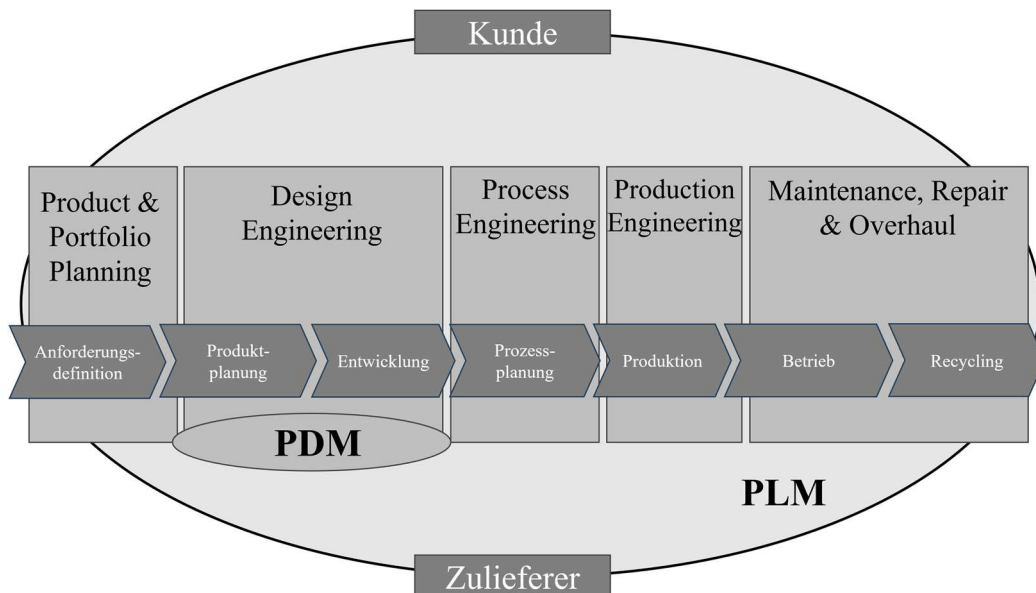


Abbildung 2-1: Erweiterte Integrationstiefe durch PLM nach (Eigner & Stelzer, 2009)

Die finanzielle Betrachtung eines Produkts über dessen gesamten Lebenszyklus erfolgt durch die Lebenszykluskostenrechnung (engl.: Life-Cycle-Costing, Abk.: LCC). Westkämper definiert diese als „Kosten- und Erfolgsrechnung über das gesamte Leben eines Produkts“ (Westkämper, 2006). Das Ziel der Lebenszykluskostenrechnung ist es, bereits in der Produktentwicklung Aussagen über den wirtschaftlichen Nutzen bis zum Lebensende des Produkts treffen zu können (Westkämper, 2006). In die Berechnung fließen Kosten für Investitionen, Instandhaltung, Betrieb und Entsorgung ein (Lanza, et al., 2012). Insbesondere bei langjährigen Lebenszyklen wie im Anlagenbau können sich die Folgekosten auf das Drei- bis Zehnfache der Anschaffungskosten belaufen (Niemann, 2020).

Im folgenden Abschnitt 2.1.3 wird der Produktentstehungsprozess als wesentlicher Teil des Produktlebenszyklus näher betrachtet.

2.1.2 Technologielebenszyklus

Der Technologielebenszyklus beschreibt Entwicklung, Einsatz und letztlichen Rückgang von Technologien im Zeitverlauf. Er bildet eine zentrale Grundlage für das Verständnis des Innovations- und Produktentwicklungsprozesses, insbesondere in Branchen wie dem Maschinenbau und der Elektronik, wo technologische Neuerungen wesentliche Treiber für Wettbewerbsfähigkeit und Marktdynamik sind. In einer zunehmend globalisierten und digitalisierten Welt werden Technologien immer schneller obsolet, was Unternehmen zwingt, ihre Innovationszyklen zu verkürzen und sich agil an neue Entwicklungen anzupassen (Rogers, 2003).

Der Technologielebenszyklus lässt sich grob in vier Phasen unterteilen: Einführung, Wachstum, Reife und Rückgang (Ford & Ryan, 1981). In der Einführungsphase wird eine neue Technologie entwickelt und erstmals kommerzialisiert. Diese Phase ist oft von hohen F&E-Kosten und geringem Umsatz gekennzeichnet. In der Wachstumsphase gewinnt die Technologie an Marktakzeptanz, die Umsätze steigen und es beginnt die Optimierung der Produktionsprozesse. Die Reifephase wird durch einen gesättigten Markt und ein langsames Wachstum charakterisiert. Schließlich folgt der Rückgang, wenn die Technologie durch neuere Innovationen ersetzt wird oder die Nachfrage sinkt (Gausemeier, et al., 2018).

Eine der größten Herausforderungen für Unternehmen ist die Verkürzung der Technologielebenszyklen. Im Maschinenbau, wo technologische Systeme zunehmend von elektronischen und softwarebasierten Komponenten abhängig sind, müssen Unternehmen ihre Innovationsprozesse beschleunigen, um wettbewerbsfähig zu bleiben (Westkämper, 2006). Neue digitale Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI) und das Internet der Dinge (IoT) verkürzen die Lebenszyklen von Produkten und erfordern eine engere Verzahnung von Produktentwicklung und Markteinführung (Abramovici, et al., 2008).

Der Technologielebenszyklus hat tiefgreifende Auswirkungen auf den Produktentwicklungsprozess. Unternehmen müssen bereits in der Entwicklungsphase zukünftige Anforderungen und die Weiterentwicklung der Technologie antizipieren. So ermöglicht der Einsatz von Digital Twins oder virtueller Produktentwicklung eine simulationsbasierte Produktoptimierung bereits während der Entstehung, wodurch Entwicklungszyklen verkürzt und Anpassungen während der Reifephase minimiert werden (Sendler, 2013). Dies verdeutlicht, wie moderne Technologien nicht nur die Produkte selbst, sondern auch die Art und Weise, wie sie entwickelt werden, grundlegend verändern.

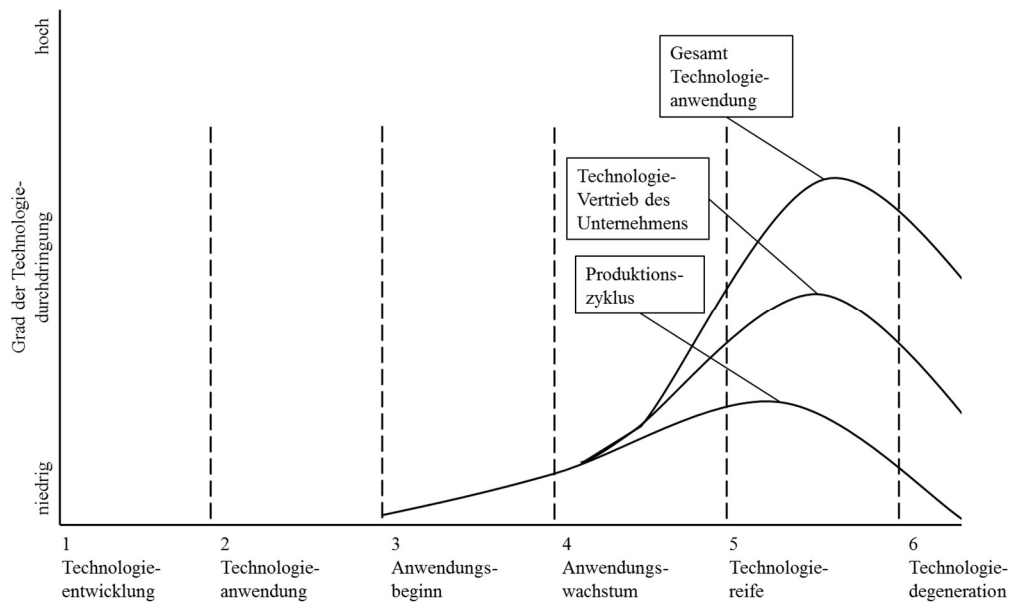


Abbildung 2-2: Technologielebenszyklus nach (Ford & Ryan, 1981)

Das Management des Technologielebenszyklus ist somit ein entscheidender Erfolgsfaktor für Unternehmen. Es geht nicht nur darum, technologische Trends zu erkennen, sondern diese in den Innovationsprozess zu integrieren und zur Steigerung der Marktfähigkeit von Produkten zu nutzen. Der Technologielebenszyklus beeinflusst dabei sowohl die strategische Planung als auch das operative Management von Unternehmen und bildet einen integralen Bestandteil des Innovationsmanagements (Eigner & Stelzer, 2009).

2.1.3 Der Produktentstehungsprozess

In der Industrie wird eine Vielzahl an Produkten entwickelt und produziert, weshalb eine Eingrenzung dieser Thematik sinnvoll ist. Eine wesentliche Unterscheidung liegt darin, ob es sich um ein materielles oder immaterielles Gut handelt. Ist eine Dienstleistung oder ein Service gemeint, so wird von einem immateriellen Gut gesprochen. Bis zu seiner Markteinführung wird ein standardisierter Prozess innerhalb des Unternehmens durchlaufen, unabhängig von den spezifischen Eigenschaften, die das Gut charakterisieren. Ob es sich hierbei um ein Business-to-Business (B2B)- oder Business-to-Customer (B2C)-Produkt handelt, ist ebenfalls nicht von Bedeutung. Die Entstehung eines industriellen Gutes erfolgt immer in aufeinanderfolgenden Teilschritten, die sich nach einem systematischen und methodischen Vorgehen richten. Diese Teilschritte folgen aufeinander und sind mit den nötigen Schnittstellen verbunden. Die Summe aller Schritte, beginnend von der Produktidee bis zum verkaufsfertigen Endprodukt, bildet den Produktentstehungsprozess (PEP). Im Allgemeinen lässt sich der PEP in synchron ablaufende Prozessschritte

unterteilen, wie in Abbildung 2-3 dargestellt. Er ist die „Summe aller operativen und steuernden Aktivitäten, die beginnend mit der ersten Produktidee bis zum Auslauf die Eigenschaften, Kosten und Erträge, Marketing, Vertrieb und Kundendienst des Produkts festlegen und sicherstellen“ (Schömann, 2012). Die Produktentwicklung hat hier das Ziel, die Lösung einer technischen Aufgabe zu einem marktreifen Produkt zu entwickeln. In der Regel ist der PEP mit dem Qualitäts- und Risikomanagement, der Normung und Patentierung, dem Änderungsmanagement sowie der Beschaffung und Fertigungsplanung verbunden. Die Steuerung und Überwachung sowie die Ansteuerung der Schnittstellen der einzelnen Prozesse im PEP wird durch das Projektmanagement realisiert. Der PEP wird – abhängig von den jeweiligen Bedürfnissen und den zu produzierenden Gütern – standardisiert und an jedes Unternehmen angepasst. Meist wird hierbei ein Phasenmodell verwendet, in dem die einzelnen Schritte als iterative Phasen durchlaufen werden. Zwischen den einzelnen Phasen werden im PEP festgelegte Meilensteine angestrebt, die als Soll-Ist-Vergleich dienen. Branchenabhängig oder falls es die Sicherheit erfordert, werden innerhalb des Entstehungsprozesses sogenannte Quality-Gates (QGs) zur Qualitätssicherung eingesetzt.

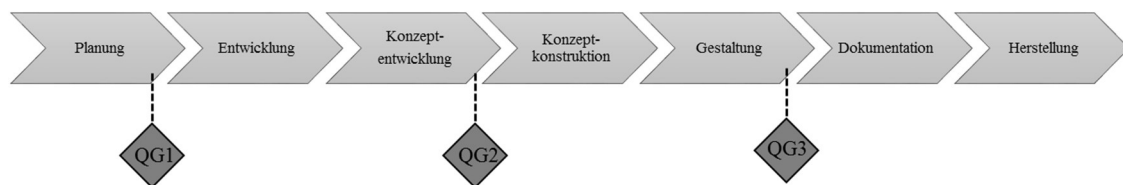


Abbildung 2-3:Produktentstehungsprozess nach (Pahl, et al., 2007)

Darüber hinaus wird unter der Produktentstehung die „Gesamtheit der technischen, markt- und produktionsorientierten Tätigkeiten“ eines Unternehmens verstanden, die die Schaffung eines neuen Produkts oder Prozesses zum Ziel haben (Ehrlenspiel, 2009). Der Produktentstehungsprozess (PEP) stellt somit einen direkt wertschöpfenden Prozess für das Unternehmen dar (vgl. (Ehrlenspiel, 2009)). Er beginnt mit einer ersten Produkt- bzw. Geschäftsidee und endet mit dem Serienanlauf der Produktion. Der PEP liegt ständig im Spannungsfeld zwischen Zeit, Qualität und Kosten, die zugleich die zentralen Stellgrößen dieses Prozesses bilden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

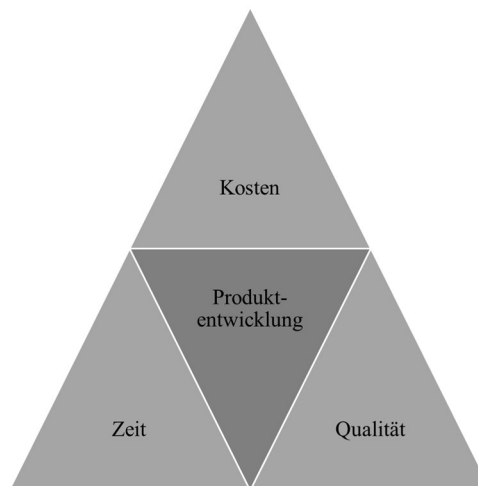


Abbildung 2-4: Spannungsfeld des PEP

Inhaltlich umfasst die Produktentwicklung (engl.: New Product Development, NPD) den Prozess der Gestaltung eines an den Marktbedürfnissen ausgerichteten Produkts sowie dessen Herstellungsprozess. Als formale Aufgabe kommt die Informationsgewinnung hinzu. Die schrittweise gewonnenen Informationen ermöglichen es, ein Produktmodell zu erstellen und dieses nach und nach zu verfeinern (Ulrich & Eppinger, 2015).

Eine einheitliche Definition und Gliederung des Produktentstehungsprozesses werden in der Literatur jedoch nicht vorgenommen. Krause nutzt die Abkürzung ‚PEP‘ für den Produktentwicklungsprozess innerhalb des Produktentstehungsprozesses (Krause, et al., 2006). Seidel gibt an, dass die Begriffe ‚Produktentwicklungsprozess‘, ‚integrierte Produktentwicklung‘ und ‚Konstruktionsprozess‘ synonym zum Produktentstehungsprozess verwendet werden (Seidel, 2005).

Während Eigner und Stelzer sowie Gausemeier et al. die Produktionssystementwicklung mit der Fertigungsplanung bzw. Arbeitsplanung als Teil des Produktentstehungsprozesses sehen (vgl. (Eigner & Stelzer, 2009); (Gausemeier, et al., 2018)), gliedert Westkämper die Arbeitsplanung aus dem Produktentstehungsprozess aus (Westkämper, 2006). Ehrlenspiel setzt den Begriff der Produktentstehung mit der Produkterstellung gleich und definiert diesen als den gesamten Prozess von der Produktplanung bis zur Produktauslieferung an den Nutzer (Ehrlenspiel, 2009).

Der Produktentwicklungsprozess ist nicht deterministisch und besitzt eine begrenzte Planbarkeit (Voigt, 2005). Der Prozess enthält Rücksprünge und Iterationen sowie einen hohen kreativen Anteil. Somit ist eine vollständige Standardisierung des Prozesses nicht möglich. Die dynamischen Eigenschaften des Prozesses (Kirchner, 2020) ergeben sich zusätzlich aus den Unsicherheiten, die mit der Produktentwicklung verbunden sind. So

ist es erforderlich, getroffene Entscheidungen rasch zu revidieren, um sich geänderten externen und internen Rahmenbedingungen anpassen zu können.

Weitere Einflussfaktoren für die Ausgestaltung des Produktentwicklungsprozesses ergeben sich aus dem Umfeld der Produktentwicklung. Ehrlenspiel definiert hierfür drei Bereiche: Der erste Bereich umfasst das Gestaltungsproblem der Produktentwicklung mit den zur Verfügung stehenden Informationen und der Zeit sowie der Variantenvielfalt und dem Neuheitsgrad des Produkts. Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich durch den Produktentwickler, seinen Denk- und Handlungsstil, seine fachlichen und methodischen Kompetenzen sowie seine Leistungsbereitschaft und -fähigkeit. Der dritte Bereich umfasst das Unternehmen mit seinen Unternehmenszielen, Organisationsstrukturen und den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Ehrlenspiel, 2009). Um diesen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen, muss der Produktentwicklungsprozess flexibel, effizient und transparent gestaltet werden (Ehrlenspiel, 2009).

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wurden verschiedene Prozessmodelle für die Produktentwicklung definiert. Ein Prozessmodell beinhaltet eine detaillierte Beschreibung des Prozesses mit seinen Aufgaben, Verantwortlichkeiten sowie Abhängigkeiten und dient der Qualitätssicherung in der Produktentwicklung. Es kann als „Abbild des unternehmensspezifischen Produktentwicklungsprozesses verstanden werden“ (Voigt, 2005). Das Modell beschreibt dabei den Entwicklungsprozess auf einem bestimmten Abstraktionslevel, wodurch der Prozess für die Entwicklung verschiedenartiger Produkte eingesetzt werden kann.

Die Entwicklung eines bestimmten Produkts ist einmalig, komplex und zeitlich, finanziell sowie personell begrenzt. Sie wird daher als Projekt bezeichnet (Voigt, 2005). Da sich jedes einzelne Produktentwicklungsprojekt in Zeit, Ressourcenbelastung und Kosten unterscheidet, kann es als „eine konkrete, parametrisierte Instanz eines allgemeinen, generischen Produktentwicklungsprozesses“ (Voigt, 2005) verstanden werden.

Nachfolgend werden das Stage-Gate-Modell nach Cooper und das 3-Zyklen-Modell nach Gausemeier et al. (Gausemeier & Feldmann, 2006) zur Produktentwicklung mit ihren Eigenschaften und Unterschieden vorgestellt.

2.1.4 Stage-Gate-Modell

Cooper definiert das Stage-Gate-Modell als einen Ansatz zur Produktentwicklung. Er hebt hervor, dass die Produktentwicklung ein Prozess ist und daher mit Prozessmanagementmethoden organisiert werden kann (Cooper, 1990). Die Idee des Stage-Gate-Modells ist es, die Produktentwicklung in einzelne Phasen (Stages) zu unterteilen. Die einzelnen Phasen werden vor der Ausführung des Prozesses definiert, und für jede Phase

wird ein Paket von Aktivitäten festgelegt. Diese Aktivitäten stehen häufig in Bezug zueinander und können parallel bearbeitet werden. Zwischen diesen Arbeitspaketen kann es zu Iterationen oder Sprüngen in der Abarbeitung kommen (Cooper, 2008). Für eine Produktentwicklung sind je nach Unternehmen und Abteilung fünf bis sieben Phasen vorgesehen (Cooper, 1990).

Vor jeder Phase befindet sich ein Gate (siehe Abbildung 2-5), das zur Qualitätskontrolle dient. Ein Gate wird durch eine Eingabe, eine Ausgabe und vordefinierte Abnahmekriterien charakterisiert. Der Projektverantwortliche liefert als Eingabe ein oder mehrere Ergebnisse (Deliverables), die in der vorherigen Phase erarbeitet wurden. Diese Ergebnisse werden anhand der Abnahmekriterien einer Qualitätskontrolle unterzogen. Als Ausgabe folgt eine Entscheidung, ob die Produktentwicklung in die nächste Phase geht oder nicht. Die Entscheidung für den Start der nächsten Phase (Go-decision) wird anhand der vordefinierten Abnahmekriterien getroffen. Sollten die erbrachten Ergebnisse nicht den Anforderungen genügen, wird die nächste Phase nicht gestartet, solange die Ergebnisse nicht abnahmefähig sind (Hold-decision). Mit der Entscheidung für den Start der nächsten Phase wird ein Aktionsplan definiert, der die abzuarbeitenden Aufgaben der nächsten Phase enthält. In industriellen Entwicklungsprojekten wird ein Gate auch als Quality-Gate oder Meilenstein bezeichnet.

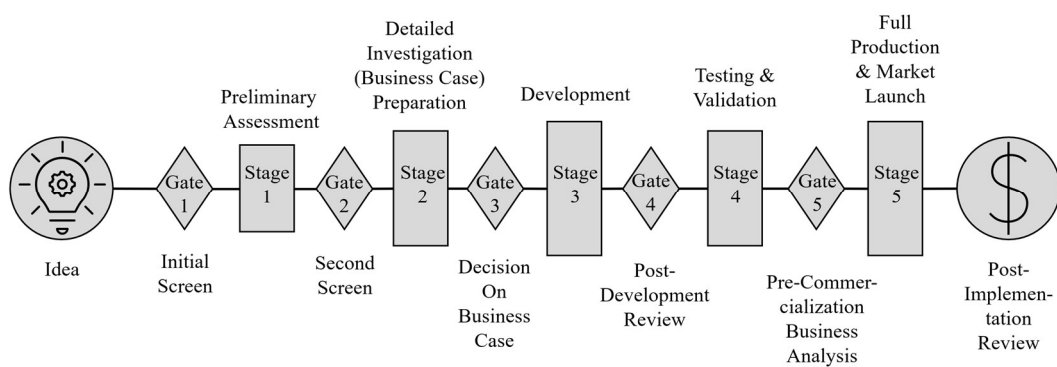


Abbildung 2-5: Stage-Gate-Prozess/System nach (Cooper, 1990)

Die Qualitätskontrolle und damit auch die Entscheidung zum Übergang in die nächste Phase sowie die Festlegung eines Aktionsplans übernehmen erfahrene Manager des Unternehmens. Cooper bezeichnet diese als „Gatekeeper“ (Cooper, 1990). Der Projektleiter kennt die geforderten Ergebnisse jedes Gates und ist für dessen Erbringung verantwortlich. Er steuert das Projektteam, das die Ergebnisse erarbeitet.

Ein Vorteil des Stage-Gate-Modells ist seine klare Qualitätsorientierung (Cooper, 1990). Die regelmäßigen Qualitätskontrollen an den Gates anhand der Abnahmekriterien ermöglichen es, Abweichungen von der geplanten Entwicklung aufzuzeigen und frühzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten. Dabei werden sowohl Abweichungen bei den Produkteigenschaften als auch Probleme beim Prozess untersucht. Beim Produktionsstart und bei der Markteinführung werden Schwächen im Produktkonzept deutlich. Diese Gates werden daher als „harte“ Quality-Gates bezeichnet (siehe Abbildung 2-5). Je mehr Gates eingeführt werden, desto häufiger kann eine Korrektur im Entwicklungsprozess erfolgen. Dies führt zu einer Stabilisierung des Prozesses und verhindert einen großen „Crash“. Das frühzeitige Erkennen und Korrigieren von Fehlern wirkt sich zusätzlich positiv auf die Produktreife aus. Werden hingegen nur wenige Gates definiert, so kann dies zu einem „Fehlerstau“ führen, der bei jedem Gate sichtbar wird (Pfeifer, et al., 2005).

Die einfache Struktur und die feste Zusammensetzung der Phasen und Gates bieten eine gute Transparenz und ermöglichen es, den Projektfortschritt jederzeit einsehen zu können (Cooper, 1990). Das Modell lässt sich an die jeweiligen Projektanforderungen anpassen, indem Phasen und Gates herausgenommen oder eingefügt werden (Cooper, 2008). Durch die vordefinierten Abnahmekriterien für jedes Gate werden die zu erbringenden Ergebnisse allen Projektbeteiligten transparent gemacht.

2.1.5 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung

Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung (siehe Abbildung 2-6) umfasst die Aufgabenbereiche der strategischen Produktplanung, der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung. Es bezieht sich speziell auf die Entwicklung mechatronischer Systeme (Czichos, 2015). In diesem Modell wird der Produktentstehungsprozess nicht als sequentielle Folge von Phasen und Meilensteinen verstanden, sondern in drei Zyklen definiert, die in gegenseitiger Abhängigkeit zueinanderstehen (Gausemeier & Feldmann, 2006).

Der erste Zyklus verfolgt das Ziel, eine erfolgreiche Produktstrategie zu entwerfen. Dazu ist der Zyklus in die Aufgabenbereiche Potenzialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung untergliedert (Gausemeier & Feldmann, 2006). Im Rahmen der Potenzialfindung werden Erfolgspotenziale für die Zukunft untersucht. Hierfür können verschiedene Methoden wie die Szenariotechnik oder Trendanalysen eingesetzt werden. Die anschließende Produktfindung umfasst die Suche nach neuen Produktideen auf der Basis der zuvor identifizierten Erfolgspotenziale. Nach der Produktfindung folgt eine Geschäftsplanung, die sich mit dem Produktprogramm beschäftigt und daraus eine Geschäfts- und Produktstrategie entwickelt. Hieraus ergibt sich ein Geschäftsplan, der

aufzeigt, ob die angestrebte Produktidee einen finanziellen Nutzen für das Unternehmen erzielt (Gausemeier & Feldmann, 2006).

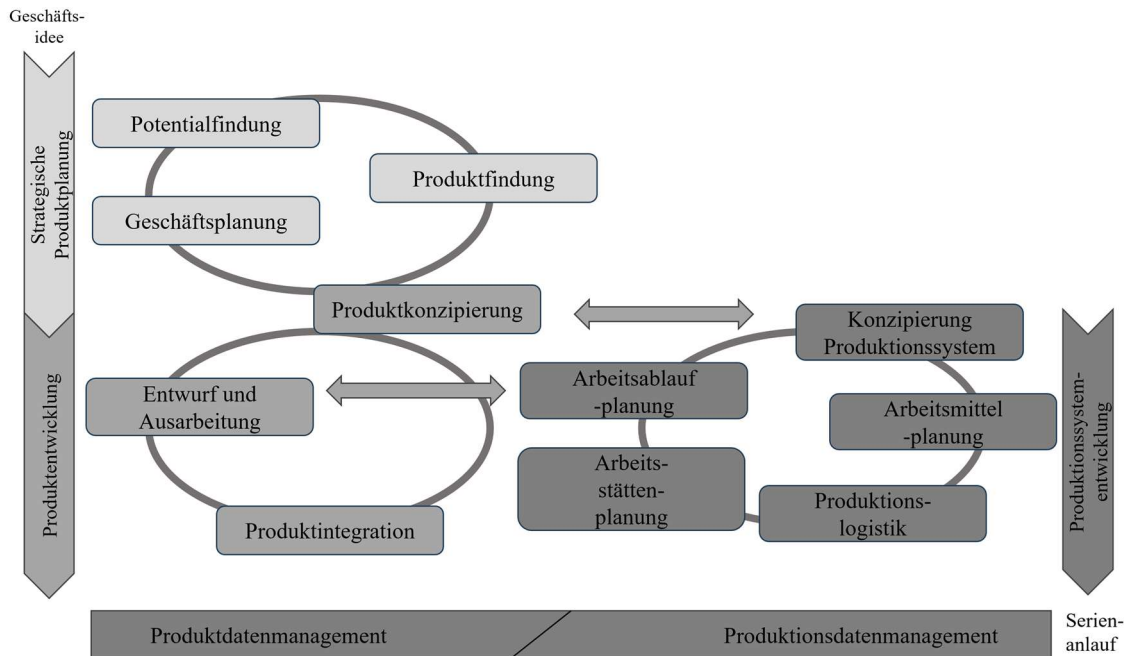


Abbildung 2-6: Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach (Gausemeier & Feldmann, 2006)

Der nachfolgende zweite Zyklus beinhaltet die Produktkonzipierung und den Entwurf in den Domänen Mechanik, Regelungstechnik, Elektronik und Softwaretechnik. Weiterhin werden die Einzelergebnisse zu einer verifizierten Gesamtlösung integriert. Die Entwicklung dieser mechatronischen Produkte wird häufig rechnerunterstützt mittels digitaler Modelle durchgeführt. In diesem Zusammenhang wird allgemein von rechnergestützter Entwicklung gesprochen (Computer-Aided Engineering, CAE). Das Ergebnis oder Zwischenergebnis der Entwicklung in diesem Zyklus wird als „virtuelles Produkt“ bezeichnet und stellt eine Prinziplösung dar (Gausemeier & Feldmann, 2006).

Im dritten Zyklus wird die Prinziplösung der Produktkonzipierung als Grundlage für die Entwicklung des Produktionssystems wieder aufgegriffen (Gausemeier & Feldmann, 2006). Die Konzipierung des Produktionssystems erfolgt unter Beachtung der Ablauf-, Arbeitsmittel- und Arbeitsstättenplanung sowie der Produktionslogistik. Es folgt eine Integration der Teilergebnisse zu einem Produktionssystem. Dieses Ergebnis wird als Prinziplösung des Produktionssystems bezeichnet (Gausemeier & Feldmann, 2006). Im Rahmen der rechnergestützten Entwicklung entstehen virtuelle Modelle einzelner Arbeitsplätze, einzelner Fertigungslinien oder des gesamten Produktionssystems. Hier wird auch von „virtueller Produktion“ oder „digitaler Fabrik“ gesprochen (Gausemeier & Feldmann, 2006).

Die Entwicklung des Produkts und des Produktionssystems erfolgt parallel und in enger Abstimmung miteinander. Diese Vorgehensweise bei der Entwicklung stellt sicher, dass das Ergebnis eine optimale Leistungsfähigkeit besitzt und minimale Kosten verursacht. Die Prinziplösungen des Produkts und des Produktionssystems ermöglichen eine Analyse des Entwicklungsstandes. Hierzu gehört beispielsweise die Untersuchung „der Entwicklungs- und Herstellkosten sowie der Robustheit gegenüber Änderungen und Störungen“ (Gausemeier & Feldmann, 2006).

Gausemeier et al. geben an, dass existierende Entwicklungsmethodiken entweder speziell auf eine Fachdisziplin ausgerichtet sind oder – im Falle einer fachdisziplinübergreifenden Entwicklungsmethodik – nicht alle Aspekte der Entwicklung eines komplexen Systems umfassen (Gausemeier & Feldmann, 2006). Die Autoren sehen Handlungsbedarf in der domänenübergreifenden Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, in der Nutzung von Bewertungswerkzeugen zur Evaluation von Kosten und Robustheit sowie in der Virtualisierung der Produktentwicklung. Sie entwickelten auf dieser Basis ein „Instrumentarium für die integrative Entwicklung des Produkts und des entsprechenden Produktionssystems“ (Gausemeier & Feldmann, 2006), das diesen Herausforderungen gerecht werden soll.

Eine weitere und allgemeingültige Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme ist die VDI-Richtlinie 2206. Auf diese Methodik wird im disziplinspezifischen Abschnitt 2.2.4 eingegangen (VDI 2206, 2004). Die vorgestellten Vorgehensmodelle für die Produktentwicklung beziehen teilweise die Entwicklung des Produktionssystems für die Herstellung der Produkte mit ein. Die Planung und Entwicklung der Produktionssysteme werden als Prozessplanung bezeichnet. Diese ist sowohl Teil des Produktentstehungsprozesses als auch Teil der Fabrikplanung.

2.1.6 Prozesse

Die Definition des Prozesses soll an dieser Stelle noch einmal präzisiert werden, da der Begriff in dieser Arbeit häufig verwendet wird.

Die genormte Definition eines Prozesses lautet: „Ein Prozess ist ein Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt.“ Nach einer anderen Definition bezeichnet der Prozess „jede Tätigkeit oder jeder Satz von Tätigkeiten, die bzw. der Ressourcen verwendet, um Eingaben in Ergebnisse umzuwandeln“ ((DIN), 2015).

Die Summe aller Prozesse charakterisiert im Wesentlichen ein Unternehmen und hat zusammen mit den Tätigkeiten das Ziel, ein wettbewerbsfähiges Produkt oder eine Leistung

zu erschaffen. Der Prozess beinhaltet dabei Tätigkeiten, die das „Wie“ bzw. die Vorgehensweise beschreiben (Brugger-Gebhardt, 2016).

Ein vollständiger unternehmerischer Prozess enthält dabei folgende Informationen:

- Aufgaben der Prozessbeteiligten,
- die Methoden, wie welche Tätigkeiten auszuführen sind,
- die Messgrößen, mit denen der Erfolg des Prozesses gemessen wird, oder
- die Risiken, die mit dem Prozess verbunden sind.

Er charakterisiert sich weiter durch die Interaktion von Menschen, Informationen und Mitteln (z. B. Infrastruktur, Techniken, Know-how, Anweisungen, Kapital). In Tabelle 2-1 sind typische Geschäftsprozesse zum besseren Verständnis aufgelistet.

Prozesstyp	Beispiele aus der Praxis
Managementprozesse	Strategische und operative Planung, Marketing, Controlling, Finanzbuchhaltung, Kommunikation, Budgetplanung, Qualitätsmanagementsystem
Unterstützende Prozesse	Wartung und Instandhaltung, Mitarbeiterqualifikation, Einarbeitung, IT, Gebäudemanagement
Wertschöpfende Prozesse	Arbeitsvorbereitung, Entwicklung, Konstruktion, Beschaffung, Vertrieb, Produktionsplanung, Produktionssteuerung, Auftragsabwicklung, Kundendienst, Kundenbetreuung
Verbesserungsprozesse	Prüfplanung, Fehlererfassung, Reklamationsauswertung, Datenauswertung, Qualitätskennzahlen, interne Audits, Maßnahmenmanagement

Tabelle 2-1: Typische Geschäftsprozesse nach (Brugger-Gebhardt, 2016)

2.1.7 Prozessplanung im Produktentstehungsprozess

Die Prozessplanung ist ein zentraler Bestandteil des Produktentstehungsprozesses (PEP) und umfasst die Planung, Gestaltung und Realisierung der Produktionssysteme und -prozesse. Sie ist entscheidend für die effiziente und termingerechte Herstellung von Produkten und trägt maßgeblich zur Qualitätssicherung bei (Günther & Tempelmeier, 2005).

Die Prozessplanung beginnt bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung und begleitet den gesamten Produktentstehungsprozess. Sie stellt sicher, dass alle notwendigen Ressourcen, Technologien und Abläufe optimal aufeinander abgestimmt sind, um ein marktfähiges Produkt zu entwickeln (Schneider, 2015). Dabei müssen sowohl interne als

auch externe Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, um flexibel auf Veränderungen reagieren zu können (Bullinger, 1986).

Die Prozessplanung lässt sich in mehrere Phasen unterteilen. In der Planungsphase werden die grundlegenden Anforderungen und Ziele definiert. Es werden Machbarkeitsstudien durchgeführt und erste Konzepte entwickelt (Schneider, 2015). In der Gestaltungsphase werden detaillierte Prozessabläufe und Produktionssysteme entworfen. Es werden Layouts erstellt und die notwendigen Maschinen und Werkzeuge ausgewählt (Günther & Tempelmeier, 2005). In der Realisierungsphase erfolgt die Umsetzung der geplanten Prozesse. Die Produktionssysteme werden installiert und getestet, und es werden Schulungen für das Personal durchgeführt (Bullinger, 1986). Nach der Inbetriebnahme werden die Prozesse in der Optimierungsphase kontinuierlich überwacht und optimiert, um Effizienz und Qualität zu steigern (Schneider, 2015).

Die Prozessplanung steht vor verschiedenen Herausforderungen, die sich aus der zunehmenden Komplexität der Produkte und der steigenden Dynamik der Märkte ergeben. Neue Technologien müssen in die bestehenden Prozesse integriert werden, was eine kontinuierliche Anpassung und Weiterbildung erfordert. Zudem muss die Prozessplanung effizient und kostengünstig erfolgen, um wettbewerbsfähig zu bleiben (Schneider, 2015). Die Prozesse müssen flexibel gestaltet sein, um schnell auf Änderungen in den Marktanforderungen reagieren zu können (Bullinger, 1986).

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wurden unterschiedliche Methoden und Werkzeuge entwickelt. Simulationsmodelle ermöglichen es, verschiedene Szenarien durchzuspielen und die Auswirkungen von Änderungen im Prozessablauf zu analysieren (Schneider, 2015). Lean Management zielt darauf ab, Verschwendung zu minimieren und die Wertschöpfung zu maximieren (Günther & Tempelmeier, 2005). Agile Prozessplanung fördert eine iterative und flexible Planung, die sich schnell an veränderte Bedingungen anpassen kann (Schneider, et al., 2012).

Die Prozessplanung ist ein wesentlicher Bestandteil des Produktentstehungsprozesses und trägt maßgeblich zum Erfolg eines Produkts bei. Durch eine sorgfältige Planung und kontinuierliche Optimierung können Unternehmen ihre Produktionsprozesse effizient und flexibel gestalten, um den Anforderungen des Marktes gerecht zu werden (Schneider, 2015).

2.1.7.1 Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess

Die agile Prozessplanung hat sich als Reaktion auf die steigende Komplexität und Dynamik moderner Produktionssysteme entwickelt. Ursprünglich aus der Softwareentwick-

lung stammend, hat sich das agile Konzept mittlerweile auch in der Prozessplanung etabliert. Ziel ist es, die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Prozesse zu erhöhen, um schneller auf Veränderungen reagieren zu können (Schneider, 2015).

1. *Grundlagen der agilen Prozessplanung*: Agile Prozessplanung basiert auf den Prinzipien der agilen Softwareentwicklung, die in den 2000er-Jahren populär wurden. Diese Prinzipien umfassen u. a. die iterative Entwicklung, die enge Zusammenarbeit im Team und mit den Stakeholdern sowie die kontinuierliche Verbesserung der Prozesse (Günther & Tempelmeier, 2005). Durch die Anwendung dieser Prinzipien auf die Prozessplanung können Unternehmen ihre Produktionssysteme flexibler und effizienter gestalten.
2. *Iterative Entwicklung und Flexibilität*: Ein zentrales Element der agilen Prozessplanung ist die iterative Entwicklung. Anstatt den gesamten Prozess im Voraus detailliert zu planen, werden kleinere, überschaubare Einheiten (Sprints) definiert, die in kurzen Zyklen (meist zwei bis vier Wochen) bearbeitet werden. Am Ende jedes Sprints wird das Ergebnis überprüft und gegebenenfalls angepasst. Diese iterative Vorgehensweise ermöglicht es, schnell auf Veränderungen zu reagieren und den Prozess kontinuierlich zu verbessern (Schneider, 2015).
3. *Zusammenarbeit und Kommunikation*: Ein weiterer zentraler Aspekt der agilen Prozessplanung ist die enge Zusammenarbeit im Team und mit den Stakeholdern. Regelmäßige Meetings wie das tägliche Stand-up-Meeting fördern den Austausch von Informationen und die schnelle Lösung von Problemen. Durch die Einbindung der Stakeholder in den Planungsprozess wird sichergestellt, dass deren Anforderungen und Erwartungen berücksichtigt werden (Bullinger, 1986).
4. *Kontinuierliche Verbesserung*: Die kontinuierliche Verbesserung ist ein zentrales Prinzip der agilen Prozessplanung. Durch regelmäßige Retrospektiven wird der Prozess analysiert und Verbesserungspotenziale werden identifiziert. Diese werden in den nächsten Sprints umgesetzt, wodurch der Prozess stetig optimiert wird. Dies führt zu einer höheren Effizienz und Qualität der Produktionssysteme (Günther & Tempelmeier, 2005).
5. *Herausforderungen und Lösungsansätze*: Die Implementierung agiler Methoden in der Prozessplanung ist nicht ohne Herausforderungen. Eine der größten Herausforderungen ist die Veränderung der Unternehmenskultur. Agile Methoden erfordern ein hohes Maß an Selbstorganisation und Eigenverantwortung der Mitarbeiter, was in traditionellen hierarchischen Strukturen oft schwer umzusetzen ist (Schneider, 2015). Um diese Herausforderung zu bewältigen, ist es erforderlich,

die Mitarbeiter frühzeitig in den Veränderungsprozess einzubinden und ihnen die notwendigen Schulungen und Ressourcen zur Verfügung zu stellen.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Anpassung der bestehenden Prozesse und Systeme an die agilen Methoden. Dies erfordert eine sorgfältige Analyse und gegebenenfalls eine Neugestaltung der Prozesse. Hierbei können Simulationsmodelle und andere Werkzeuge der Prozessplanung hilfreich sein, um die Auswirkungen von Änderungen zu analysieren und zu bewerten (Bullinger, 1986).

Die agile Prozessplanung bietet zahlreiche Vorteile für den Produktentstehungsprozess. Durch die iterative Entwicklung, die enge Zusammenarbeit im Team und mit den Stakeholdern sowie die kontinuierliche Verbesserung der Prozesse können Unternehmen ihre Produktionssysteme flexibler und effizienter gestalten. Trotz der Herausforderungen, die mit der Implementierung agiler Methoden verbunden sind, zeigt die Praxis, dass sich der Aufwand lohnt und zu einer höheren Effizienz und Qualität der Produktionssysteme führt (Schneider, 2015).

2.1.8 Produktverbesserung und Kundenfeedback

Die kontinuierliche Verbesserung eines Produkts ist ein zentraler Bestandteil des modernen Produktentwicklungsprozesses. Unternehmen stehen heute vor der Herausforderung, Produkte zu entwickeln, die nicht nur den aktuellen Marktanforderungen gerecht werden, sondern auch langfristig anpassbar und verbesserbar sind. Eine enge Verbindung zwischen dem Kundenfeedback und der Produktverbesserung ist hierbei unerlässlich. Dieser iterative Ansatz ermöglicht es Unternehmen, ihre Produkte dynamisch an die Bedürfnisse und Erwartungen der Kunden anzupassen (Ulrich & Eppinger, 2015).

Ein zentrales Konzept in der Produktverbesserung ist der Plan-Do-Check-Act-Zyklus (PDCA), auch bekannt als Deming-Zyklus. Dieser Ansatz sieht vor, dass Produkte nach ihrer Markteinführung ständig überprüft und, falls nötig, angepasst werden. Kundenfeedback spielt in diesem Prozess eine entscheidende Rolle, da es als bedeutsame Informationsquelle für die Produktoptimierung dient (Deming, 1986). Unternehmen nutzen Methoden wie Umfragen, Nutzertests und direkte Rückmeldungen, um Schwachstellen zu identifizieren und Verbesserungspotenziale zu erkennen (Griffin & Hauser, 1993).

Kundenfeedback ist nicht nur eine Quelle für die Produktverbesserung, sondern auch ein zentraler Faktor für Innovationen. Durch das Einholen von Feedback aus der realen Nutzung können Unternehmen erkennen, welche Funktionen und Eigenschaften des Produkts besonders geschätzt werden und welche Probleme noch bestehen. Dies erlaubt es, gezielte Verbesserungen vorzunehmen, die die Kundenzufriedenheit erhöhen und das Produkt

wettbewerbsfähiger machen (von Hippel, 2005). Insbesondere in der Softwareentwicklung, wo agile Methoden zunehmend Anwendung finden, wird das Feedback der Kunden in regelmäßigen Iterationen genutzt, um das Produkt stetig zu verfeinern und anzupassen (Beck, 2001).

Die Verbindung von Produktverbesserung und Kundenfeedback ist auch in der Produktlebenszyklus-Theorie fest verankert. Während der Reifephase eines Produkts liegt der Fokus darauf, durch Feedback und kontinuierliche Verbesserungen die Lebensdauer des Produkts zu verlängern und es wettbewerbsfähig zu halten (Levitt, 1965). Dies erfordert ein hohes Maß an Flexibilität und eine effiziente Schnittstelle zwischen Entwicklungsteams und Kunden.

Die zunehmende Digitalisierung und der Einsatz von cyber-physischen Systemen bieten neue Möglichkeiten zur kontinuierlichen Produktverbesserung. Sensoren und vernetzte Systeme erlauben es, Echtzeitdaten aus der Produktnutzung zu sammeln, die zur Optimierung der nächsten Generation des Produkts herangezogen werden können. Unternehmen, die diese Daten systematisch auswerten, sind in der Lage, Kundenfeedback automatisiert in ihren Entwicklungsprozess zu integrieren und somit schneller auf Marktveränderungen zu reagieren (Pahl, et al., 2007).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die kontinuierliche Produktverbesserung, basierend auf dem Feedback der Kunden, eine wesentliche Strategie für Unternehmen darstellt, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und Produkte zu entwickeln, die langfristig erfolgreich am Markt bestehen können.

2.1.9 Projektmanagement

Das Projektmanagement (PM) dient unter Einsatz von Prozessen dem Durchführen von Projekten. Die Aufgaben des PM sind u. a. das Initiieren, Planen, Steuern, Kontrollieren und Abschließen von Projekten. Mithilfe des PM sollen Projektziele qualitativ, termingerecht und im geplanten Kostenrahmen erreicht werden. Das sogenannte magische Dreieck des PM ist äquivalent zu Abbildung 2-4, dem Spannungsfeld des PEP, und definiert ebenfalls Zeit, Kosten und Qualität als wesentliche Größen. Die Projektziele sollen durch Erreichen der geforderten Qualität innerhalb einer geplanten Zeit sowie durch den Einsatz der optimalen Personal- und Kapitalressourcen verwirklicht werden.

Wie bei den Prozessen ist eine Normierung auch beim PM zu finden, so wird die „Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Initiierung, Definition, Planung, Steuerung und den Abschluss von Projekten“ als PM bezeichnet [DIN 69901-5:2009-01] ((DIN), 2009).

Aus praktischer Sicht zeichnet sich ein Projekt durch folgende Eigenschaften aus ((DIN), 2009):

- *Zielklarheit*
- *Einmaligkeit*: Neuartigkeit des Vorhabens
- *Schwierigkeit der Aufgabe*
- *Prozesscharakter*: Zusammensetzung aus vielen Arbeitsschritten
- *Terminierung*: Begrenzung der zur Verfügung stehenden Zeit
- *Teambildung*: Beteiligung mehrerer Personen
- *Ressourcenbegrenzung*

Die zeitliche Begrenzung durch Anfang und Ende sowie die Schaffung eines Produkts oder einer Dienstleistung ist dabei eine wesentliche Eigenschaft von Projekten. Im Allgemeinen durchläuft jedes Projekt einen sich wiederholenden Lebenszyklus, der sich in den Planungs- und Vorbereitungsprozess, die eigentlichen Projektaufgaben oder die Realisierungsphase sowie den Projektabschluss gliedert.

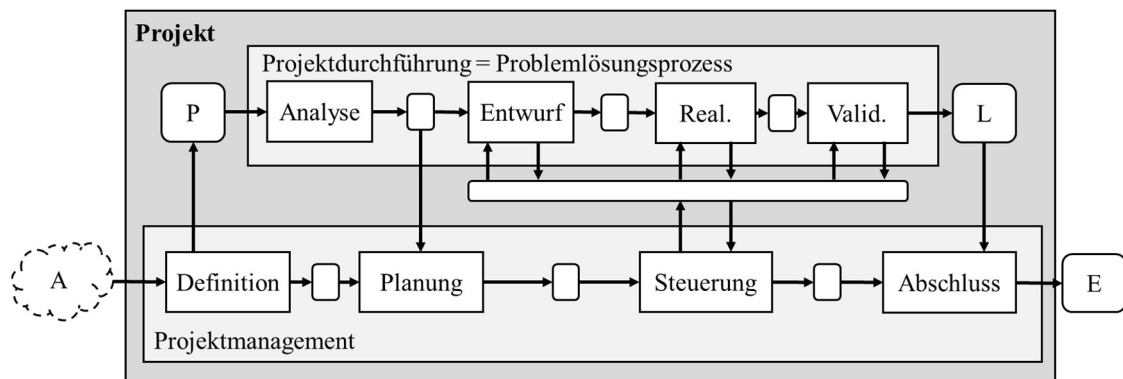


Abbildung 2-7: Schematische Struktur eines Projekts nach [DIN 69901-5:2009-01] ((DIN), 2009)

Innerhalb des Projektmanagements finden einzelne Problemlösungsprozesse statt, eine einfache schematische Darstellung dieses Ablaufs ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Dies ist als Idealisierung zu betrachten, dass es in fast allen Projekten zu Abweichungen oder zeitlichen Überlappungen der Aktivitäten kommt. Zudem sind in der Realität die Prozesse oft iterativ und werden nur im Idealfall einmalig durchlaufen.

2.2 Produktentwicklung disziplinspezifisch

Die Produktentwicklung in modernen Unternehmen ist ein zunehmend interdisziplinärer Prozess, der die Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen erfordert. Jede Disziplin, sei es Maschinenbau, Elektrotechnik, Softwareentwicklung oder Mechatronik, bringt spezifische Methoden, Tools und Ansätze in den Produktentwicklungsprozess ein. Dabei unterscheiden sich die Herangehensweisen in diesen Disziplinen teils erheblich, da die Anforderungen, Herausforderungen und Entwicklungsziele variieren. Während der Maschinenbau stark auf physische Produkte fokussiert ist, spielen in der Softwareentwicklung agile und iterative Vorgehensweisen eine zentrale Rolle. Auch die Elektrotechnik und Mechatronik integrieren zunehmend digitale Technologien und kollaborative Ansätze in ihre Entwicklung.

Diese unterschiedlichen disziplinspezifischen Ansätze müssen im Rahmen eines integrierten Produktentwicklungsprozesses harmonisiert werden. Ziel ist es, die Stärken jeder Disziplin optimal zu nutzen, ohne die Gesamtentwicklung zu verlangsamen oder zu fragmentieren. Dabei stehen die Kooperation zwischen den Teams sowie der Austausch von Wissen und Daten im Mittelpunkt. Im Folgenden werden die Besonderheiten der disziplinspezifischen Produktentwicklung in den jeweiligen Fachgebieten genauer betrachtet, um die Herausforderungen und Potenziale dieser interdisziplinären Zusammenarbeit aufzuzeigen.

2.2.1 Softwareentwicklung

Die Entwicklung mechanischer Komponenten stand in der Vergangenheit im Vordergrund des Produktentstehungsprozesses und die Softwareentwicklung stellte ein nachgeordnetes Thema dar. Nach einem grundsätzlichen Wandel in den letzten Jahren hat sich der Schwerpunkt in Richtung Softwareentwicklung bzw. Computer-Aided-Software-Engineering (CASE) verlagert. Auch der Anteil an den Entwicklungskosten ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. Aus diesem Grund und wegen der allgemeinen Bedeutung der Software-Entwicklung wird in diesem Teilabschnitt zuerst diese Thematik betrachtet. Um das Verständnis für Kapitel 5 zu verbessern, erfolgt an dieser Stelle eine kurze Übersicht über die Thematik.

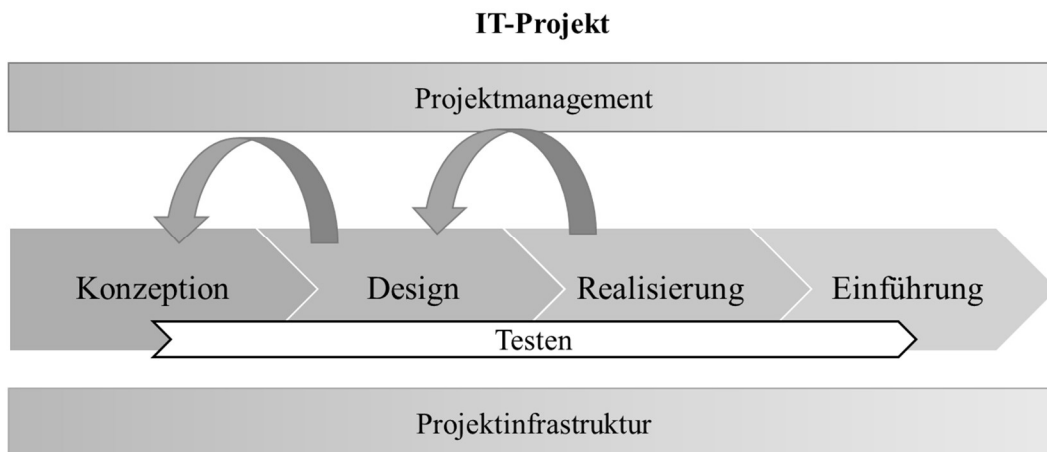


Abbildung 2-8: Basismodell der Softwareentwicklung nach (Brandt-Pook & Kollmeier, 2020)

Die prozesstechnischen Abläufe in den Bereichen der Softwareentwicklung unterscheiden sich oberflächlich nicht stark von denen des klassischen Engineerings. Bei genauerem Hinsehen sind die Inhalte aber stark unterschiedlich. In Abbildung 2-8 ist das Basismodell der Softwareentwicklung dargestellt.

2.2.1.1 Klassische Vorgehensmodelle

Klassische Vorgehensmodelle sind lineare und oft sequenzielle Ansätze zur Organisation des Produktentwicklungsprozesses. Diese Modelle sind vor allem in der industriellen Produktentwicklung weit verbreitet und haben sich als Standards etabliert, um komplexe Projekte strukturiert und nachvollziehbar zu steuern. Sie zeichnen sich durch eine klare Phasengliederung und feste Übergänge aus, die durch Meilensteine oder ‚Gates‘ voneinander getrennt sind. Solche Modelle eignen sich besonders für Projekte, bei denen die Anforderungen weitgehend stabil und die Entwicklungsabläufe vorhersehbar sind.

Ein prominentes Beispiel ist das Wasserfallmodell, das in den 1970er-Jahren als eine der ersten strukturierten Ansätze zur Softwareentwicklung bekannt wurde, aber auch in anderen Bereichen Anwendung fand (Royce, 1970). Es basiert auf einer Abfolge von Phasen, die nacheinander durchlaufen werden: Anforderungsanalyse, Entwurf, Implementierung, Integration, Verifikation und Wartung. Jeder dieser Schritte muss abgeschlossen sein, bevor der nächste begonnen wird. Die starre Struktur des Modells erlaubt es den Entwicklern, jedes Stadium vollständig zu dokumentieren und die Kontrolle über den Fortschritt zu behalten. Allerdings wird dieses Modell oft kritisiert, da es kaum Flexibilität für Änderungen während des Entwicklungsprozesses bietet (Boehm, 2006).

Ein weiteres klassisches Modell ist das V-Modell, das vor allem in sicherheitskritischen Bereichen wie der Automobil- oder Luftfahrtindustrie eingesetzt wird. Das V-Modell erweitert das Wasserfallmodell, indem es der Entwicklung eines Produkts die entsprechende Testphase zur Seite stellt. So spiegelt der linke Arm des „V“ die Entwicklungsphasen wider, während der rechte Arm die entsprechenden Test- und Validierungsphasen abbildet. Dies garantiert, dass jede Entwicklungsphase direkt durch eine Testphase überprüft wird, um sicherzustellen, dass alle Anforderungen erfüllt werden (Forsberg & Mooz, 1991). Dieser Ansatz betont insbesondere die Validierung und Verifikation, um die Fehleranfälligkeit komplexer Systeme zu minimieren.

Ein drittes, häufig verwendetes klassisches Vorgehensmodell ist das Stage-Gate-Modell von (Cooper, 1990), das in Abschnitt 2.1.4 detailliert beschrieben wird. Es teilt den Entwicklungsprozess in mehrere Phasen („Stages“) auf, die durch sogenannte „Gates“ voneinander getrennt sind. Jede Phase endet mit einem Entscheidungspunkt (Gate), an dem das Projekt nach vorgegebenen Kriterien überprüft und entweder fortgesetzt, modifiziert oder gestoppt wird. Dieses Modell erlaubt eine stärkere Kontrolle des Prozesses und minimiert Risiken, indem es regelmäßige Bewertungen des Fortschritts fordert. Es wird besonders in der Produktentwicklung angewendet, um sicherzustellen, dass alle Anforderungen in jeder Phase des Prozesses eingehalten werden. Ein Nachteil dieses Modells ist jedoch, dass es durch die regelmäßigen Prüfungen zusätzliche Zeit in Anspruch nimmt und den Prozess verlangsamen kann (Cooper, 2008).

Ein zentraler Aspekt dieser klassischen Modelle ist ihre Fokussierung auf Planungssicherheit und Kontrollierbarkeit. Ihr Fokus liegt auf ausführlichen Dokumentationen und formalen Überprüfungsschritten, um den Fortschritt zu sichern und Risiken zu minimieren. Diese Eigenschaften machen sie besonders geeignet für Projekte, bei denen die Anforderungen von Anfang an klar und stabil sind. Allerdings stoßen sie in dynamischen und schnell veränderlichen Umfeldern an ihre Grenzen. Flexibilität und die Fähigkeit, auf veränderte Anforderungen zu reagieren, sind oft eingeschränkt, was gerade in der heutigen, zunehmend agilen und digitalisierten Arbeitswelt als Hindernis empfunden wird (Sommerville, 2011).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass klassische Vorgehensmodelle zwar eine solide Basis für planungsintensive Projekte bieten, jedoch oft nicht flexibel genug sind, um den dynamischen Anforderungen moderner Produktentwicklung vollständig gerecht zu werden. Dennoch behalten sie in vielen Bereichen aufgrund ihrer klaren Struktur und der umfassenden Kontrolle über den Prozess ihre Relevanz.

2.2.1.2 Agile Vorgehensmodelle

Agile Vorgehensweisen im Produktentstehungsprozess haben ihren Ursprung in der Softwareentwicklung. Traditionelle, stark strukturierte Modelle wie das Wasserfallmodell

(Royce, 1970) und das V-Modell (Höhn & Rausch, 2008) stießen in der praktischen Anwendung auf Einschränkungen. Die Pioniere der agilen Softwareentwicklung formulierten im „Agile Manifesto“ die Grundsätze der agilen Entwicklung, die bis heute Bestand haben (Beck, 2001). Diese Grundsätze beinhalten die Fokussierung auf die Kundenanforderungen sowie die kontinuierliche Anpassung an die Wünsche des Kunden im Entwicklungsprozess. Zudem steht das Produkt und nicht der Entwicklungsprozess oder die Dokumentation im Vordergrund, und die Entwicklung soll in iterativen Zyklen ablaufen, wobei das Produkt schrittweise erstellt wird.

Die heute weitverbreitete Softwareentwicklungsmethodik Scrum basiert auf diesen Prinzipien und unterteilt den Entwicklungsprozess in kurze Zyklen, sogenannte Sprints (Schwaber, 1997). Zu Beginn jedes Sprints findet ein Planungsmeeting statt, in dem Aufgabenpakete, sogenannte „User-Stories“, definiert und im Entwicklungsteam abgestimmt werden (Schwaber & Beedle, 2002). Am Ende jedes Sprints gibt es eine Review-Sitzung, in der der Kunde Änderungswünsche einbringen kann, die im nächsten Sprint berücksichtigt werden (Schwaber & Beedle, 2002). Diese kurzzyklische Vorgehensweise reduziert das Risiko langfristiger Fehlentwicklungen, die nicht den Kundenanforderungen entsprechen (Pries & Quigley, 2011). Regelmäßige Feedbackschleifen und direkte Kommunikation im Team minimieren zudem den Dokumentationsaufwand (Cervone, 2011). Zudem konnte nachgewiesen werden, dass agile Ansätze die Entwicklungsleistung steigern können (Komus, 2013).

Ein besonderes Merkmal der agilen Softwareentwicklung ist die Dokumentation der Arbeitspakete in den User-Stories. Eine User-Story beschreibt eine Anwenderanforderung, die vom Entwickler umgesetzt wird. Sie sollte den „INVEST“-Kriterien entsprechen: Independent (unabhängig), Negotiable (verhandelbar), Valuable (wertvoll), Estimable (abschätzbar), Small (klein) und Testable (testbar) (Cohn, 2004); (Wake, 2003). Diese Kriterien stellen sicher, dass jede User-Story unabhängig von anderen bearbeitet werden kann und einen Wert für das Endprodukt hat.

Die Größe einer User-Story wird in relativen Einheiten geschätzt. Diese relative Schätzung ermöglicht den Vergleich verschiedener Funktionalitäten (Gloger, 2016). Zur Schätzung werden Story Points verwendet, die die Größe einer Funktion als dimensionslose Zahl ausdrücken (Cohn, 2004). Diese Schätzung erfolgt im Team während der Sprintplanung (Schwaber, 1997), wobei die Vorteile der Expertenschätzung genutzt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen (Jørgensen, 2004). Mit jeder Iteration verbessert sich die Schätzgenauigkeit durch die gewonnenen Erfahrungen (Eckstein, 2009); (Jørgensen, 2013); (Schwaber & Beedle, 2002). Methoden wie Planning Poker oder Magic Estimation unterstützen diesen Schätzprozess (Gloger, 2016).

Das grundsätzliche Vorgehen der Scrum-Methodik wird heute in der Entwicklung verschiedenster Produkte und im Projektmanagement angewandt (Pries & Quigley, 2011); (Komus, 2013). Borowski entwickelte ein agiles Vorgehensmodell zur Steuerung von Produktionsanläufen, das auf Scrum basiert (Borowski, 2011); (Borowski & Henning, 2013). Studien bestätigen die Übertragbarkeit agiler Methoden von der Softwareentwicklung auf andere Entwicklungsprojekte. Schneider et al. untersuchten speziell die Übertragbarkeit der Scrum-Methodik auf die Prozessplanung und bestätigten nach entsprechenden Anpassungen die Anwendbarkeit (Schneider, et al., 2012).

Agiles Manifest

Die *Prinzipien hinter dem Agilen Manifest* umfassen zwölf Thesen, die nachfolgend im Wortlaut aufgeführt werden:

„Wir folgen diesen Prinzipien:

1. Unsere höchste Priorität ist es, den Kunden durch frühe und kontinuierliche Auslieferung wertvoller Software zufriedenzustellen.
2. Heiße Anforderungsänderungen selbst spät in der Entwicklung willkommen. Agile Prozesse nutzen Veränderungen zum Wettbewerbsvorteil des Kunden.
3. Liefere funktionierende Software regelmäßig innerhalb weniger Wochen oder Monate und bevorzuge dabei die kürzere Zeitspanne.
4. Fachexperten und Entwickler müssen während des Projektes täglich zusammenarbeiten.
5. Errichte Projekte rund um motivierte Individuen. Gib ihnen das Umfeld und die Unterstützung, die sie benötigen, und vertraue darauf, dass sie die Aufgabe erledigen.
6. Die effizienteste und effektivste Methode, Informationen an und innerhalb eines Entwicklungsteams zu übermitteln, ist im Gespräch von Angesicht zu Angesicht.
7. Funktionierende Software ist das wichtigste Fortschrittsmaß.
8. Agile Prozesse fördern nachhaltige Entwicklung. Die Auftraggeber, Entwickler und Benutzer sollten ein gleichmäßiges Tempo auf unbegrenzte Zeit halten können.
9. Ständiges Augenmerk auf technische Exzellenz und gutes Design fördert Agilität.
10. Einfachheit – die Kunst, die Menge nicht getaner Arbeit zu maximieren – ist essenziell.

11. Die besten Architekturen, Anforderungen und Entwürfe entstehen durch selbstorganisierte Teams.
12. In regelmäßigen Abständen reflektiert das Team, wie es effektiver werden kann, und passt sein Verhalten entsprechend an.” (Beck, 2001)

Scrum

Die Scrum-Methodik ist eine der populärsten agilen Entwicklungsmethoden und wurde in den 1990er-Jahren von Ken Schwaber und Jeff Sutherland entwickelt. Scrum legt den Fokus auf iterative und inkrementelle Prozesse, bei denen Entwicklungsteams in kurzen, fest definierten Zeitabschnitten, sogenannten Sprints, arbeiten. Ein Sprint dauert typischerweise zwei bis vier Wochen, und am Ende jedes Sprints steht ein funktionsfähiges Produktinkrement. Die zentrale Idee von Scrum ist es, Teams autonom und selbstorganisiert arbeiten zu lassen, um so auf dynamische Anforderungen und Veränderungen schnell reagieren zu können (Schwaber & Sutherland, 2017).

Scrum hebt sich von anderen klassischen Vorgehensmodellen wie dem Unified Process ab, da es iterative und inkrementelle Zyklen nutzt. Der Unified Process, entwickelt von Ivar Jacobson, Grady Booch und James Rumbaugh, ist ein anpassungsfähiges Rahmenwerk, das sich stark auf die Modellierung und Analyse stützt und sich über mehrere Disziplinen erstreckt, aber oft als zu schwergewichtig für schnelle Anpassungen an dynamische Umgebungen angesehen wird (Kruchten, 2004). Scrum hingegen reduziert die Komplexität durch kürzere Iterationen und eine stärkere Kundenbeteiligung, wodurch es agiler auf Änderungen reagieren kann.

Extreme Programming

Auch die Unterschiede zu Extreme Programming (XP), einer weiteren agilen Methode, sind signifikant. XP legt großen Wert auf technische Praktiken wie Pair Programming, Testgetriebene Entwicklung (TDD) und kontinuierliche Integration, während Scrum mehr Wert auf die Organisation des Teams und die Planung von Arbeitsabläufen legt. Beide Methoden teilen jedoch die Grundprinzipien der Agilität wie iterative Entwicklung und schnelle Feedbackschleifen, unterscheiden sich jedoch in der Ausführung (Beck, 2004).

Feature-Driven Development

Eine weitere agile Methode, die häufig im Zusammenhang mit Scrum erwähnt wird, ist Feature-Driven Development (FDD). FDD ist ein leichtgewichtiges agiles Modell, das sich auf die schrittweise Entwicklung von Features konzentriert. Es ist besonders in größeren Projekten nützlich, da es den Fokus auf die Aufteilung von Projekten in kleinere Features legt, die dann nacheinander implementiert werden. Während FDD sich eher auf

technische Aspekte der Entwicklung konzentriert, zielt Scrum darauf ab, den Entwicklungsprozess durch regelmäßige Überprüfungen zu optimieren (Palmer & Felsing, 2002).

Rapid Application Development

Der Vergleich von Scrum mit dem Rapid Application Development (RAD) zeigt, dass beide Methoden auf schnelle Entwicklung und frühes Kundenfeedback abzielen. RAD ist jedoch stärker darauf ausgerichtet, durch Prototyping und iterative Entwicklung schnelle Ergebnisse zu erreichen. Scrum, obwohl ebenfalls iterativ, legt mehr Wert auf strukturiertes Teammanagement und regelmäßige Retrospektiven, um die Arbeitsprozesse zu verbessern (Martin, 1991).

Das Konzept der Agile Enterprise bezieht sich darauf, agile Prinzipien nicht nur in der Softwareentwicklung, sondern in der gesamten Organisation anzuwenden. Hierbei wird Scrum oft als Management-Framework genutzt, um eine agile Unternehmenskultur zu etablieren, in der alle Ebenen des Unternehmens flexibel und reaktionsschnell auf Änderungen reagieren können (Dikert, et al., 2016). Die Idee ist, dass Unternehmen agiler werden, indem sie iterative Prozesse und kontinuierliches Feedback auf strategischer Ebene integrieren.

Agile Model-Driven Development

Ein weiteres relevantes Modell ist Agile Model-Driven Development (AMDD), das sich darauf konzentriert, Modellierung in agilen Entwicklungsprojekten zu integrieren. Im Gegensatz zu Scrum, das weniger Wert auf formale Modellierung legt, sieht AMDD vor, Modelle in jeder Iteration zu erstellen und zu verfeinern, um die Architektur eines Projekts zu steuern (Ambler, 2002). AMDD kann eine ergänzende Methode zu Scrum sein, wenn es um größere oder komplexere Systeme geht, bei denen eine Modellierung notwendig ist.

Dynamic Systems Development Method

Dynamic Systems Development Method (DSDM) ist eine weitere agile Methodik, die sich auf strenge Zeitvorgaben und die Priorisierung von Aufgaben konzentriert. Ähnlich wie Scrum arbeitet DSDM in kurzen Iterationen, legt jedoch einen stärkeren Fokus auf die Rolle des Kunden und die Verfügbarkeit von Ressourcen. DSDM wurde ursprünglich als Erweiterung des RAD-Modells entwickelt und zielt darauf ab, Projekte durch klare Ziele und Anforderungen effizient zu steuern (Stapleton, 1997).

Evolutionary Project Management

Schließlich ist EVO, Kurzform für Evolutionary Project Management, ein iteratives und inkrementelles Vorgehensmodell, das von Tom Gilb entwickelt wurde. Es ist einer der

ältesten agilen Ansätze und weist zahlreiche Prinzipien auf, die auch in Scrum zu finden sind, wie die kontinuierliche Verbesserung durch Feedback. EVO zielt darauf ab, Projekte durch kleine, aber häufige Lieferungen und Messungen zu optimieren (Gilb, 1988).

2.2.1.3 SaFe und LeSS

Die agile Produktentwicklung hat sich in den letzten Jahrzehnten durchgesetzt, um flexibler und effizienter auf sich ständig verändernde Marktanforderungen zu reagieren. Mit zunehmender Komplexität von Projekten und der Skalierung agiler Prinzipien auf große Organisationen entstanden spezifische Frameworks, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Zwei der bekanntesten skalierten agilen Frameworks sind das Scaled Agile Framework (SAFe) und Large Scale Scrum (LeSS). Beide Frameworks zielen darauf ab, agile Prinzipien auf große Teams und Unternehmen anzuwenden, unterscheiden sich jedoch in ihren Ansätzen und ihrer Umsetzung.

Scaled Agile Framework (SAFe)

Das Scaled Agile Framework (SAFe) wurde von Dean Leffingwell entwickelt und verfolgt das Ziel, agile Methoden auf Unternehmensebene zu skalieren, insbesondere in großen, komplexen Organisationen. SAFe kombiniert Prinzipien aus Lean, Agile und DevOps und bietet eine strukturierte Vorgehensweise, um die Zusammenarbeit zwischen Teams zu koordinieren und die Ausrichtung auf Geschäftsziele sicherzustellen (Leffingwell, 2019).

Ein zentrales Konzept von SAFe ist der Agile Release Train (ART), der mehrere agile Teams zusammenführt, um synchronisierte Lieferungen über einen längeren Zeitraum hinweg zu koordinieren. Ein ART arbeitet in iterativen Zyklen, den sogenannten Program-Increment(PI)-Zyklen, die in der Regel acht bis zwölf Wochen dauern. Diese Struktur ermöglicht es, dass verschiedene Teams aufeinander abgestimmt arbeiten, während sie gleichzeitig agil und inkrementell Produkte entwickeln (Knaster & Leffingwell, 2018).

SAFe unterstützt auch die Einbindung von Portfolio-Management-Funktionen, um sicherzustellen, dass die strategischen Ziele eines Unternehmens mit den agilen Entwicklungspraktiken in Einklang stehen. Dies wird durch Lean-Portfolio-Management (LPM) erreicht, das Ressourcenallokation und Finanzierungsentscheidungen in einem agilen Kontext ermöglicht. Der Vorteil von SAFe besteht darin, dass es eine klare Struktur für große Unternehmen bietet, die agile Methoden in einer koordinierten Weise anwenden möchten. Kritiker bemängeln jedoch, dass die starre Struktur von SAFe im Vergleich zu reineren agilen Methoden wie Scrum weniger Flexibilität bietet (Leffingwell, 2021).

Large Scale Scrum (LeSS)

Im Gegensatz zu SAFe ist Large Scale Scrum (LeSS) ein Framework, das versucht, die Einfachheit und die Kernprinzipien von Scrum auch auf große Organisationen zu übertragen. Entwickelt von Craig Larman und Bas Vodde, legt LeSS großen Wert darauf, den Scrum-Ansatz möglichst wenig zu verändern, auch wenn er auf zahlreiche Teams angewendet wird. LeSS basiert auf dem Prinzip, dass mehrere Scrum-Teams an einem einzigen Produkt arbeiten, mit einem gemeinsamen Product-Owner und einem gemeinsamen Product-Backlog (Larman & Vodde, 2016).

LeSS unterscheidet zwischen zwei Versionen: LeSS Basic, das für die Zusammenarbeit von zwei bis acht Teams vorgesehen ist, und LeSS Huge, das für mehr als acht Teams gedacht ist. Im Gegensatz zu SAFe versucht LeSS, die Hierarchieebenen minimal zu halten und den Fokus auf die Lieferung von Kundenwert zu legen. LeSS zielt darauf ab, cross-funktionale Teams zu fördern und die direkte Kommunikation zwischen Teams zu verbessern, um komplexe Projekte effizienter zu steuern.

LeSS betont die kontinuierliche Verbesserung durch Retrospektiven und Sprint-Reviews, ähnlich wie bei Scrum. Es fördert jedoch auch die Skalierung durch die Anwendung der gleichen Prinzipien, die in einem kleineren Scrum-Team verwendet werden. Das bedeutet, dass weniger Prozesse und zusätzliche Strukturen hinzugefügt werden, wie sie in SAFe zu finden sind (Larman & Vodde, 2013).

Vergleich und Anwendung im Kontext der Produktentwicklung

Während beide Frameworks – SAFe und LeSS – das Ziel verfolgen, agile Prinzipien auf größere Organisationen zu skalieren, unterscheiden sie sich grundlegend in ihrem Ansatz. SAFe ist ein stark strukturiertes Framework, das darauf abzielt, agile Praktiken mit traditionellen Unternehmensprozessen wie Portfolio-Management zu integrieren. Es bietet eine umfassende Lösung, die speziell für große, komplexe Organisationen entwickelt wurde, in denen zahlreiche Teams und Programme koordiniert werden müssen. LeSS hingegen versucht, die Agilität von Scrum aufrechtzuerhalten und möglichst wenig zusätzliche Struktur hinzuzufügen. Es wird angestrebt, die Teams direkt am Produkt arbeiten zu lassen und die Hierarchien flach zu halten.

Im Kontext der Produktentwicklung können beide Ansätze je nach Unternehmensgröße und -struktur unterschiedliche Vorteile bieten. SAFe eignet sich besonders für große Organisationen, die bereits eine etablierte Hierarchie und komplexe Prozesse haben und gleichzeitig agiler werden möchten. LeSS hingegen ist für Unternehmen geeignet, die einen starken Fokus auf das Produkt und die Teams legen und Agilität in ihrer reinsten Form aufrechterhalten möchten.

2.2.2 Maschinenbau

Die Überschrift für diesen Teilabschnitt ist bewusst gewählt, um die Spezifik der Thematik zu betonen, da der Begriff ‚Mechanik‘ zu einfach und ‚Ingenieurwesen‘ zu allgemein wäre. Der Begriff ‚Maschinenbau‘ hingegen deckt eine Vielzahl technischer Prozesse ab, die sowohl die Lösung technischer Probleme als auch die Mensch-Maschine-Interaktion umfassen. Ein zentraler Prozess im Maschinenbau ist das Konstruieren, das den kreativen und systematischen Prozess des Denkens, Entwerfens und Herstellens eines Produkts beschreibt (Pahl, et al., 2007). Dieser Prozess ist nicht nur ein mechanischer Vorgang, sondern auch ein intellektueller, bei dem die verschiedenen Eigenschaften eines Produkts festgelegt werden. Dies umfasst sowohl die geometrische Gestaltung durch Zeichnungen als auch die Analyse der Festigkeit mithilfe von Werkstoffgesetzen sowie die Untersuchung der Bewegungseigenschaften des Produkts.

Die Abbildung 2-9 zeigt eine schematische Darstellung des Zusammenwirkens von Modellen, Methoden und Daten im Kontext des Produktentwicklungsprozesses (PEP) nach (Pahl, et al., 2007). Hier folgt eine detaillierte Erklärung der einzelnen Elemente im Kontext des PEP:

1. *Modell*: Ein Modell im PEP ist eine vereinfachte Abbildung eines realen Systems oder Prozesses. Es dient als Grundlage, um komplexe Sachverhalte und Systeme im Produktentstehungsprozess zu verstehen und darzustellen. Modelle können dabei physische Modelle oder auch digitale Modelle sein, wie z. B. CAD-Modelle eines Produkts.
2. *Daten*: Daten sind die grundlegenden Informationen und Fakten, die zur Entwicklung eines Produkts benötigt werden. Dazu gehören technische Spezifikationen, Materialeigenschaften, Kundenanforderungen und weitere Produktinformationen. Diese Daten fließen in das Modell ein, um eine realitätsnahe Darstellung des Produkts oder Prozesses zu ermöglichen.
3. *(Arbeits-)Methode*: Die Methode beschreibt die Art und Weise, wie das Modell und die Daten genutzt und verarbeitet werden, um zu einem bestimmten Ergebnis zu gelangen. Im PEP könnte dies z. B. die Anwendung einer bestimmten Design- oder Simulationsmethode sein, um das Modell zu optimieren oder die Produktentwicklungszeit zu verkürzen. Die Methode ist der zentrale Prozessschritt, der die Transformation der Daten unter Zuhilfenahme des Modells ermöglicht.
4. *Produkteigenschaften*: Am Ende des Prozesses stehen die definierten Eigenschaften des Produkts, die durch die Anwendung der Modelle und Methoden sowie durch die Interpretation der Daten bestimmt werden. Dazu gehören beispielsweise Abmessungen, Gewicht, Materialeigenschaften oder auch funktionale Aspekte

wie die Leistung eines Produkts. Diese Eigenschaften resultieren aus dem Zusammenspiel von Modellen, Daten und der eingesetzten Methode.

Im Kontext des PEP hilft Abbildung 2-9, zu verstehen, wie Daten und Modelle durch systematische Arbeitsmethoden in konkrete Produkteigenschaften transformiert werden. Dieses Modell ist typisch für die strukturierte und methodische Vorgehensweise in der modernen Produktentwicklung, um effiziente, qualitativ hochwertige und marktfähige Produkte herzustellen.

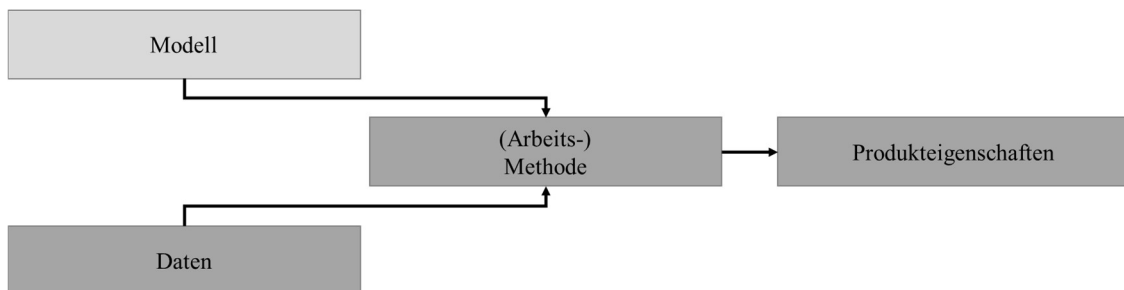


Abbildung 2-9: Arbeitsschritt beim Konstruieren nach (Pahl, et al., 2007)

Um den Konstruktionsprozess zu systematisieren, wurden verschiedene Vorgehensmodelle entwickelt. Hierbei ist der Entwicklungsprozess in vier Hauptphasen gegliedert, die in fast allen Modellen der Produktentwicklung wiederzufinden sind (Pahl, et al., 2007):

1. *Anforderungs- und Aufgabenklärung*: In dieser Phase werden die Anforderungen und die Problemstellung genau definiert.
2. *Konzipieren*: Auf Grundlage der Anforderungen werden Konzepte für mögliche Lösungen entwickelt.
3. *Entwerfen*: In der Entwurfsphase wird das gewählte Konzept detaillierter ausgearbeitet und erste Prototypen werden erstellt.
4. *Ausarbeiten und Detaillieren*: Diese Phase umfasst die abschließende Detailkonstruktion sowie die Erstellung technischer Zeichnungen und Spezifikationen.

Diese Schritte werden häufig in Verbindung mit der CAx-Prozesskette (Computer-Aided-x) durchlaufen, die heute eine zentrale Rolle im Maschinenbau spielt. Die CAx-Prozesskette umfasst verschiedene computergestützte Werkzeuge, die von der Konstruktion über die Berechnung bis hin zur Fertigung eingesetzt werden. In Abbildung 2-10 ist der Einsatz von CAx-Systemen beim rechnerunterstützten Konstruieren und Fertigen dargestellt (Hehenberger, 2011). In der Konstruktionsphase wird überwiegend die Computer-Aided-Design(CAD)-Technik eingesetzt, um detaillierte geometrische Modelle und Zeichnungen zu erstellen. CAD ermöglicht es Ingenieuren, ihre Entwürfe schnell zu visualisieren und zu analysieren, um eine frühzeitige Optimierung zu gewährleisten (Chua, et al., 2010).

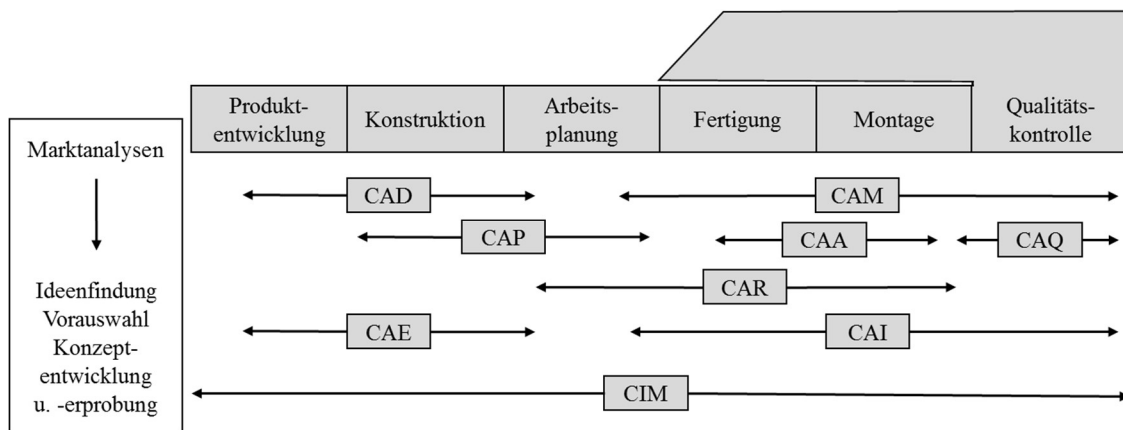


Abbildung 2-10: Einsatzgebiete von CAX-Systemen nach (Hehenberger, 2011)

Im Anschluss an die Konstruktion folgt in der Regel der Berechnungsprozess, der häufig als Computer-Aided-Engineering (CAE) bezeichnet wird. Dieser Prozess umfasst die Simulation und Analyse von mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Thermodynamik und Fluidodynamik. CAD und CAE arbeiten hierbei in einem iterativen Prozess zusammen, wobei Entwürfe schrittweise angepasst und verbessert werden, bis alle Anforderungen erfüllt sind (Pahl, et al., 2007). Erst nach Erreichen der geforderten Spezifikationen werden die nächsten Schritte im Produktentwicklungsprozess (PEP) eingeleitet, wie etwa die Fertigung.

Neben dem Maschinenbau hat sich die CAD-Technologie auch in anderen Bereichen etabliert, darunter die Architektur, das Design elektrischer Schaltungen und die Leiterplattenentwicklung. Die enge Verzahnung von CAD und CAE ermöglicht es, Produkte dynamisch und iterativ zu entwickeln, was die Effizienz und Qualität der Produktentwicklung erheblich verbessert (Vajna, et al., 2018).

In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die spezifischen Module der CAX-Prozesskette eingegangen, wie sie in Abbildung 2-10 dargestellt sind, um die Bedeutung dieser Technologien für den Maschinenbau und andere technische Disziplinen weiter zu erläutern.

2.2.3 Elektrotechnik

Als dritte wesentliche Fachdisziplin der technischen Produktentwicklung ist die Elektrotechnik von zunehmender Bedeutung. Die Relevanz elektrischer und mikroelektronischer Systeme ist in den letzten Jahrzehnten stetig gewachsen und spiegelt sich sowohl im gestiegenen Anteil an den Entwicklungskosten als auch im kontinuierlichen Innovationsfortschritt wider (Eigner & Stelzer, 2009). Besonders in Verbindung mit der Softwareentwicklung hat sich die Elektrotechnik zu einer der relevantesten und größten Disziplinen in der Produktentwicklung entwickelt. Wie im Maschinenbau wird auch die

Elektrotechnik durch moderne Methoden, Programmiersprachen und IT-Systeme unterstützt, die eine effiziente Entwicklung und Gestaltung ermöglichen.

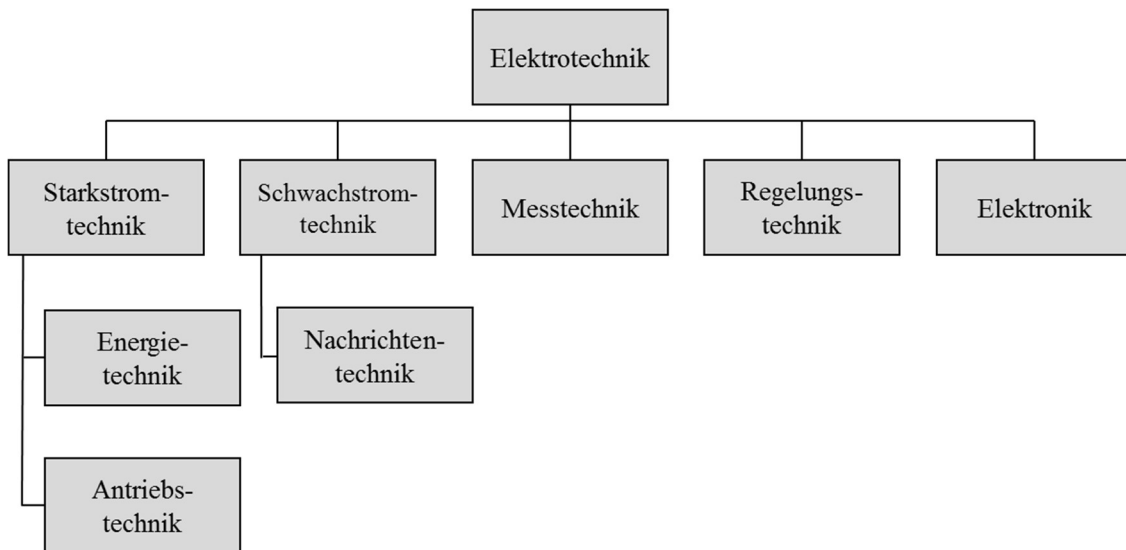


Abbildung 2-11: Unterdisziplinen der Elektrotechnik nach (Eigner & Stelzer, 2009)

Die Elektrotechnik lässt sich, wie in Abbildung 2-11 dargestellt, in verschiedene Unterdisziplinen gliedern, die je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Anforderungen und Spezialisierungen aufweisen (Eigner & Stelzer, 2009). Ein zentrales Anwendungsfeld in der Fahrzeugindustrie sind die Elektrik- und Elektroniksysteme (E/E-Systeme). Diese Systeme steuern und überwachen zahlreiche Funktionen moderner Fahrzeuge, von der Motorsteuerung bis hin zu sicherheitskritischen Anwendungen wie Airbags und Fahrerassistenzsystemen. Der Detaillierungsgrad dieser Systeme variiert je nach Einsatzgebiet und reicht von einfachen Leiterplattendesigns bis hin zu hochkomplexen, integrierten Schaltungen (ICs) (Vajna, et al., 2018).

Im Kontext dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf mechatronischen und cyber-physischen Systemen. Diese Produkte bestehen aus einer Kombination von mechanischen, elektrischen und softwarebasierten Komponenten, die in engem Zusammenspiel funktionieren. Der Detaillierungsgrad dieser Systeme reicht maximal bis zur Entwicklung von Leiterplatten, während komplexere mikroelektronische Systeme wie integrierte Schaltkreise (ICs) in dieser Betrachtung nicht weiter vertieft werden.

Ein zentraler Bestandteil der Elektrotechnik ist der Einsatz von E-CAD-Systemen (Electrical Computer-Aided Design), die äquivalent zu den CAD-Systemen im Maschinenbau eingesetzt werden. E-CAD-Tools dienen der rechnerunterstützten Konstruktion und Berechnung elektrischer Systeme, insbesondere in den Bereichen Elektrokonstruktion, Leiterplattenentwurf und Chipdesign. Diese Systeme ermöglichen es Ingenieuren, elektrische Schaltungen zu entwerfen, zu simulieren und zu optimieren, bevor sie in die

physische Produktion übergehen (Nerreter, 2006). E-CAD unterstützt somit den gesamten Entwicklungszyklus elektrischer Systeme und trägt maßgeblich zur Effizienz und Präzision der Produktentwicklung bei.

2.2.4 Mechatronik

Die Mechatronik bildet aus den Fachgebieten Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik eine systemtechnische Kombination. Der Begriff Mechatronic wurde im Jahr 1969 zum ersten Mal durch den Japaner Ko Kikuchi verwendet (Fumio, et al., 1996). „Die Sensorik, Aktorik, Regelung und Steuerung bilden die elementaren Stellglieder dieser Kombination. Die Mechatronik ist heute in jedem Bereich der Technik zu finden und von besonderer Bedeutung in den Ingenieursdisziplinen. Eine Definition der Mechatronik lautet wie folgt:

„The term mechatronics denotes an interdisciplinary field of engineering, including mechanics, electronics, controls, and computer engineering. Virtually every newly designed engineering product is a mechatronic system (Mahalik, 2003).“

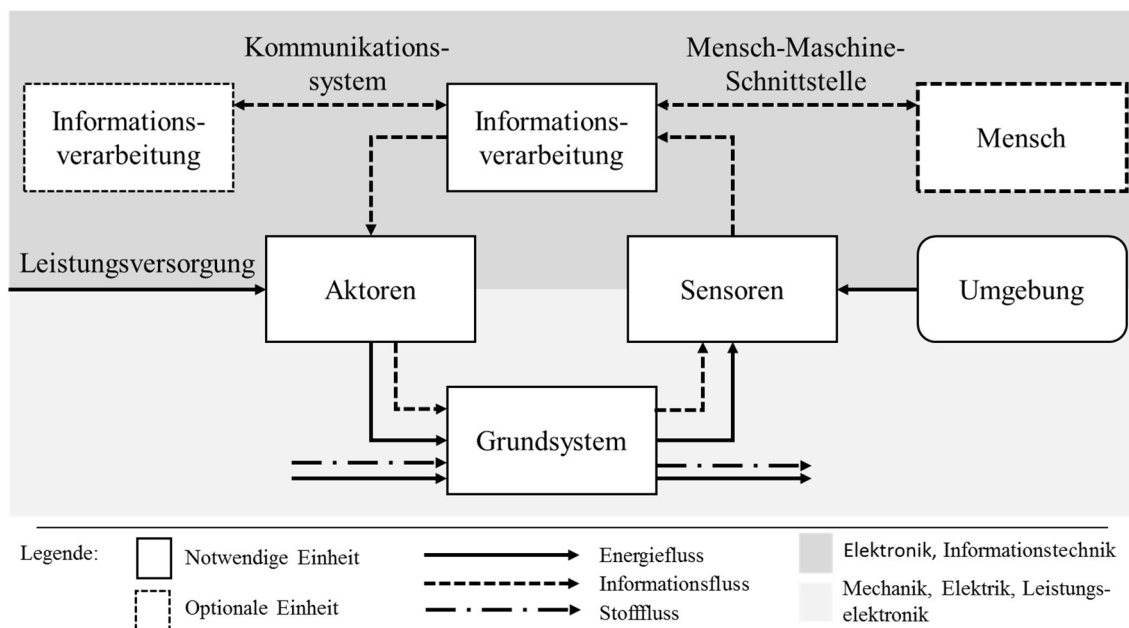


Abbildung 2-12: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach VDI 2206

Als Grundlage und zum besseren Verständnis ist in Abbildung 2-12 die Grundstruktur eines mechatronischen Systems dargestellt, in der die betroffenen Fachdisziplinen durch unterschiedliche Graustufen hervorgehoben sind. Das System ist charakterisiert durch einen Eingang, der Signale aufnimmt, verarbeitet und ausgibt sowie diese umsetzt, u. a. in Bewegungen und/oder Kräfte (VDI 2206, 2004). In Abbildung 2-12 sind die einzelnen Strukturen des mechatronischen Systems sowie der damit verbundene Stoff-, Energie-

und Informationsfluss zu sehen, der auch mit Mensch und Umwelt in Beziehung steht (VDI 2206, 2004). Wie im Maschinenbau existieren auch für die Mechatronik zahlreiche Vorgehensmodelle für die Entwicklung mechatronischer Produkte.

Der Schwerpunkt in der Entwicklungsarbeit ist abhängig vom zu entwickelnden Produkt, das den Anteil der jeweiligen Fachdisziplin festlegt. Im Rahmen der Theorie werden die Mechanik, Elektrik und Informatik gleichbehandelt. In der Praxis weicht dieses Vorgehen jedoch ab, was in Kapitel 5 genau beschrieben wird.

Das systemtechnische Denken hat sich gleichzeitig zur mechatronischen Produktentwicklung ausgebildet. Das sog. Systems Engineering (SE) wird als disziplinübergreifender Ansatz verstanden, komplexe technische Systeme und deren einzelne Zusammenhänge dokumentengetrieben zu beschreiben. Auch in Abbildung 2-12 ist ein abstrahiertes System im Sinne des SE dargestellt. Zur Nutzung im mechatronischen Umfeld ist das SE aufgrund seiner weitverbreiteten Integration in Software-Tools häufig anwendbar (u. a. Matlab/Simulink, Dassault CATIA V6, u. a.). Eine Systemstruktur wird aus interaktiven Systemelementen und einer zweckmäßig definierten Systemgrenze von der Umgebung beschrieben (Czichos, 2015).

2.2.5 Cyber-physische Systeme

Cyber-physische Systeme (CPS) sind intelligente, vernetzte Systeme, die durch die Integration von physikalischen und digitalen Komponenten entstehen. Diese Systeme verbinden mechanische und elektronische Bauteile mit Software, Sensoren und Netzwerken, um Informationen aus der realen Welt zu erfassen, zu verarbeiten und entsprechende Aktionen auszuführen. CPS spielen eine zentrale Rolle in der modernen Industrie 4.0 und haben weitreichende Auswirkungen auf die Produktentwicklung in zahlreichen Branchen von der Automobilindustrie bis zur Medizintechnik (Lee, et al., 2015).

Ein wesentliches Merkmal von CPS ist ihre Fähigkeit, über das Internet der Dinge (IoT) miteinander zu kommunizieren und auf Basis von Echtzeitdaten zu agieren. Sie ermöglichen es, Produkte und Prozesse intelligenter, effizienter und flexibler zu gestalten. Ein typisches Beispiel für ein CPS ist ein autonomes Fahrzeug, das mithilfe von Sensoren seine Umgebung in Echtzeit analysiert, Entscheidungen trifft und entsprechende Fahrmanöver ausführt. Die Integration von Software und physikalischer Infrastruktur macht solche Systeme möglich (Rajkumar, et al., 2010).

Im Maschinenbau und der Elektrotechnik spielen CPS eine immer zentralere Rolle bei der Entwicklung mechatronischer Systeme, die sowohl mechanische als auch elektrische Komponenten kombinieren. Diese Systeme sind oft hochgradig vernetzt und in der Lage, durch die Verarbeitung von Sensordaten selbstständig Entscheidungen zu treffen. In der

Automobilindustrie beispielsweise sind elektrische Steuergeräte (ECUs) in modernen Fahrzeugen zentrale Bestandteile cyber-physischer Systeme, die das Fahrverhalten und die Sicherheitsfunktionen überwachen und steuern (Monostori, et al., 2016).

Die Produktentwicklung von CPS erfordert einen interdisziplinären Ansatz, da sowohl mechanische als auch softwaretechnische Aspekte berücksichtigt werden müssen. Dabei spielen digitale Werkzeuge wie Computer-Aided Engineering (CAE) und Computer-Aided Design (CAD) eine entscheidende Rolle. Diese Werkzeuge ermöglichen es, physische Komponenten und Software parallel zu entwickeln und zu integrieren. Außerdem ermöglichen Simulationstechnologien die virtuelle Erprobung von CPS, bevor sie in die Produktion gehen (Gunes, et al., 2014).

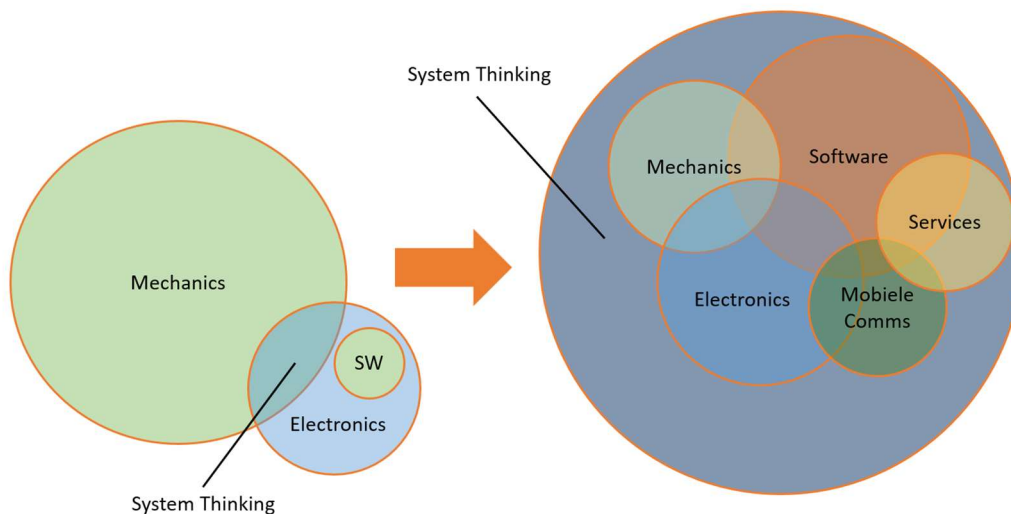


Abbildung 2-13: Cyber-physisches System nach (Kühnl, 2010)

Die Abbildung 2-13 veranschaulicht den Wandel eines Systems hin zu einem cyber-physischen System (CPS) und das damit verbundene Systemdenken. Es folgt eine detaillierte Erklärung der wesentlichen Punkte:

- *Mechanics, Electronics, Software (SW)*: Diese Darstellung zeigt die klassischen Disziplinen eines mechatronischen Systems. Dabei dominiert die Mechanik, während Elektronik und Software eher als unterstützende Komponenten betrachtet werden. Die Mechanik bildet traditionell den größten Anteil, während die Elektronik und die Software (SW) eine kleinere Rolle spielen.
- *System Thinking*: Das Systemdenken ist auf dieser Seite noch auf die Integration dieser drei Disziplinen beschränkt, wobei jede für sich relativ isoliert betrachtet wird.

- *Erweiterung zu einem cyber-physischen System (CPS):* Hier wird das Systemdenken umfassender dargestellt. Mechanik, Elektronik, und Software interagieren nun eng miteinander, und neue Disziplinen wie Mobile Communications (Mobile Comms) und Services treten hinzu.
- *Software als dominierendes Element:* Die Rolle der Software ist in der rechten Darstellung erheblich gewachsen und nimmt nun einen zentralen Platz ein. Dies spiegelt die wachsende Bedeutung von Software in modernen, vernetzten Systemen wider.
- *Services und mobile Kommunikation:* In cyber-physischen Systemen werden Dienste (Services) und mobile Kommunikationselemente als integraler Bestandteil des Systems betrachtet. Diese erweitern das traditionelle mechatronische System um Funktionen wie Vernetzung, Echtzeitdatenverarbeitung und Cloud-Services.

Die Abbildung 2-13 illustriert den Übergang von einem klassischen mechatronischen System, das stark auf mechanische und elektronische Komponenten fokussiert ist, hin zu einem cyber-physischen System, bei dem Software, Vernetzung und mobile Kommunikation eine entscheidende Rolle spielen. Systemdenken erfordert hier, alle Komponenten als vernetzt und interdependent zu betrachten, um eine integrierte, adaptive Systemarchitektur zu schaffen, die den Anforderungen moderner Technologien gerecht wird.

Die Abbildung 2-13 wurde aus „Software gibt den Takt vor“ von C. Kühnl, 2010 (Kühnl, 2010) adaptiert und verdeutlicht, dass die Softwareentwicklung zunehmend den Entwicklungsprozess bestimmt.

Die Entwicklung cyber-physischer Systeme folgt einem iterativen und dynamischen Prozess, in dem kontinuierliche Anpassungen und Optimierungen auf Basis von Echtzeitinformationen stattfinden. Dadurch können Unternehmen flexibel auf Änderungen in den Anforderungen oder der Umgebung reagieren, was insbesondere in stark regulierten Branchen wie der Luftfahrt oder der Medizintechnik von Vorteil ist (Shi, et al., 2011). Die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten ermöglicht es, den gesamten Lebenszyklus eines Produkts effizient zu gestalten, von der Entwicklung über die Produktion bis hin zur Wartung.

Ein weiteres zentrales Element von CPS ist die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsthematik. Da CPS oft sicherheitskritische Funktionen erfüllen, beispielsweise in autonomen Fahrzeugen oder medizinischen Geräten, müssen sie robust und fehlertolerant sein. Dies stellt hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung und die Testmethoden in der Produktentwicklung. Die Kombination von physikalischen und digitalen Komponenten erfordert umfassende Tests und Simulationen, um sicherzustellen, dass das Gesamtsystem in realen Umgebungen zuverlässig funktioniert (Lee & Seshia, 2017).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass cyber-physische Systeme die Art und Weise revolutionieren, wie Produkte entwickelt und betrieben werden. Durch die Kombination von mechanischen, elektronischen und digitalen Komponenten ermöglichen CPS eine höhere Flexibilität und Effizienz in der Produktentwicklung. Sie sind daher ein Schlüsselfaktor für den Erfolg moderner, vernetzter Produkte in der Industrie 4.0 (Kagermann, et al., 2013).

2.2.6 Interdisziplinarität

Die Interdisziplinarität ist ein Kennzeichen moderner Arbeitsweisen in allen Ingenieursdisziplinen und bezeichnet die Nutzung von Ansätzen, Methoden und Denkweisen verschiedener Fachdisziplinen. Eine Disziplin beschreibt dabei unter „Einhalten von bestimmten Vorschriften, vorgeschriebenen Verhaltensregeln o. Ä., das Sicheinfügen in die Ordnung einer Gruppe“, einen „Wissenschaftszweig; Teilbereich, Unterabteilung einer Wissenschaft“ (Dudenredaktion, 2004). Die Interdisziplinarität ist ein „Verfahren der Suche nach Problemlösungen durch Einbeziehung von Erkenntnissen möglichst aller durch ein Problem tangierten Fachdisziplinen“ (Alisch, et al., 2013). Der Fokus dieser Arbeit und der Produktentwicklung liegt auf den Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik. Die Entwicklung eines cyber-physischen Produkts bedeutet für ein Unternehmen den Aufbau eines interdisziplinären Mitarbeiterstamms und einen abteilungsübergreifenden Arbeitsprozess. Die interdisziplinäre Produktentwicklung erfordert eine Neustrukturierung der bisher getrennten Teil-Produktentstehungsprozesse. Dies stellt eine große Herausforderung für Unternehmen in den Bereichen des Wissensmanagements und der Kommunikation dar. Diese Interdisziplinarität findet sich in den Prozessen, Mitarbeitern und der IT-Infrastruktur wieder. Sie ist von der Multidisziplinarität zu unterscheiden, die sich mit der Arbeit unabhängiger Fachbereiche oder Disziplinen auseinandersetzt. Bei der Interdisziplinarität existiert in den verschiedenen Fachdisziplinen eine ähnliche oder identische Terminologie, die sich allerdings stark voneinander unterscheiden. Der Begriff ‚Hardware‘ kann als Beispiel genannt werden, dieser hat in den drei Fachdisziplinen eine unterschiedliche Bedeutung. Im Maschinenbau wird unter Umständen die Mechanik, in der Elektrotechnik elektrotechnische Komponenten und in der Informationstechnik die greifbaren Bestandteile eines Computers als Hardware bezeichnet. Funktionierende Interdisziplinarität wird durch einen Übersetzer oder Translator gewährleistet, dieser kann in Form eines Koordinators oder Managers bzw. einer geeigneten IT-Infrastruktur etabliert werden. Die Transdisziplinarität löst die bestehenden fachlichen Grenzen auf, um einen Informationsaustausch zu realisieren. Dies ist in der Realität nur schwer umzusetzen und setzt voraus, dass die Beteiligten aller Disziplinen über einen ähnlichen Wissensstand oder entsprechendes Fachvokabular verfügen.

2.2.7 Kollaboration

Der funktionierende interdisziplinäre Prozess setzt eine Kollaboration der Disziplinen voraus. Die Kollaboration wird als eine Form der Zusammenarbeit unterschiedlicher Bereiche bezeichnet. Die Interdisziplinarität bezeichnet nebeneinander existierende Disziplinen, die durch die Kollaboration zu einem funktionierenden dynamischen Gesamtprozess vereinigt werden. Abzugrenzen ist die Kollaboration von den Begriffen der Kooperation und Interaktion. Bei der Kooperation findet keine vollumfängliche Zusammenarbeit zur Realisierung aller Projektergebnisse statt und die Interaktion bezeichnet eine wechselseitige Zusammenarbeit der Beteiligten. Es existieren fünf konstituierende Merkmale bei einer Kollaboration (Werth, 2008):

- *Leistungserstellung*: Eine Leistung kann nur gemeinschaftlich und nicht durch einen einzelnen Kollaborationspartner erbracht werden.
- *Funktionale Abstimmung*: Die Leistungserstellung wird durch gegenseitige Abstimmung erbracht.
- *Prozessorientierung*: Die Kollaboration basiert auf einer Geschäftsprozessorientierung und einem gemeinsamen strukturellen Verständnis der Abläufe, die koordiniert werden.
- *Selbstständigkeit*: Es wird eine wirtschaftliche Entscheidungsfreiheit vorausgesetzt, sodass keine wirtschaftliche Abhängigkeit existiert.
- *Gleichberechtigung*: Die Partner sind in einer Kollaboration gleichberechtigt, unabhängig davon, ob sie sich in einer unterschiedlichen Hierarchieebene befinden.

Die Praxis unternehmerischer Prozesse bildet eine Mischform aus Kooperation, Interaktion und Kollaboration. Diese genaue Definition ist allerdings erforderlich, um die Dimension des Begriffes im Rahmen der Produktentwicklung zu erfassen.

2.2.7.1 Modellbasiertes Vorgehen

Das modellbasierte Vorgehen ist ein zentraler Ansatz in der modernen, interdisziplinären Produktentwicklung. Es ermöglicht eine effiziente Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung, indem alle Beteiligten auf ein gemeinsames Modell zugreifen. Diese Modelle dienen als „Single Source of Truth“ und integrieren alle relevanten Informationen, was die Konsistenz und Qualität im Entwicklungsprozess erhöht (Weilkiens, 2012).

Durch modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) werden physische und digitale Komponenten eines Systems miteinander verknüpft, was insbesondere in komplexen Projekten von Vorteil ist. Dies erleichtert die Zusammenarbeit, da es eine gemeinsame Sprache und Struktur schafft, die in allen Disziplinen verstanden wird (Estefan, 2008). Ein weiterer Vorteil des modellbasierten Vorgehens liegt in der Simulationsfähigkeit: Bereits in frühen Entwicklungsphasen können Modelle für Simulationen genutzt werden, um physikalische Eigenschaften zu analysieren und zu optimieren (Eigner & Stelzer, 2009).

Dieses Vorgehen fördert zudem eine enge Kollaboration, da es die funktionale Abstimmung zwischen den Teams erleichtert. Anforderungen aus verschiedenen Bereichen können direkt ins Design integriert und in Echtzeit angepasst werden. Dadurch werden sowohl Entwicklungszeit als auch Kosten reduziert und der gesamte Entwicklungsprozess wird dynamischer und flexibler gestaltet (Vajna, et al., 2009).

2.3 Produktentwicklung interdisziplinär

Die Produktentwicklung ist heute mehr denn je ein interdisziplinärer Prozess, der das Wissen und die Fähigkeiten aus verschiedenen Disziplinen vereint. Im modernen industriellen Kontext, insbesondere im Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Softwareentwicklung, können komplexe Produkte nur durch die Zusammenarbeit von Experten aus unterschiedlichen Bereichen entstehen. Diese Interdisziplinarität ist notwendig, um den steigenden Anforderungen an Produkte wie Vernetzung, Automatisierung und Benutzerfreundlichkeit gerecht zu werden (Ehrlenspiel, et al., 2007).

2.3.1 Definition und Bedeutung der Interdisziplinarität

Interdisziplinarität bezeichnet die enge Zusammenarbeit von verschiedenen Fachbereichen, die traditionell in separaten Silos existieren. In der Produktentwicklung bedeutet dies, dass Mechanik, Elektronik, Software und andere Disziplinen nicht mehr unabhängig voneinander arbeiten, sondern ihre Expertise in einem integrierten Entwicklungsprozess einbringen. Ziel ist es, ein ganzheitliches Produkt zu schaffen, das nicht nur mechanisch funktioniert, sondern auch elektronisch und softwaretechnisch optimal integriert ist (Eigner, et al., 2014).

Die zunehmende Komplexität moderner Produkte, insbesondere in Bereichen wie cyberphysischen Systemen (CPS) und mechatronischen Systemen, erfordert eine enge Kooperation zwischen den Disziplinen. Beispielsweise muss ein Automobil heute nicht nur mechanisch einwandfrei konstruiert sein, sondern auch über hochentwickelte Elektronik und Software verfügen, um autonome Fahrfunktionen, vernetzte Dienste und sicherheitsrele-

vante Systeme zu unterstützen (Monostori, et al., 2016). Hier wird deutlich, dass die Produktentwicklung interdisziplinär sein muss, um solche komplexen Produkte zu realisieren.

2.3.2 Herausforderungen in der interdisziplinären Produktentwicklung

Die interdisziplinäre Produktentwicklung bringt zahlreiche Herausforderungen mit sich. Eine der größten Schwierigkeiten besteht darin, die unterschiedlichen Arbeitsweisen, Terminologien und Ziele der jeweiligen Disziplinen zu koordinieren. Ingenieure im Maschinenbau haben oft andere Prioritäten als Softwareentwickler oder Elektrotechniker, was zu Konflikten oder Verzögerungen führen kann, wenn die Abstimmung zwischen den Teams nicht reibungslos verläuft (Vajna, et al., 2009).

Ein weiteres Hindernis ist die Datenintegration. In zahlreichen Unternehmen arbeiten die entsprechenden Disziplinen mit unterschiedlichen Softwaretools und -Plattformen, was den Datenaustausch und die Zusammenarbeit erschwert. Hier setzen moderne Product-Lifecycle-Management(PLM)-Systeme an, die eine zentrale Plattform für alle Disziplinen bieten und den gesamten Lebenszyklus eines Produkts – von der Konzeption über die Entwicklung bis hin zur Produktion und Wartung – abdecken (Eigner & Stelzer, 2009). Diese Systeme ermöglichen es den verschiedenen Teams, ihre Arbeit zu synchronisieren und eine „Single Source of Truth“ zu schaffen, auf die alle zugreifen können.

2.3.3 Methoden und Modelle zur Förderung der Interdisziplinarität

Um die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen zu fördern, haben sich in der Praxis verschiedene Vorgehensmodelle etabliert. Eine zentrale Rolle spielt dabei das modellbasierte Systems Engineering (MBSE), das eine einheitliche Plattform für alle beteiligten Disziplinen bietet. Durch MBSE können mechanische, elektronische und softwaretechnische Anforderungen in einem gemeinsamen Modell abgebildet werden, das als Grundlage für den gesamten Entwicklungsprozess dient. Dies fördert nicht nur die Zusammenarbeit, sondern ermöglicht auch eine frühzeitige Identifikation von Konflikten und Optimierungspotenzialen (Weilkiens, 2012).

Ein weiteres etabliertes Konzept ist das Systems Engineering (SE), bei dem der interdisziplinäre Charakter der Produktentwicklung im Mittelpunkt steht. Systems Engineering integriert verschiedene Disziplinen und schafft eine ganzheitliche Sicht auf das Produkt. Ziel ist es, die Anforderungen aller Beteiligten frühzeitig zu erfassen und systematisch in den Entwicklungsprozess zu integrieren (Estefan, 2008).

Darüber hinaus hat sich in zahlreichen Unternehmen der Einsatz von agilen Methoden bewährt, insbesondere in der Softwareentwicklung. Methoden wie Scrum und Kanban

bieten flexible, iterative Ansätze zur Entwicklung und fördern eine enge Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass agile Methoden oft auf die Softwareentwicklung beschränkt bleiben und schwer auf andere Bereiche wie den Maschinenbau oder die Elektrotechnik übertragbar sind. Eine Möglichkeit, die Interdisziplinarität zu fördern, ist die Kombination von klassischen und agilen Methoden, wie sie im V-Modell XT oder im Hybrid Development Model angewendet werden (Boehm, 2006).

2.3.4 Vorteile der interdisziplinären Produktentwicklung

Die Vorteile der interdisziplinären Produktentwicklung sind vielfältig. Durch die enge Zusammenarbeit von Experten aus verschiedenen Disziplinen können komplexe Produkte schneller und effizienter entwickelt werden. Die frühzeitige Einbindung aller Beteiligten ermöglicht es, Probleme frühzeitig zu identifizieren und zu beheben, was den Entwicklungsprozess beschleunigt und die Qualität des Endprodukts verbessert (Vajna, et al., 2009).

Darüber hinaus führt die Integration verschiedener Disziplinen zu innovativeren Lösungen, da unterschiedliche Perspektiven und Ansätze in den Entwicklungsprozess einfließen. Dies gilt insbesondere für die Entwicklung von cyber-physischen Systemen, bei denen die Kombination von Mechanik, Elektronik und Software neue Möglichkeiten eröffnet, die in einem rein disziplinären Entwicklungsansatz nicht realisierbar wären (Rajkumar, et al., 2010).

Die interdisziplinäre Produktentwicklung ist in der modernen Industrie unerlässlich, um den steigenden Anforderungen an Produkte und Technologien gerecht zu werden. Sie ermöglicht es, komplexe Produkte effizienter zu entwickeln und innovative Lösungen zu finden, die den Anforderungen des Marktes und der Nutzer gerecht werden. Modelle wie MBSE und SE sowie moderne PLM-Systeme tragen dazu bei, die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen zu fördern und den Entwicklungsprozess zu optimieren. Es ist jedoch unerlässlich, dass Unternehmen in die richtigen Tools und Methoden investieren, um die Herausforderungen der Interdisziplinarität erfolgreich zu meistern.

2.4 Agile Vorgehensmodelle

Agile Vorgehensmodelle haben ihren Ursprung in der Softwareentwicklung, sind aber mittlerweile auch in anderen Industrien wie dem Maschinenbau weitverbreitet. Diese Modelle bieten eine flexible, iterative Herangehensweise, die es Teams ermöglicht, schnell auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren und kontinuierlich Verbesserungen in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Im Maschinenbau und anderen technischen Disziplinen wird das agile Vorgehen zunehmend eingesetzt, um komplexe Produkte effizienter

und schneller zu entwickeln. Dies ist besonders in einer Zeit von Bedeutung, in der Produktlebenszyklen immer kürzer und Marktanforderungen dynamischer werden (Lindemann, 2014).

2.4.1 Grundprinzipien agiler Vorgehensmodelle

Die agilen Vorgehensmodelle basieren auf flexiblen und iterativen Entwicklungszyklen, in denen verschiedene Disziplinen eng zusammenarbeiten. Die vier Grundwerte des Agilen Manifests (Schwaber & Sutherland, 2017), die ursprünglich für die Softwareentwicklung definiert wurden, lassen sich auch auf den Maschinenbau und andere technische Bereiche übertragen:

- *Individuen und Interaktionen über Prozesse und Werkzeuge:* Auch im Maschinenbau ist die direkte Zusammenarbeit zwischen den Fachleuten entscheidend, um komplexe Entwicklungsprozesse zu meistern. Hierbei sind die Abstimmungen zwischen Maschinenbauingenieuren, Elektrotechnikern und Produktionsplanern von zentraler Bedeutung.
- *Funktionierende Prototypen über umfassende Dokumentation:* Anstelle eines starren Entwicklungsplans werden im Maschinenbau funktionsfähige Prototypen in kurzen Zyklen erstellt und kontinuierlich verbessert.
- *Zusammenarbeit mit dem Kunden über Vertragsverhandlungen:* Im Maschinenbau arbeiten die Entwicklungsteams eng mit den Kunden zusammen, um sicherzustellen, dass dessen Anforderungen während des gesamten Entwicklungsprozesses berücksichtigt und umgesetzt werden.
- *Reagieren auf Veränderung über das Befolgen eines Plans:* Besonders in der Fertigungsindustrie können sich Anforderungen im Laufe eines Projekts ändern. Agile Methoden erlauben es, flexibel auf solche Änderungen zu reagieren, ohne dass der gesamte Prozess von vorne beginnen muss (Komus, 2013).

2.4.2 Agile Methoden im Maschinenbau

Im Maschinenbau gewinnen agile Methoden wie Scrum, Kanban und Extreme Programming (XP) zunehmend an Bedeutung, um den Herausforderungen einer flexiblen Produktentwicklung zu begegnen. Diese Methoden sind nicht mehr nur auf die Softwareentwicklung beschränkt, sondern werden genutzt, um den gesamten Produktentwicklungsprozess zu strukturieren und zu verbessern.

Scrum eignet sich beispielsweise, um die Entwicklung eines neuen Maschinenprototyps in kleinere, überschaubare Arbeitsschritte zu unterteilen. Diese Arbeitsschritte, sogenannte Sprints, haben in der Regel eine feste Zeitdauer von zwei bis vier Wochen, in der ein funktionsfähiger Prototyp oder ein Teilprodukt entwickelt wird. Nach jedem Sprint

wird das Ergebnis überprüft und mit dem Kunden oder internen Stakeholdern abgestimmt, bevor der nächste Sprint beginnt. Dadurch wird der Entwicklungsprozess flexibler und das Team kann schneller auf Feedback reagieren (Schwaber & Sutherland, 2017).

Kanban, ein weiteres agiles Vorgehensmodell, hat seinen Ursprung in der japanischen Automobilproduktion und ist eng mit dem Maschinenbau verbunden. Kanban visualisiert den Workflow und ermöglicht es, Engpässe frühzeitig zu erkennen und zu beheben. In der Produktentwicklung können mithilfe von Kanban Prozesse wie das Design, die Materialbeschaffung und die Fertigung effizienter gesteuert werden. Dadurch werden eine kontinuierliche Verbesserung und Optimierung des gesamten Produktionsprozesses ermöglicht (Anderson, 2010).

2.4.3 Vorteile agiler Vorgehensmodelle im Maschinenbau

Die agilen Vorgehensmodelle bieten zahlreiche Vorteile für die Produktentwicklung im Maschinenbau. Der wesentliche Vorteil ist die Flexibilität, die es den Entwicklungsteams erlaubt, schnell auf Änderungen in den Anforderungen oder in den Marktbedingungen zu reagieren. Dies ist besonders bedeutsam, da die Produkte in der Regel langfristig entwickelt werden und sich während der Entwicklung neue technologische Möglichkeiten oder Marktanforderungen ergeben können (Lindemann, 2014).

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, durch frühe Prototypen und regelmäßige Feedbackschleifen Fehler frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Dies reduziert das Risiko, dass erst am Ende des Projekts schwerwiegende Probleme auftreten, die zu kostspieligen Korrekturen führen würden. Durch die regelmäßige Überprüfung der Teilergebnisse während der Entwicklung können potenzielle Probleme sofort adressiert werden (Schuck, et al., 2015).

Agile Methoden fördern zudem eine effizientere Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen. Im Maschinenbau ist die enge Zusammenarbeit zwischen Konstruktions-, Produktions- und Qualitätsteams unerlässlich. Agile Methoden ermöglichen es diesen Teams, sich regelmäßig auszutauschen, gemeinsam Lösungen zu erarbeiten und den Entwicklungsprozess auf das gewünschte Ergebnis auszurichten.

2.4.4 Herausforderungen der Implementierung agiler Methoden im Maschinenbau

Obwohl agile Methoden zahlreiche Vorteile bieten, gibt es im Maschinenbau auch Herausforderungen bei der Implementierung. Eine der größten Herausforderungen ist die Integration agiler Prinzipien in bestehende, oft starre Unternehmensstrukturen. Traditionell werden Projekte im Maschinenbau langfristig und besonders detailliert geplant. Agilität

hingegen zielt auf flexible Anpassung ab, was mit der klassischen Planung kollidieren kann (Ehrlenspiel, et al., 2007).

Ein weiterer Punkt ist die Technologieabhängigkeit. Während agile Methoden in der Softwareentwicklung weitverbreitet sind, muss im Maschinenbau oft mit physischen Prototypen gearbeitet werden, die zeitaufwendiger und teurer zu entwickeln sind als digitale Produkte. Agile Methoden wie Scrum und Kanban können jedoch dabei helfen, diese Phasen effizienter zu gestalten und unnötige Verzögerungen zu vermeiden (Goll & Hommel, 2015).

Agile Vorgehensmodelle bieten einen erheblichen Mehrwert für die Produktentwicklung im Maschinenbau, indem sie die Flexibilität, Effizienz und Zusammenarbeit fördern. Sie ermöglichen es Teams, schneller auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren und kontinuierlich Verbesserungen in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Auch wenn Herausforderungen bei der Implementierung existieren, insbesondere in Bezug auf traditionelle Strukturen und die Abhängigkeit von physischen Prototypen, zeigt die Praxis, dass agile Methoden ein wertvolles Instrument für moderne Produktentwicklungsprozesse im Maschinenbau sind.

2.5 Virtuelle Produktentwicklung

Die virtuelle Produktentwicklung hat in den letzten Jahren einen signifikanten Wandel in der Industrie und insbesondere im Maschinenbau herbeigeführt. Sie ermöglicht es, den gesamten Entwicklungsprozess eines Produkts in einer virtuellen Umgebung abzubilden, wodurch Zeit- und Kostenaufwände für physische Prototypen reduziert werden und die Effizienz gesteigert wird. Durch den Einsatz modernster Software-Tools wie CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer-Aided Engineering) und PDM (Product Data Management) wird es möglich, komplexe Produkte in virtuellen Umgebungen zu entwerfen, zu testen und zu optimieren, bevor ein physisches Modell überhaupt produziert wird (Eigner & Stelzer, 2009).

Die virtuelle Produktentwicklung ist besonders in Bereichen mit hohen technischen Anforderungen wie Automobilbau, Luft- und Raumfahrt und Medizintechnik von zentraler Bedeutung. In diesen Sektoren können durch den Einsatz von Simulationen und virtuellen Modellen Entwicklungszyklen deutlich verkürzt werden, was wiederum einen Wettbewerbsvorteil schafft. Ein weiteres Ziel der virtuellen Produktentwicklung ist es, durch eine integrative und interdisziplinäre Zusammenarbeit die Anzahl physischer Prototypen zu reduzieren und so den gesamten Produktentwicklungsprozess zu optimieren.

2.5.1 Definition und Ziele der virtuellen Produktentwicklung

Die virtuelle Produktentwicklung beschreibt die Entwicklung und Optimierung von Produkten in einer vollständig digitalen Umgebung. Dabei werden digitale Modelle des Produkts erstellt und in verschiedenen Simulationsumgebungen getestet. Zu den wesentlichen Zielen der virtuellen Produktentwicklung gehört es, die Time-to-Market (Markteinführungszeit) zu verkürzen, die Produktqualität zu verbessern und die Entwicklungskosten zu senken. Durch den Einsatz von digitalen Prototypen und Simulationen können physische Prototypen minimiert werden, was Zeit und Ressourcen spart (Eigner & Stelzer, 2009).

Ein weiterer zentraler Aspekt der virtuellen Produktentwicklung ist die Interdisziplinarität. In der heutigen Produktentwicklung müssen Ingenieure aus verschiedenen Fachrichtungen – etwa Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung – eng zusammenarbeiten. Die virtuelle Umgebung ermöglicht es, dass diese Disziplinen synchron arbeiten und ihre jeweiligen Modelle und Daten integrieren. Durch die Verbindung der Disziplinen in einem digitalen Modell werden Fehler frühzeitig erkannt und es entsteht ein ganzheitliches Verständnis des Produkts.

2.5.2 Methoden und Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung

Die virtuelle Produktentwicklung basiert auf einer Vielzahl von Methoden und Werkzeugen, die den Entwicklungsprozess unterstützen. Die bedeutsamsten darunter sind:

1. *Computer-Aided Design (CAD)*: CAD-Systeme ermöglichen es Ingenieuren, detaillierte 3D-Modelle von Produkten zu erstellen. Diese Modelle dienen als Grundlage für Simulationen und Tests in späteren Phasen der Produktentwicklung. CAD ist heute unverzichtbar, um Produkte präzise zu entwerfen und bereits in der frühen Phase der Entwicklung zu visualisieren (Chua, et al., 2010).
2. *Computer-Aided Engineering (CAE)*: CAE-Tools bieten die Möglichkeit, die physikalischen Eigenschaften eines Produkts zu simulieren. Dies umfasst die Analyse von Belastungen, Strömungen, Temperaturen und Vibrationen. CAE-Tools spielen eine entscheidende Rolle, um die Lebensdauer und Funktionalität eines Produkts zu testen, bevor es physisch produziert wird (Eigner & Stelzer, 2009).
3. *Product Data Management (PDM)*: PDM-Systeme verwalten alle Daten, die im Laufe der Produktentwicklung generiert werden. Sie erlauben es, Versionen zu verfolgen, Daten zu speichern und den Zugriff auf Produktinformationen zu regeln. Dies sorgt dafür, dass alle Beteiligten stets auf die aktuellsten Informationen zugreifen können und keine unnötigen Verzögerungen oder Fehler aufgrund veralteter Daten auftreten (Eigner & Stelzer, 2009).

4. *Virtuelle Realität (VR) und Augmented Reality (AR)*: Durch VR und AR wird es möglich, digitale Modelle interaktiv zu erleben. Ingenieure können in virtuellen Umgebungen mit Modellen arbeiten und diese in einer realitätsnahen Umgebung testen. Dies erleichtert die Erkennung von Problemen und ermöglicht es, potenzielle Verbesserungen frühzeitig umzusetzen (Ovtcharova, et al., 2015).

2.5.3 Virtual Engineering

Eine bedeutende Weiterentwicklung im Bereich der virtuellen Produktentwicklung ist das Virtual-Engineering-Modell, das von Prof. Dr. Jivka Ovtcharova am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wurde. Das Modell beschreibt einen strukturierten, systematischen Ansatz zur Nutzung virtueller Techniken in der Produktentwicklung. Es verbindet traditionelle CAD- und CAE-Methoden mit modernen Ansätzen wie VR und AR, um eine umfassende, interdisziplinäre Plattform für die Entwicklung komplexer Produkte zu schaffen (Ovtcharova, et al., 2015).

Das Virtual-Engineering-Modell basiert auf der Integration von Digital Twins – also digitalen Zwillingen physischer Produkte – in den gesamten Entwicklungsprozess. Diese digitalen Zwillinge spiegeln das reale Produkt in einer virtuellen Umgebung wider und ermöglichen eine kontinuierliche Analyse und Optimierung des Produkts in Echtzeit. Die Besonderheit dieses Modells liegt darin, dass es nicht nur die technische Produktentwicklung, sondern auch Aspekte wie die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den beteiligten Disziplinen berücksichtigt. Es schafft eine Umgebung, in der Ingenieure, Designer und Produktionsplaner gemeinsam an einem digitalen Modell arbeiten und so ihre jeweiligen Expertisen integrieren können (Ovtcharova J., 2005).

Das Virtual-Engineering-Modell (siehe Abbildung 2-14) fördert die simultane Produktentwicklung, bei der verschiedene Disziplinen parallel an einem Produkt arbeiten, anstatt nacheinander. Dies verkürzt Entwicklungszeiten und verbessert die Qualität der Endprodukte, da potenzielle Probleme in einem frühen Stadium identifiziert und behoben werden können. Besonders in der Automobil- und Luftfahrtindustrie hat sich dieser Ansatz bewährt, wo die Komplexität der Produkte und die Notwendigkeit einer fehlerfreien Entwicklung besonders hoch sind (Ovtcharova, et al., 2015).

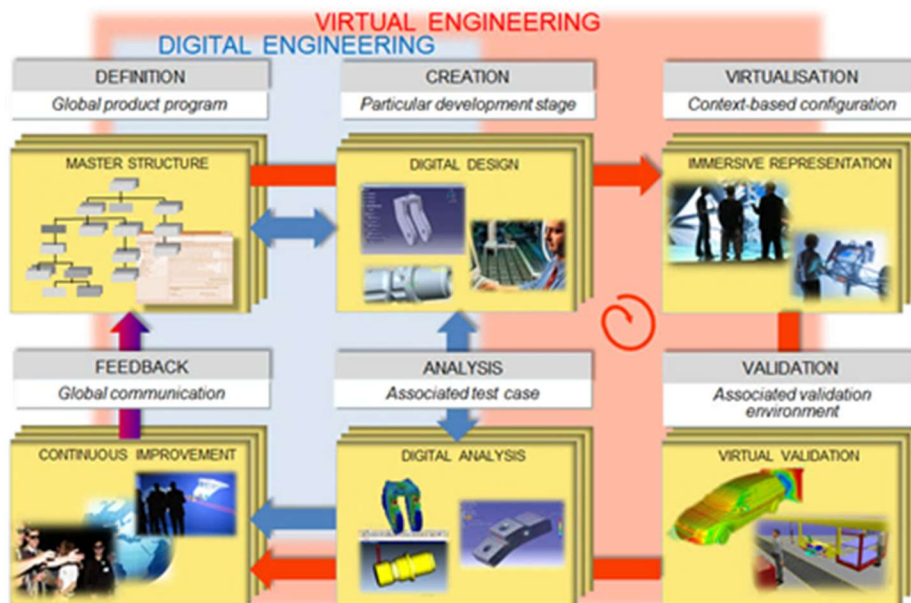


Abbildung 2-14: Prozesssicht des Virtual Engineering (Ovtcharova J., 2005)

Ein zentraler Aspekt des Virtual-Engineering-Modells ist die Interdisziplinarität. Es bietet den beteiligten Teams eine gemeinsame Plattform, auf der sie ihre jeweiligen Disziplinen zusammenführen können. Dadurch entsteht eine ganzheitliche Sicht auf das Produkt, die alle relevanten Faktoren – von der Mechanik über die Elektronik bis hin zur Software – berücksichtigt. Dies ist besonders bei mechatronischen und cyber-physischen Systemen von Vorteil, da hier verschiedene Disziplinen in einem integrierten Ansatz zusammenarbeiten müssen (Ovtcharova, et al., 2015).

2.5.4 Vorteile der virtuellen Produktentwicklung

Die Vorteile der virtuellen Produktentwicklung sind vielfältig und umfassen sowohl technologische als auch wirtschaftliche Aspekte. Zu den bedeutsamsten Vorteilen zählen:

- *Reduzierte Entwicklungszeiten:* Durch den Einsatz von digitalen Modellen und Simulationen können Entwicklungszyklen deutlich verkürzt werden. Produkte können schneller getestet und optimiert werden, was die Markteinführungszeit verkürzt (Chua, et al., 2010).
- *Kostenreduktion:* Da weniger physische Prototypen erforderlich sind, werden Materialkosten und Produktionszeiten eingespart. Zudem können Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden, was kostspielige Nachbesserungen vermeidet (Eigner & Stelzer, 2009).

- *Verbesserte Produktqualität:* Durch die Möglichkeit, Produkte in verschiedenen Szenarien zu testen und zu optimieren, wird die Qualität der Endprodukte verbessert. Die virtuelle Umgebung erlaubt es, komplexe Wechselwirkungen und Stressfaktoren zu simulieren, bevor das Produkt in die physische Produktion geht (Ovtcharova, et al., 2015).
- *Interdisziplinäre Zusammenarbeit:* Die virtuelle Produktentwicklung erleichtert die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen. Durch die Integration von CAD, CAE, PDM und Virtual Reality können alle Beteiligten in Echtzeit auf dieselben Informationen zugreifen und ihre Beiträge zum Entwicklungsprozess leisten (Stark, 2022).

Die virtuelle Produktentwicklung bietet weitreichende Möglichkeiten, um Entwicklungsprozesse zu optimieren und die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen zu verbessern. Insbesondere das Virtual-Engineering-Modell von Prof. Ovtcharova zeigt, wie eine integrative Plattform geschaffen werden kann, auf der Ingenieure, Designer und andere Fachleute zusammenarbeiten können, um komplexe Produkte effizient zu entwickeln. Die Nutzung moderner Technologien wie Digital Twins, Virtual Reality und Augmented Reality fördert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit und reduziert gleichzeitig die Entwicklungszeiten und -kosten. In der heutigen dynamischen Industrie ist die virtuelle Produktentwicklung daher ein unverzichtbares Werkzeug, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

2.5.5 Virtuelle Produktentwicklung und Front Loading

Im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung spielt das Konzept des Front Loadings eine zentrale Rolle. Bevor der eigentliche Produktentstehungsprozess beginnt, findet die strategische und organisatorische Ausrichtung auf das zukünftige Produkt statt, wie in der Phase „Definition“ (vgl. Abbildung 2-14) beschrieben. Ziel des Front Loadings ist es, die Funktionen, das Betriebsverhalten und die technologischen Eigenschaften eines Produkts bereits in der frühen Entwicklungsphase zu ermitteln und abzusichern. Dies wird durch den intensiven Einsatz digitaler Modelle, Simulationen und anderer Analysetools ermöglicht (Schuck, et al., 2015).

2.5.5.1 Front Loading – Frühzeitige Absicherung durch digitale Modelle

Der Begriff Front Loading beschreibt das Vorgehen, bei dem entscheidende Produktmerkmale bereits in den frühen Entwicklungsphasen festgelegt werden. In dieser Phase kommen digitale Werkzeuge wie Simulationen und Analysen zum Einsatz, um die Produktleistung zu validieren. Durch die Anwendung dieser Methoden wird sichergestellt, dass das Produkt sowohl funktional als auch wirtschaftlich optimiert wird, bevor größere Investitionen in die physische Produktion getätigt werden (Anderl & Liese, 2003). Diese

frühen Analysen sind besonders bedeutsam, da in dieser Phase der Produktentwicklung bereits ein Großteil der späteren Gesamtkosten festgelegt wird.

Grundlage für die Durchführung dieser Simulationen sind die in einem 3D-CAD-System erstellten Geometriemodelle der einzelnen Komponenten. In der Phase „Creation“ (vgl. Abbildung 2-14) des Virtual-Engineering-Prozesses werden diese Modelle parametrisch aufgebaut. Der parametrisierte Aufbau moderner CAD-Systeme ermöglicht eine wissensbasierte 3D-Modellierung, bei der das Konstruktionswissen durch Techniken wie Parametrik, Feature-Erstellung oder Templates direkt in die Modelle einfließt. Dies fördert eine flexible und adaptive Produktentwicklung, die auf wiederverwendbare Lösungsbau- steine abzielt (Schuck, et al., 2015).

2.5.5.2 Simulation und Analyse im virtuellen Produktentwicklungsprozess

In der virtuellen Produktentwicklung sind Simulationen und Analysen entscheidend, um physikalische Eigenschaften und Betriebsverhalten eines Produkts frühzeitig zu validieren. Dies wird in der Phase „Analysis“ (vgl. Abbildung 2-14) des Virtual-Engineering- Modells durchgeführt. Dabei kommen Methoden wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Einsatz, die es ermöglichen, physikalische Phänomene wie statische und dynamische Belastungen zu untersuchen. Diese numerischen Methoden lösen komplexe Systeme von Differentialgleichungen, um eine präzise Analyse der Produktstrukturen zu gewährleisten (Schuck, et al., 2015).

Das Simulationsmodell sollte problemorientiert in mehrere Teilsimulationsmodelle untergliedert werden, um die Komplexität zu reduzieren und spezifische Phänomene separat zu untersuchen. Ein integriertes Simulationsmodell (vgl. Abbildung 2-15) kann aus Makro- und Mikrosimulationen bestehen, die unterschiedliche Aspekte der Produktentwicklung aufzeigen. In der Makrosimulation werden kinematische und linearelastische Eigenschaften untersucht, während in der Mikrosimulation komplexere, nichtlineare Berechnungen durchgeführt werden, um beispielsweise die Betriebsfestigkeit zu überprüfen (Schuck, et al., 2015).

2.5.5.3 Parametrisierung und Automatisierung im Simulationsprozess

Eine wesentliche Stärke der virtuellen Produktentwicklung liegt in der Parametrisierung und Automatisierung des Simulationsprozesses. Basierend auf den initialen Geometriemodellen können Simulationen automatisiert angepasst und iterativ verbessert werden. Dies ermöglicht es, innerhalb kurzer Zeit mehrere Geometrievarianten zu untersuchen und zu optimieren, ohne dass manuelle Eingriffe erforderlich sind. Die Parametrisierung startet dabei parallel zur Entwicklung des Geometriemodells und wird kontinuierlich ergänzt und erweitert (Schuck, et al., 2015).

Zur Erleichterung des Simulationsprozesses kann ein Framework entwickelt werden, das als Schnittstelle zwischen CAD- und CAE-Systemen dient. Dieses Framework nutzt neutrale Datenformate, sodass es flexibel auf verschiedene CAD-Systeme anpassbar ist. Die Automatisierung sorgt dafür, dass Geometriemodelle und Simulationsdaten synchronisiert werden, während die manuelle Auswertung der Simulationsergebnisse weiterhin notwendig bleibt. Diese Automatisierung ermöglicht es, eine Vielzahl von Designvarianten schnell zu analysieren und die optimale Lösung zu finden (Anderl & Liese, 2003).

2.5.5.4 Validierung und Visualisierung im Virtual-Engineering-Prozess

Ein weiterer zentraler Bestandteil des Virtual-Engineering-Modells ist die Validierung und Visualisierung der Simulationsergebnisse. Diese Phase fällt unter die Kategorien „Virtualisation“ und „Validation“ (vgl. Abbildung 2-14). Mithilfe moderner Virtual-Reality(VR)-Technologien können die Ergebnisse der Simulation in einer realitätsnahen Umgebung visualisiert werden. Dies ermöglicht es den Entwicklungsteams, das Produkt in einem 1:1-Maßstab zu erleben und potenzielle Probleme oder Optimierungsmöglichkeiten in einer interaktiven Umgebung zu identifizieren (Ovtcharova, et al., 2015).

Diese Art der Visualisierung erleichtert nicht nur die Entscheidungsfindung, sondern erlaubt es auch, dass Endnutzer und Management frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Die Einbindung der Endnutzer in die Validierungsphase ist entscheidend, um sicherzustellen, dass das Produkt nicht nur technisch einwandfrei, sondern auch benutzerfreundlich und auf die Bedürfnisse des Marktes abgestimmt ist (Schuck et al., 2015).

Durch den Einsatz von VR können komplexe technische Informationen auch nichttechnischen Beteiligten verständlich gemacht werden. Dies fördert die Kollaboration zwischen verschiedenen Stakeholdern und ermöglicht es, Entscheidungen schneller und fundierter zu treffen (Ovtcharova, et al., 2015).

Das Konzept des Front Loadings in der virtuellen Produktentwicklung schafft die Möglichkeit, zentrale Produktmerkmale bereits in den frühen Phasen der Entwicklung abzusichern. Durch den Einsatz digitaler Modelle und Simulationen wird der gesamte Entwicklungsprozess beschleunigt und die Qualität der Produkte verbessert. Das Virtual-Engineering-Modell von Prof. Ovtcharova bietet eine integrative Plattform, durch die digitale Werkzeuge wie CAD, CAE und VR effizient genutzt werden können, um eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern und die Time-to-Market zu verkürzen. Die Parametrisierung und Automatisierung des Simulationsprozesses sowie die Nutzung moderner Visualisierungstechniken machen die virtuelle Produktentwicklung zu einem unverzichtbaren Werkzeug in der modernen Industrie (Ovtcharova, et al., 2005).

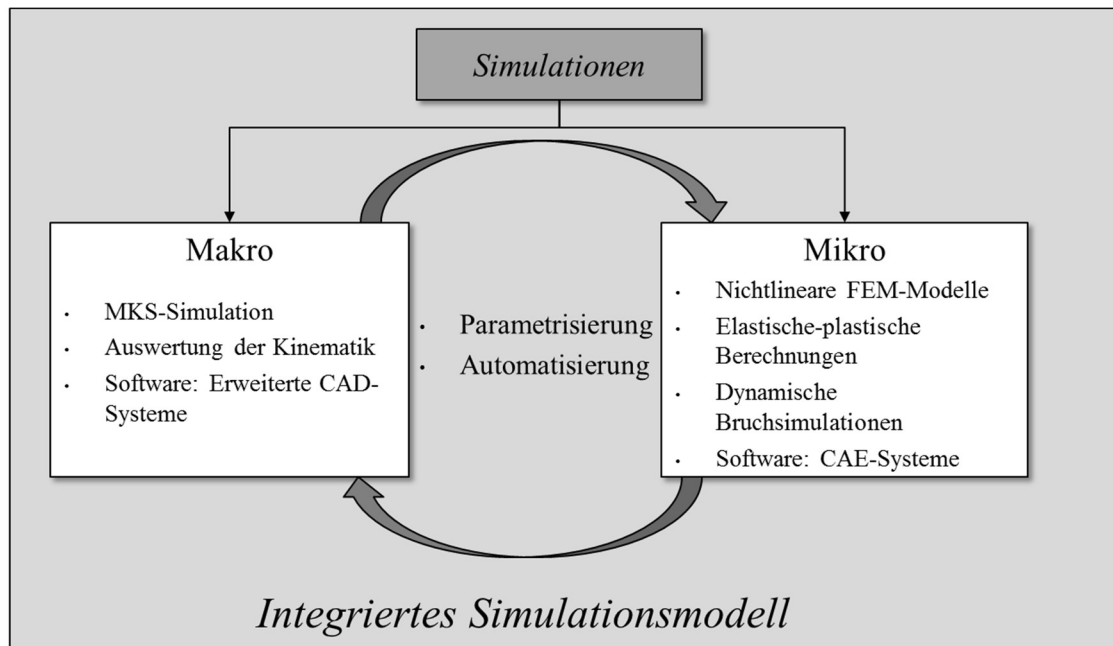


Abbildung 2-15: Integriertes Simulationsmodell nach (Schuck, et al., 2015)

2.5.6 Produktdatenmanagement

Im Kontext moderner Produktentwicklung spielt das Produktdatenmanagement (PDM) eine zentrale Rolle. PDM-Systeme ermöglichen die Verwaltung, Speicherung und Bereitstellung aller produktbezogenen Daten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg – von der Konzeption über die Entwicklung und Fertigung bis hin zur Wartung und Entsorgung. In der interdisziplinären Produktentwicklung, wie sie in dieser Arbeit beschrieben wird, stellt PDM die zentrale Plattform für den Austausch und die Synchronisierung von Informationen zwischen den beteiligten Disziplinen dar (Eigner & Stelzer, 2009).

PDM-Systeme sorgen dafür, dass alle relevanten Daten zu einem Produkt – wie CAD-Modelle, Stücklisten, Fertigungsdokumente und Simulationsdaten – an einem Ort gebündelt werden. Sie gewährleisten, dass jede Änderung, die im Laufe der Produktentwicklung vorgenommen wird, nachverfolgt und dokumentiert werden kann. Dadurch werden eine lückenlose Versionierung und Revisionskontrolle sichergestellt, was besonders in Projekten mit hoher Komplexität und einer Vielzahl von involvierten Fachabteilungen entscheidend ist (Eigner & Stelzer, 2001).

Ein weiterer zentraler Aspekt von PDM ist die Schnittstellenfunktion zu anderen IT-Systemen, insbesondere zu CAD-, CAE- und ERP-Systemen. Dies erlaubt eine nahtlose Integration von Design- und Simulationsdaten in die Fertigungsprozesse. Für die virtuelle Produktentwicklung, wie sie in dieser Arbeit im Zusammenhang mit dem Virtual-Engineering-Modell beschrieben wird, ist PDM von besonderer Bedeutung. Es stellt sicher,

dass digitale Modelle und Simulationsergebnisse konsistent und aktuell bleiben, indem alle Daten in einem zentralen System gepflegt und verwaltet werden (Ovtcharova, et al., 2015).

Darüber hinaus unterstützt PDM die Kollaboration in interdisziplinären Teams, indem es eine zentrale Plattform für die gemeinsame Bearbeitung und den Austausch von Daten bietet. Dies ist besonders relevant, um Silos zwischen den verschiedenen Disziplinen – wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung – aufzubrechen. Die Verfügbarkeit einer „Single Source of Truth“ verbessert nicht nur die Zusammenarbeit, sondern reduziert auch Fehler, die durch veraltete oder unvollständige Daten entstehen könnten (Eigner & Stelzer, 2009).

Die Implementierung eines PDM-Systems trägt außerdem zur Effizienzsteigerung bei, indem es repetitive Aufgaben automatisiert und Workflows wie die Freigabe von Dokumenten oder die Verwaltung von Änderungsanfragen optimiert. Dies führt zu einer besseren Kontrolle über den gesamten Entwicklungsprozess und verkürzt die Time-to-Market erheblich (Ehrlenspiel, 2009).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass PDM-Systeme in der modernen Produktentwicklung unverzichtbar sind, da sie die Verwaltung komplexer Datenstrukturen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit effektiv unterstützen. Sie tragen wesentlich dazu bei, Entwicklungsprozesse effizienter zu gestalten und die Qualität der Endprodukte zu steigern.

2.6 Wissensmanagement

Zusätzlich zu materiellen und humanen Ressourcen wurde Wissen zu einem weiteren zentralen Faktor für produzierende Unternehmen (REFA, 1990); (Westkämper, 2016). Der effiziente und systematische Umgang mit dem Produktionsfaktor Wissen wird unter dem Begriff Wissensmanagement (WM) zusammengefasst (Ortmann, et al., 2000). Heisig definiert das Wissensmanagement als „alle Verfahren, Methoden, Instrumente und Werkzeuge, die einen systematischen, methodengestützten Umgang mit Wissen in allen Bereichen und auf allen Ebenen der Organisation realisieren, um die organisatorische Leistungsfähigkeit der Geschäftsprozesse zu verbessern und zur Erreichung der Organisationsziele beitragen“ (Heisig & Ortmann, 2005).

Das Wissen eines Unternehmens lässt sich in verschiedene Wissensdomänen gliedern, wie beispielsweise Wissen über Produkte, über Kunden, über die eigene Organisation (z. B. Prozesse, Abläufe) oder Fach- und Methodenwissen (Ortmann, et al., 2000). Weiter lässt sich zwischen dem individuellen Wissen eines Mitarbeiters und dem organisationalen Wissen differenzieren (Heisig & Ortmann, 2005). Die Wissensintensität beschreibt

dabei, bis zu welchem Grad das im Unternehmen existierende Wissen tatsächlich Anwendung findet (Gronau, 2009).

Generell verfolgen Unternehmen das Ziel, Wissensvorsprünge durch Wissensmanagement (engl.: Knowledge Management, KM) zu erlangen, um Wettbewerbsvorteile realisieren zu können (Gronau, 2009); (Ortmann, et al., 2000). Konkrete Ziele sind eine optimale Nutzung bedeutsamer Unternehmensressourcen, eine Reduzierung der Time-to-Market, eine Verbesserung des unternehmensinternen Informationsflusses sowie eine effizientere Gestaltung der Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F&E-Projekte) (Lehner, 2023); (Meier & Weller, 2010).

Insbesondere im Bereich der Entwicklung ist ein breites Wissen über die verschiedenen Wissensdomänen hinweg notwendig, um eine gleichzeitige und effiziente Gestaltung des Produkts sowie des Entwicklungsprozesses zu realisieren (Ehrlenspiel, 2009). Schätzungen haben ergeben, dass bei einer Neuproduktentwicklung „auf über 75 % des vergangenen Produktwissens zurückgegriffen werden“ könnte (Lindemann, 2014).

Das Prozesswissen umfasst Informationen über den Prozessablauf und die beteiligten Ressourcen in Form von Personen, Rollen, Organisationseinheiten und Anwendungssystemen (Becker, 2012). Durch das Wissensmanagement in der Produktentwicklung lassen sich Änderungskosten reduzieren, indem notwendige Änderungen früh erkannt und umgesetzt werden (Dangelmaier, et al., 2002). Zusätzlich kann durch die Dokumentation und Wiederverwendung von Planungsinformationen und -ergebnissen die Effektivität der Prozessausführung gesteigert werden (Lindemann, 2014); (REFA, 1990). Das Wissen über den Entwicklungs- oder Planungsprozess wird in dieser Arbeit daher auch als prozessbezogenes Wissen bezeichnet.

Durch das mit jedem abgeschlossenen Projekt erworbene neue Wissen kann das bisherige Wissen ergänzt und erweitert werden, um die Entwicklung und Planung in Zukunft noch effizienter zu gestalten und die Produktqualität zu erhöhen (Farkisch, 2011). Um den Begriff Wissen genauer abzugrenzen, wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen erläutert.

2.6.1 Zusammenhang von Daten, Informationen und Wissen

Für die weitere Untersuchung der Begriffe Wissen und Wissensmanagement ist zunächst eine Abgrenzung zwischen Daten, Informationen und Wissen notwendig. Die Begriffe stehen in einem engen Zusammenhang zueinander und es lässt sich keine strikte Trennung zwischen ihnen vornehmen (Probst, et al., 2010). Daten sind Zeichen, die durch Ordnungsregeln (Syntax) miteinander verknüpft sind (Meier & Kaufmann, 2019). Im organisationalen Umfeld können Daten als Menge von diskreten und objektiven Fakten

über Aktivitäten und Transaktionen bezeichnet werden (Davenport & Prusak, 1998). Daten werden häufig in Dokumenten oder Datenbanken gespeichert. Zusätzlich zu den Daten selbst können sogenannte Metadaten abgegrenzt werden. Metadaten machen Angaben über andere Daten, beschreiben, identifizieren und klassifizieren diese (Eigner & Stelzer, 2001).

Informationen entstehen, wenn Daten durch weitere Werte ergänzt werden. Davenport und Prusak beschreiben die Methoden zur Transformation von Daten in Informationen durch die fünf Cs: „Contextualized, Categorized, Calculated, Corrected, Condensed“ (Davenport & Prusak, 1998). Wissen ergibt sich aus strukturierten Informationen, die durch Erfahrungen ergänzt werden. Das Wissen entsteht durch die Arbeit von Individuen, die Informationen durch Umwandlung, Vergleich und Herstellen von Verbindungen in Wissen umwandeln (Davenport & Prusak, 1998); (Mertins, et al., 2001). Somit ist Wissen im Gegensatz zu Daten und Informationen stets an Individuen gebunden (Probst, et al., 2010). Wissen existiert in einem Unternehmen nicht nur in Dokumenten und Datenbanken, sondern auch in organisatorischen Routinen, Prozessen, Praktiken und Normen (Davenport & Prusak, 1998).

Eine generelle Differenzierung in implizites Wissen (engl.: tacit knowledge) und explizites Wissen (engl.: explicit knowledge) hat sich in der Literatur durchgesetzt. Der Begriff des impliziten Wissens geht auf Polanyi zurück und umfasst Wissen, das stark personalisiert und schwer formalisierbar ist. Es ist dadurch schwer zu kommunizieren und mit anderen Individuen zu teilen (Polanyi, 1966). Explizites Wissen hingegen ist in Form von Dokumenten oder Datenbanken gespeichert und kann computertechnisch verarbeitet und übertragen werden (Nonaka & Takeuchi, 1995).

Durch explizites Wissen kann das Wissen eines Individuums an andere weitergegeben werden. Haben sich mehrere Individuen einer Organisation dasselbe Wissen angeeignet, so wird auch von kollektivem Wissen gesprochen (North, et al., 2016). Das kollektive Wissen einer Organisation ist mehr als die Summe des individuellen Wissens und daher von besonderem Wert für eine Organisation (Probst, et al., 2010).

Probst et al. beschreiben den Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen als ein Kontinuum. Zwischen den Grenzen von Daten und Wissen erfolgt eine schrittweise Weiterentwicklung von unabhängigen Zeichen zu „kognitiven Handlungsmustern“ (Probst, et al., 2010). Ebenso wird Wissen durch die längerfristige Interpretation und das Zusammenfügen einzelner Informationen generiert.

Nach dieser Abgrenzung des Begriffs Wissen wird nachfolgend der Wissenstransferprozess vorgestellt, da dieser einen wesentlichen Teil des organisationalen Wissensmanagements darstellt.

2.6.2 Der Wissenstransferprozess

Wissensprozesse beschreiben Aktivitäten zur Bearbeitung von Wissen. Sie verlaufen orthogonal zu Geschäftsprozessen und ermöglichen eine Ressourceneinsparung, die Wiederverwendung von Wissen sowie eine erhöhte Produktqualität (Hofer-Alfeis & van der Spek, 2003). Ein bedeutsamer Wissensprozess ist der Wissenstransferprozess. Der Wissenstransfer erfolgt dabei zwischen Transferpartnern und umfasst die Übertragung und die Internalisierung des transferierten Wissens (Warth, 2012).

Der Wissenstransferprozess nach von Krogh und Köhne besteht aus drei Phasen. In der ersten Phase, der ‚Initiierung‘, werden die Ziele des Wissenstransfers definiert. Weiterhin werden der Sender und der Empfänger des Wissenstransfers festgelegt. Sender und Empfänger des Wissens können dabei einzelne Personen, Gruppen oder Unternehmenseinheiten sein (Krogh & Köhne, 1998). In der zweiten Phase, dem ‚Wissensfluss‘, erfolgt die Übermittlung des impliziten und expliziten Wissens durch geeignete Methoden vom Sender an den Empfänger (Krogh & Köhne, 1998). Der Wissenstransfer kann dabei auf verschiedene Arten stattfinden. Pircher unterteilt diese in den Kodifizierungsansatz (People-to-Dokument-Ansatz), Personalisierungsansatz (People-to-People-Ansatz) und Sozialisierungsansatz (Pircher, 2014). Für eine globale Wissensweitergabe mit breiter Streuung des Wissens ist es jedoch zwingend erforderlich, dass das Wissen explizit gemacht wird (Krogh, et al., 2000).

In der dritten Phase des Prozesses, der ‚Integration‘, wird das transferierte Wissen in die Wissensbasis des Empfängers eingebunden. Dabei muss der Empfänger das Wissen aufgrund seiner Erfahrungen und bestehenden Wissensbasis einordnen, um es anschließend anwenden zu können (Krogh & Köhne, 1998). Bei der Integration des Wissens kann eine Anpassung notwendig sein, da nicht jedes Wissen unverändert in der Zielorganisation angewendet werden kann. Nur durch die Anpassung kann das Wissen korrekt erfasst und verankert werden (Davenport & Prusak, 1998); (Krogh, et al., 2000).

Durch den Transfer von Wissen von einem Individuum an die Organisation findet eine Diffusion des Wissens statt, die eine Bewahrung des Wissens und eine mehrfache Nutzung ermöglicht (Behrends, 2010)). Speziell in der Produktentwicklung kann so die Effizienz durch ‚Frontloading‘ gesteigert werden (Thomke & Fujimoto, 2000). Darüber hinaus kann sich die Qualität des Wissens durch die Aufbereitung durch den Empfänger evolutionär steigern, wodurch die Qualität der organisationalen Wissensbasis insgesamt erhöht wird (Hellgrath & Kuhn, 2002).

Neben dem hier vorgestellten Wissenstransferprozess von von Krogh und Köhne existieren in der Literatur zahlreiche weitere Modelle und Konzepte. Speziell den Wissenstransfer und -austausch betreffend, ist eine Übersicht bei (Lehner, 2023) zu finden. Ein Auszug allgemeiner Wissensmanagementmodelle wird nachfolgend vorgestellt.

2.6.3 Wissensmanagementmodelle

Zur Strukturierung und Organisation des Wissensmanagements wurden in der Wissenschaft zahlreiche Modelle entwickelt. Im Folgenden werden zwei der bekanntesten und am weitesten verbreiteten Modelle – das von Nonaka und Takeuchi sowie das von Probst et al. – näher erläutert.

2.6.3.1 SECI-Modell nach Nonaka und Takeuchi

Die Autoren Nonaka und Takeuchi beschreiben ein Modell zur Wissensgenerierung, das insbesondere die organisationsinterne Generierung von Wissen betrachtet. Das Modell baut dabei auf den verschiedenen Wissensarten in Form des impliziten und expliziten Wissens auf (Nonaka & Takeuchi, 1995). Diese Wissensformen stehen in gegenseitiger Interaktion, wobei vier verschiedene Formen der Wissenstransformation zwischen implizitem und explizitem Wissen auftreten (Nonaka & Takeuchi, 1995). Das Modell unterscheidet die Dimensionen ‚Formalisierungsgrad‘ und ‚Organisationsstufe‘. Der Formalisierungsgrad des Wissens kann dabei den Zustand expliziten oder impliziten Wissens einnehmen. Beide Wissensformen sind gegenseitige Komplementäre. Die Organisationsstufe reicht von einem einzelnen Individuum bis zu einer organisationsübergreifenden Einheit (Nonaka & Takeuchi, 1995).

Die vier Formen Sozialisierung (engl.: socialization), Externalisierung (engl.: externalization), Kombination (engl.: combination) und Internalisierung (engl.: internalization) der Wissenstransformation werden im Folgenden vorgestellt und sind in Abbildung 2-16 visualisiert. Der Begriff SECI-Modell ergibt sich als Akronym aus den Anfangsbuchstaben der Formen.

Die Transformationsform der Sozialisierung von implizitem Wissen auf implizites Wissen erfolgt zwischen einzelnen Individuen. Wissen wird dabei durch Beobachtung, Imitation und Anwendung ohne explizite Aussprache zwischen Individuen ausgetauscht. Dies kann im Unternehmen beispielsweise bei der Einarbeitung neuer Mitarbeiter erfolgen, indem der neue Mitarbeiter die Vorgehensweise eines erfahrenen Mitarbeiters beobachtet und diese übernimmt. Entscheidend ist, dass beide Individuen dabei eine gemeinsame Erfahrung erleben (Nonaka & Takeuchi, 1995). Die Autoren führen an, dass in der Produktentwicklung ein gemeinsames und konstruktives Brainstorming zwischen Mitar-

beitern oder der informelle Austausch zwischen Branchenexperten und Produktentwicklern besonders nutzbringend für die Wissensgenerierung sein kann (Nonaka & Takeuchi, 1995).

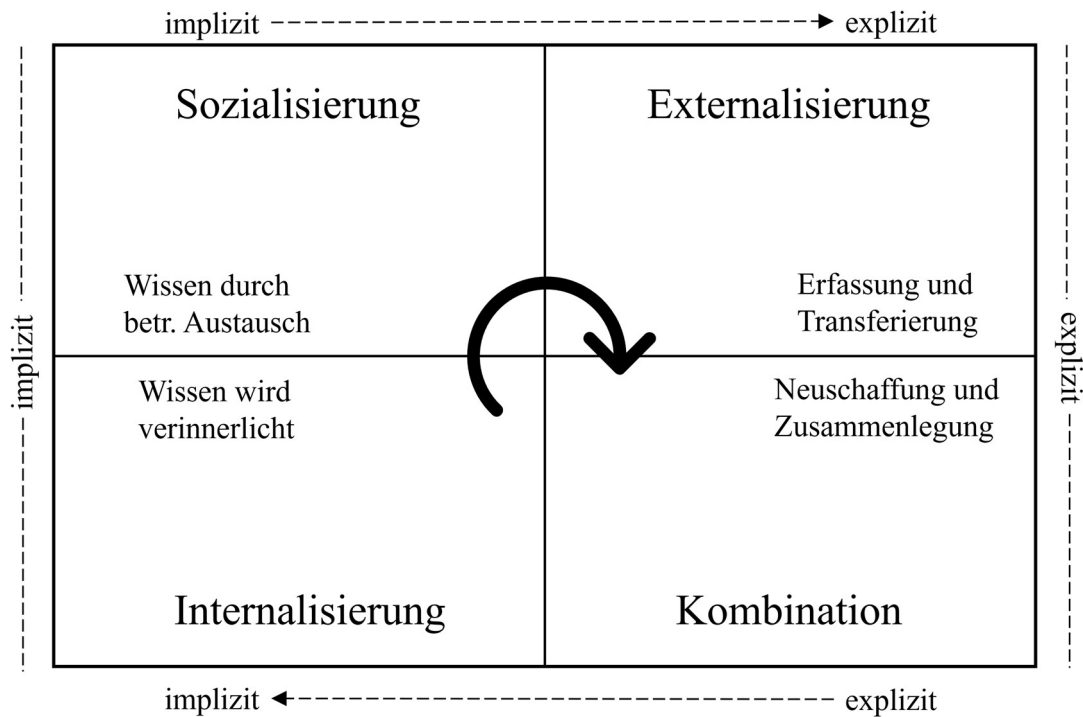


Abbildung 2-16: SECI-Modell nach (Nonaka & Takeuchi, 1995)

Die Transformation in Form der Externalisierung von implizitem zu explizitem Wissen ist ein essenzieller Prozess für die Wissensgenerierung. Implizites Wissen kann mithilfe von Metaphern, Analogien, Konzepten, Hypothesen oder Modellen explizit gemacht werden (Nonaka & Takeuchi, 1995). Diese Hilfsmittel erlauben es, Gegebenheiten zu umschreiben, die ein Individuum nicht direkt in Worte fassen kann. Ebenso ist es möglich, sich dem Unbekannten durch die Beschreibung von Bekanntem anzunähern und so die Lücke zwischen beidem zu schließen. Damit können aus Gedanken Konzepte entstehen, die zu expliziten Modellen weiterentwickelt werden (Nonaka & Takeuchi, 1995). Weitere Methoden, um Wissen explizit zu machen, sind Checklisten, Handbücher oder Prozessmodelle im Prozessmanagement (Pircher, 2014).

Kombination ist eine weitere Wissenstransformation. Hierbei wird verschiedenes existierendes explizites Wissen zu einer neuen Wissensbasis integriert. Aus verschiedenen Quellen wie Dokumenten, Datenbanken, Gesprächen oder anderen Medien wird Wissen zusammengefasst, sortiert, kombiniert und kategorisiert. Auf diese Weise entsteht neues explizites Wissen (Nonaka & Takeuchi, 1995).

Bei der Internalisierung wird explizites Wissen in die persönliche Wissensbasis des Individuums übernommen, wodurch implizites Wissen entsteht. Nonaka und Takeuchi beschreiben diesen Vorgang als vergleichbar mit dem bekannten „learning by doing“ (Nonaka & Takeuchi, 1995).

Die vorgestellten Transformationen werden im Modell kontinuierlich durchlaufen. Beginnend bei der Sozialisierung entsteht neues Wissen, das über die Externalisierung und Kombination transformiert wird, bis es in der Internalisierung seine Anwendung findet. Die organisationale Wissensgenerierung findet somit durch eine kontinuierliche und dynamische Interaktion zwischen implizitem und explizitem Wissen statt (Nonaka & Takeuchi, 1995). Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung und die Anreicherung der existierenden Wissensbasis durch neues Wissen entsteht ein immer größerer organisationaler Wissensschatz (Nonaka & Takeuchi, 1995). Gleichzeitig wird das Wissen von der individuellen Ebene über die Organisationsstufen hinweg verbreitet.

Nachfolgend wird das WM-Modell nach Probst et al. vorgestellt, in dem das Wissensmanagement im Unternehmen noch umfassender betrachtet wird als im SECI-Modell.

2.6.3.2 Wissensmanagement-Modell nach Probst et al.

Die Autoren Probst, Raub und Romhardt stellen einen „integrierten Bezugsrahmen des Wissensmanagements“ vor, der als Leitlinie für den umfassenden Umgang mit der Ressource Wissen dient (Probst, et al., 2010). Dieses Modell hat sich in der Praxis für die Gestaltung des Wissensmanagements bewährt (Lehner, 2023). Es besteht aus sechs Kernprozessen und insgesamt acht Bausteinen, die in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, weshalb eine isolierte Betrachtung eines einzelnen Prozesses nicht sinnvoll ist (Probst, et al., 2010). Das Modell eignet sich gut für den Neueinstieg in das Wissensmanagement, da mit einem beliebigen Baustein begonnen werden kann (Lehner, 2023). Nachfolgend werden die Bausteine des Modells vorgestellt, diese sind in Abbildung 2-17 visualisiert. Die Bausteine „Wissensziele“ und „Wissensbewertung“ bilden einen strategischen Rahmen, während die weiteren Bausteine auf operativer Ebene angesiedelt sind (Lehner, 2023).

Die „Wissensidentifikation“ umfasst Maßnahmen zur Untersuchung des Wissensumfeldes im Unternehmen. Hierbei erfolgt eine Analyse der intern und extern vorhandenen Daten, Informationen und Fähigkeiten. Durch die Transparenz über das vorhandene Wissen können falsche Entscheidungen und mehrfacher Aufwand minimiert werden (Probst, et al., 2010).

Der „Wissenserwerb“ umfasst die Akquise von externem Wissen, das außerhalb des Unternehmens verfügbar ist. Dieses Wissen kann bei Wettbewerbern, Lieferanten oder Kun-

den vorliegen und bietet großes Potenzial für das Unternehmen, das nicht ungenutzt bleiben sollte. Der Erwerb des Wissens kann durch die Einstellung von Experten oder den Einkauf von Beratern erfolgen (Probst, et al., 2010).

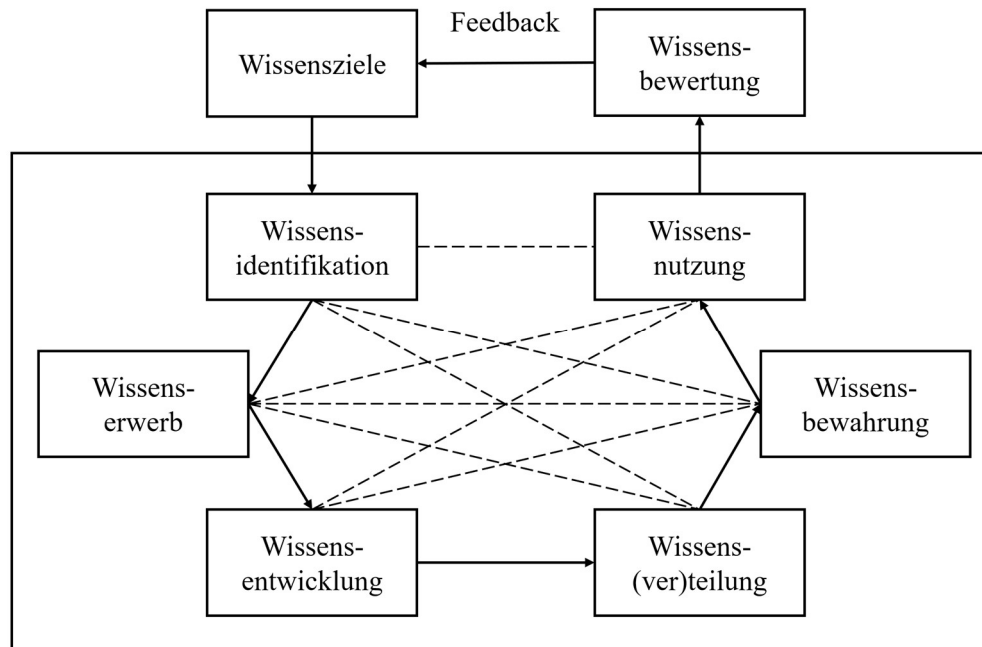


Abbildung 2-17: Wissensmanagement-Modell nach (Probst, et al., 2010)

Der Baustein „Wissensentwicklung“ bezieht sich auf die Generierung von neuem Wissen, das entweder im oder außerhalb des Unternehmens noch nicht existiert. Wissen kann in allen Bereichen des Unternehmens entstehen und ist nicht auf die F&E-Abteilung beschränkt. Die Wissensentwicklung umfasst kreative Tätigkeiten zur Generierung von neuem Wissen und Maßnahmen, um dieses Wissen explizit zu machen (Probst, et al., 2010). Entscheidend ist, dass die Wissensentwicklung nicht von den Wissenszielen des Unternehmens und den Bedürfnissen der Wissensnutzer entkoppelt wird, um Ineffizienzen zu vermeiden.

Die „Wissens(ver)teilung“ sorgt für die Weitergabe des vorhandenen Wissens innerhalb der Organisation. Es muss genau untersucht werden, welches Wissen an wen weitergegeben wird, um ein unnötiges Überangebot an Wissen zu vermeiden. Durch die Teilung des Wissens können die Leistungsfähigkeit der Organisationsabläufe und die Produktqualität erhöht werden (Probst, et al., 2010).

Die anschließende „Wissensnutzung“ kann als Ziel und Zweck des Wissensmanagements bezeichnet werden. Durch die Nutzung des vorhandenen und erworbenen Wissens kann der zuvor investierte Aufwand in Ertrag umgewandelt werden. Entscheidend ist, dass das Wissen für den Anwender in einer verwertbaren Form vorliegt, da sonst eine Barriere für

den Nutzer besteht und das Wissen möglicherweise nicht angewendet wird (Probst, et al., 2010).

Mit der „Wissensbewahrung“ wird das vorhandene Wissen für die zukünftige Nutzung dokumentiert. Hierzu gehören die Auswahl des bewahrungswürdigen Wissens, dessen dauerhafte Speicherung sowie die stetige Aktualisierung der vorhandenen Wissensbasis durch neues Wissen. Schlechte Datenqualität oder obsoletes Wissen erhöht die Gefahr falscher Entscheidungen (Lehner, 2023). Zusätzlich sinkt das Vertrauen der Nutzer in das Wissen und es droht eine „Todesspirale“, wodurch die organisationale Wissensbasis beschädigt wird (Probst, et al., 2010).

Auf einer übergeordneten Ebene ist die Definition der Wissensziele notwendig. Wissensziele steuern die Ausrichtung des Wissensmanagements und dienen als Leitlinie. Die Wissensziele können in strategische Ziele (z. B. Kernkompetenzen des Unternehmens) und operative Ziele, d. h. die konkrete Umsetzung des Wissensmanagements betreffend, untergliedert werden (Probst, et al., 2010).

Basierend auf den zuvor definierten Wissenszielen folgt eine Wissensbewertung. Mit der Bewertung des Wissens kann ein Abgleich zwischen den definierten Zielen und der tatsächlichen Umsetzung erfolgen und die Effizienz des eingesetzten Wissensmanagements untersucht werden (Probst, et al., 2010).

Die hier vorgestellten Bausteine werden im Wissensmanagementprozess zyklisch durchlaufen und erlauben es, das Wissensmanagement im Unternehmen kontinuierlich zu fördern und weiterzuentwickeln.

Neben den hier vorgestellten Modellen und Konzepten für das Wissensmanagement existieren in der Literatur zahlreiche weitere. North definiert das Wissensmarkt-Modell, in dem Wissen als Gut mit Angebot und Nachfrage betrachtet wird (North, et al., 2016). Das WM-Referenzmodell des Fraunhofer IPK definiert ein geschäftsprozessorientiertes Wissensmanagement, das sich an den wertschöpfenden Kernprozessen des Unternehmens orientiert (Kohl & Orth, 2011). Weitere Modelle sind das WM-Basismodell nach Pircher (Pircher, 2014) und das projektorientierte Modell nach Schindler (Schindler, 2002). Eine Übersicht weiterer Wissensmanagementkonzepte ist bei (Lehner, 2023) zu finden.

2.6.4 Informationstechnische Unterstützung für das Wissensmanagement

Für ein effizientes Wissensmanagement (WM) ist die Unterstützung durch Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) unerlässlich. Solche IT-Systeme fördern den Informations- und Wissensfluss zwischen den beteiligten Personen und ermöglichen sowohl eine synchrone als auch asynchrone Kommunikation zwischen Sender und Empfänger (Meier & Weller, 2010). Um den größtmöglichen Nutzen für die Anwender zu

gewährleisten, muss das WM-System nahtlos in die bestehende IT-Landschaft integriert werden. Zudem sollte es den Nutzern die jeweils passenden und kontextabhängigen Informationen zur Verfügung stellen (Probst, et al., 2010) (Kampffmeyer, 2006).

Innerhalb des Wissensmanagements existieren verschiedene Systemklassen, die unterschiedliche Bedürfnisse und Prozesse unterstützen. Eine Übersicht der gängigen Systeme findet sich bei (Eigner & Stelzer, 2001). Im Folgenden werden einige dieser Systeme detaillierter erläutert:

- *Dokumentenmanagement-Systeme (DMS)*: DMS-Systeme dienen der strukturierten Ablage von Dokumenten, die durch Metadaten ergänzt werden. Sie integrieren die Arbeitsergebnisse aus verschiedenen Prozessen und Bereichen und fassen diese in einer zentralen Datenbasis zusammen (Kampffmeyer, 2006). Dies unterstützt die Organisation und Verwaltung von Dokumenten und erleichtert den Zugriff auf relevante Informationen.
- *Produktdatenmanagement-Systeme (PDM)*: In der Produktentwicklung spielen PDM-Systeme eine zentrale Rolle. Sie verwalten nicht nur Daten und Metadaten, sondern auch zusätzliche Informationen zur Unterstützung der Produktentwicklung (Browning & Eppinger, 2005); (Eigner & Stelzer, 2001). Diese Systeme strukturieren die Daten projektbezogen und verdeutlichen die Abhängigkeiten zwischen Produkten, Komponenten und Teilen (Gausemeier & Feldmann, 2006). Eine Weiterentwicklung der PDM-Systeme sind Product-Lifecycle-Management-Systeme (PLM), die den gesamten Lebenszyklus eines Produkts abbilden und sowohl Produkt- als auch Prozessdaten verwalten (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Analytische Informationssysteme (AIS)*: Diese umfassen Bereiche wie Data Warehouse (DHW), On-Line Analytical Processing (OLAP) und Data Mining (Chaudhuri & Dayal, 1998). Ein Data Warehouse speichert geprüfte und konsistente Daten aus verschiedenen Quellen und stellt sie für analytische Auswertungen bereit (Farkisch, 2011). Sowohl historische als auch aktuelle Daten werden genutzt, um bisher unbekannte Zusammenhänge zu identifizieren – dieser Prozess wird als Knowledge Discovery bezeichnet (Chaudhuri & Dayal, 1998).
- *Ontologien und semantische Suchverfahren*: Zur Unterstützung von Information Retrieval (IR) und zur Suche nach ähnlichen Informationen kommen Ontologien zum Einsatz, die bei der Integration und Strukturierung von Wissen helfen (Staab, 2004). Semantische Suchverfahren, die Ontologien oder Plattformen wie Wikipedia (Buitelaar & Cimiano, 2008) verwenden, verbessern die Qualität der Suchergebnisse erheblich. Dies erleichtert die Integration und Aufbereitung existierender Wissensbestände durch Datenfusion (Beierle & Kern-Isberner, 2008).

Diese Systeme und Verfahren sind zentrale Bausteine für ein effizientes Wissensmanagement, da sie die Verwaltung großer Datenmengen ermöglichen und den Zugriff auf relevantes Wissen verbessern.

2.7 Change-Prozesse

Change-Prozesse sind ein unvermeidlicher Bestandteil der modernen Produktentwicklung, insbesondere bei komplexen und interdisziplinären Projekten. Änderungen können durch verschiedene Faktoren ausgelöst werden, wie neue Kundenanforderungen, technologische Innovationen oder Fehlerkorrekturen. Diese Änderungen müssen effektiv gemanagt werden, um sicherzustellen, dass das Produkt pünktlich, innerhalb des Budgets und mit der gewünschten Qualität fertiggestellt wird. Besonders in der agilen und virtuellen Produktentwicklung spielen Change-Prozesse eine entscheidende Rolle, da diese Ansätze Flexibilität und schnelle Reaktionsfähigkeit bei Änderungen erfordern.

2.7.1 Grundlagen des Change-Managements

Das Change-Management umfasst den strukturierten Umgang mit Änderungen, die in der Produktentwicklung auftreten. Es stellt sicher, dass jede Änderung sorgfältig analysiert, bewertet und in den bestehenden Entwicklungsprozess integriert wird, ohne die Gesamteffizienz zu gefährden (Kotter, 1996). In einer zunehmend digitalisierten und global vernetzten Welt wird Change-Management durch den Einsatz moderner Tools wie Product-Lifecycle-Management (PLM) und Collaboration-Plattformen unterstützt. Diese ermöglichen es, Änderungen in Echtzeit zu verfolgen und die Kommunikation zwischen Teams zu erleichtern.

Insbesondere in der agilen Produktentwicklung ist der Umgang mit Änderungen zentral, da agile Methoden wie Scrum oder Kanban darauf ausgelegt sind, flexibel auf neue Anforderungen und Herausforderungen zu reagieren. Hier werden Änderungen nicht als Störungen im Prozess betrachtet, sondern als integraler Bestandteil der kontinuierlichen Verbesserung. Sprints und Iterationen bieten regelmäßig Gelegenheiten, Änderungen aufzunehmen und zu bewerten, bevor sie implementiert werden (Schwaber & Sutherland, 2017).

2.7.2 Ursachen und Auslöser von Change-Prozessen

In der agilen und virtuellen Produktentwicklung gibt es spezifische Ursachen und Auslöser für Änderungen, die den Change-Management-Prozess beeinflussen:

- *Kundenfeedback und iterative Entwicklung:* In der agilen Produktentwicklung wird das Produkt häufig in kleinen, nutzbaren Inkrementen geliefert, die regelmäßig durch Feedbackschleifen optimiert werden. Kundenanforderungen können sich während der Entwicklung ändern, was flexible Anpassungen in der laufenden Entwicklung erforderlich macht (Schwaber & Sutherland, 2017).
- *Neue technologische Möglichkeiten:* Durch den Einsatz von virtuellen Produktentwicklungsmethoden können neue Technologien und Materialien frühzeitig getestet werden, was zu Änderungen im Design oder der Funktionalität führen kann. Die Möglichkeit, Produkte virtuell zu simulieren und zu testen, erlaubt es, Fehler oder Optimierungspotenziale frühzeitig zu erkennen und entsprechende Änderungen vorzunehmen (Ovtcharova, et al., 2015).
- *Integration von Software, Mechanik und Elektronik:* In der modernen Produktentwicklung, die zunehmend interdisziplinär ist, sind Change-Prozesse oft auf die komplexe Integration von Software, Mechanik und Elektronik zurückzuführen. Änderungen in einem dieser Bereiche können weitreichende Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben, was eine enge Zusammenarbeit und Koordination zwischen den verschiedenen Disziplinen erfordert (Eigner & Stelzer, 2009).

2.7.3 Change-Management im Kontext agiler und virtueller Produktentwicklung

Der Change-Management-Prozess in der agilen und virtuellen Produktentwicklung unterscheidet sich von traditionellen Ansätzen durch seine Flexibilität und kontinuierliche Iteration. Im agilen Kontext wird die Fähigkeit, auf Änderungen schnell zu reagieren, als eine der Schlüsselstärken betrachtet. Agile Methoden wie Scrum ermöglichen es Teams, innerhalb von kurzen Sprints regelmäßig Anpassungen vorzunehmen und Änderungen am Produkt zu validieren. Dadurch wird sichergestellt, dass jede Änderung direkt auf den Kundenwunsch oder die technologische Notwendigkeit abgestimmt ist (Schwaber & Sutherland, 2017).

Im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung wird der Change-Prozess stark durch den Einsatz von Simulationstools und digitalen Zwillingen unterstützt. Virtuelle Modelle erlauben es, Änderungen am Produktdesign in einer simulierten Umgebung zu testen und ihre Auswirkungen auf das Gesamtprodukt zu analysieren, bevor sie in die physische Produktion überführt werden. Diese digitale Validierung hilft, Risiken zu minimieren und Fehlentwicklungen frühzeitig zu identifizieren (Ovtcharova, et al., 2015).

Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von PLM-Systemen eine durchgängige Nachverfolgbarkeit aller Änderungen von der Anforderung bis zur Umsetzung. Änderungen werden in diesen Systemen dokumentiert und die Auswirkungen auf andere Produktbereiche wie

Kosten, Zeitplan oder Funktionalität transparent dargestellt (Eigner & Stelzer, 2009). Diese Transparenz ist insbesondere in agilen und virtuellen Entwicklungsprojekten essenziell, um sicherzustellen, dass alle Stakeholder jederzeit über den aktuellen Status informiert sind und entsprechend reagieren können.

2.7.4 Werkzeuge und Methoden zur Unterstützung des Change-Managements

Die effektive Verwaltung von Change-Prozessen erfordert den Einsatz geeigneter Werkzeuge und Methoden, um Änderungen effizient und systematisch zu steuern. Insbesondere in der agilen und virtuellen Produktentwicklung kommen folgende Tools zum Einsatz:

- *Agile Projektmanagement-Tools*: Tools wie Jira, Trello oder Microsoft Azure DevOps unterstützen die agile Produktentwicklung, indem sie Änderungen in Form von User-Stories oder Tasks abbilden und in den täglichen Arbeitsablauf integrieren. Sie bieten zudem Funktionen für die Nachverfolgung von Änderungen und die Verwaltung von Backlogs, um sicherzustellen, dass alle Anpassungen transparent und effizient implementiert werden (Schwaber & Sutherland, 2017).
- *Product-Lifecycle-Management(PLM)-Systeme*: PLM-Systeme bieten Funktionen zur Versionskontrolle und Change-Tracking über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg. Sie integrieren Informationen aus verschiedenen Disziplinen und ermöglichen es, Änderungen umfassend zu dokumentieren und deren Auswirkungen auf das Gesamtprodukt zu bewerten. Dies ist besonders bedeutsam in der virtuellen Produktentwicklung, wo mehrere Iterationen von digitalen Modellen durchgeführt werden, bevor eine physische Produktion erfolgt (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Virtuelle Prototypen und Simulationen*: In der virtuellen Produktentwicklung werden digitale Zwillinge und Simulationsmodelle verwendet, um Änderungen am Produkt in einer virtuellen Umgebung zu testen. Diese Modelle ermöglichen es, die Auswirkungen von Änderungen auf die Produktperformance in Echtzeit zu analysieren und so fundierte Entscheidungen über die Implementierung von Änderungen zu treffen (Ovtcharova, et al., 2015).

2.7.5 Herausforderungen und Lösungen im Change-Management

Trotz der Vorteile agiler und virtueller Methoden gibt es Herausforderungen im Change-Management, insbesondere in Bezug auf die Koordination zwischen verschiedenen Disziplinen. Eine Änderung im Bereich der Software kann beispielsweise erhebliche Aus-

wirkungen auf die Mechanik oder Elektronik eines Produkts haben. Diese Abhängigkeiten müssen sorgfältig gemanagt werden, um sicherzustellen, dass Änderungen reibungslos und ohne negative Auswirkungen auf das Gesamtsystem implementiert werden (Moehrle & Isenmann, 2005).

Eine Lösung besteht darin, eine enge Integration von PLM-Systemen und agilen Projektmanagement-Tools sicherzustellen, um Änderungen effektiv nachzuverfolgen und sicherzustellen, dass alle Stakeholder auf dem aktuellen Stand sind. Darüber hinaus hilft die Verwendung von virtuellen Modellen, um Änderungen vor der physischen Implementierung zu validieren, die Risiken zu minimieren und sicherzustellen, dass alle Aspekte des Produkts harmonisiert bleiben (Eigner, et al., 2014).

Das Change-Management ist ein zentraler Bestandteil der modernen Produktentwicklung und wird durch den Einsatz agiler und virtueller Methoden erheblich erleichtert. In der agilen Produktentwicklung wird der Umgang mit Änderungen als kontinuierlicher Prozess betrachtet, der auf Flexibilität und Anpassungsfähigkeit beruht. Die virtuelle Produktentwicklung bietet durch die Nutzung digitaler Zwillinge und Simulationsmodelle die Möglichkeit, Änderungen frühzeitig zu testen und zu validieren, bevor sie in die physische Produktion übergehen. Durch den Einsatz von modernen Werkzeugen wie PLM-Systemen und agilen Projektmanagement-Tools können Änderungen effizient dokumentiert, nachverfolgt und implementiert werden, was zu einer erhöhten Produktqualität und einer verkürzten Entwicklungszeit führt.

2.8 Intelligente Systeme und ihre Integration in den Produktentwicklungsprozess

Die Integration intelligenter Systeme in den Produktentwicklungsprozess hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI), Maschinelles Lernen (ML) und Big-Data-Analysen eröffnen neue Möglichkeiten zur Automatisierung, Optimierung und Innovation. Diese Technologien unterstützen den Prozess nicht nur in technischer Hinsicht, sondern helfen auch, die Entscheidungsfindung zu verbessern und Produktzyklen effizienter zu gestalten. Insbesondere im Kontext komplexer, interdisziplinärer Projekte, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, spielen intelligente Systeme eine immer größere Rolle.

2.8.1 Definition und Arten intelligenter Systeme

Intelligente Systeme sind computergestützte Systeme, die in der Lage sind, Daten autonom zu analysieren, daraus zu lernen und Entscheidungen zu treffen. Diese Systeme nutzen Algorithmen der Künstlichen Intelligenz, um aus großen Datenmengen Erkenntnisse

zu gewinnen, optimierte Lösungen zu generieren und Arbeitsabläufe zu automatisieren. Typische Einsatzfelder in der Produktentwicklung sind u. a.:

- *Maschinelles Lernen (ML)*: Dieses Teilgebiet der KI entwickelt Algorithmen, die auf Basis von Daten Muster erkennen und Vorhersagen treffen können (Bishop, 2006).
- *Generatives Design*: KI-basierte Systeme können automatisch alternative Designs erstellen, die auf bestimmten Anforderungen basieren, und so die Designphase erheblich beschleunigen (Gero & Kannengiesser, 2004); (Chakrabarti, et al., 2020).
- *Predictive Analytics*: Durch die Analyse historischer Daten können Vorhersagen über zukünftige Produkthanforderungen oder potenzielle Risiken getroffen werden (Plathottam, et al., 2023).
- *Computer Vision*: KI-Systeme können visuelle Daten verarbeiten, um beispielsweise in der Qualitätssicherung Fehler oder Abweichungen in Produktionsprozessen zu erkennen (Russell & Norvig, 2016).

Künstliche Intelligenz und verwandte Technologien bieten somit große Potenziale, die Produktentwicklung schneller, präziser und effizienter zu gestalten. Sie sind in der Lage, große Datenmengen zu verarbeiten und dabei Designalternativen, Simulationen und Optimierungen autonom vorzunehmen, ohne dass sie für jede Aufgabe manuell programmiert werden müssen (Goodfellow, et al., 2016).

2.8.2 Rolle intelligenter Systeme in der Produktentwicklung

In der modernen Produktentwicklung spielen intelligente Systeme eine entscheidende Rolle. Sie kommen in nahezu jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses zum Einsatz, von der Ideenfindung bis hin zur Fertigung und Wartung:

- *Ideenfindung und Konzeption*: In den frühen Phasen der Produktentwicklung können KI-gestützte Tools eingesetzt werden, um Marktdaten, Kundenfeedback und technologische Trends zu analysieren. Dies unterstützt die generative Phase der Produktentwicklung, in der erste Ideen und Konzepte entstehen. Maschinelles Lernen kann hier helfen, innovative Ansätze zu entdecken, die auf historischen Daten oder Marktanalysen basieren (Thrun, et al., 2005).
- *Designoptimierung*: Mithilfe intelligenter Systeme lässt sich der Designprozess beschleunigen und optimieren. Generatives Design nutzt KI, um automatisch eine

Vielzahl von Designalternativen zu generieren, die spezifische Anforderungen erfüllen. Diese Designs können dann mit minimalem menschlichem Eingriff bewertet und weiterentwickelt werden (Gero & Kannengiesser, 2004).

- *Simulation und Validierung*: KI-gestützte Simulationsmodelle ermöglichen es, Designvarianten in virtuellen Umgebungen zu testen. Durch maschinelles Lernen können intelligente Systeme automatisch Parameter für Simulationen anpassen und optimieren, was den Validierungsprozess erheblich beschleunigt (Ovtcharova, et al., 2015).
- *Fertigung und Produktion*: Intelligente Systeme sind auch in der Fertigung von großer Bedeutung. Predictive Maintenance beispielsweise nutzt ML-Algorithmen, um den Zustand von Maschinen vorherzusagen und Ausfälle zu vermeiden. Dies führt zu einer höheren Produktionsstabilität und reduziert Ausfallzeiten (Plathottam, et al., 2023).
- *Wartung und Betrieb*: Intelligente Systeme sind auch nach der Markteinführung eines Produkts nützlich. Sie können Wartungsintervalle optimieren, durch vorausschauende Analysen Fehler erkennen und dadurch die Lebensdauer des Produkts verlängern (Russell & Norvig, 2016).

2.8.3 KI-gestützte Entscheidungsfindung und Optimierung

Ein wesentlicher Vorteil intelligenter Systeme ist ihre Fähigkeit, große Datenmengen zu analysieren und fundierte Entscheidungen in Echtzeit zu treffen. Dies führt zu einer verbesserten Effizienz und Flexibilität in der Produktentwicklung. Mithilfe von datengetriebenen Modellen können KI-Systeme Optimierungen vorschlagen, die auf statistischen Analysen basieren, was insbesondere in komplexen Entwicklungsprojekten von großem Vorteil ist (Goodfellow, et al., 2016).

Beispiele für KI-gestützte Entscheidungsfindung sind:

- *Automatisierte Designanpassungen*: Systeme wie Generatives Design können mehrere Designoptionen gleichzeitig evaluieren und die optimale Lösung vorschlagen, was die Entwicklungszeit erheblich verkürzt.
- *Risikobewertungen*: Durch Predictive Analytics lassen sich Risiken frühzeitig identifizieren, sodass Maßnahmen zur Risikominimierung ergriffen werden können, bevor es zu größeren Problemen kommt (Plathottam, et al., 2023).

- *Markt- und Bedarfsprognosen:* KI-Systeme analysieren Markttrends und Kundenverhalten, um Produkthanforderungen vorherzusagen und die Produktentwicklung entsprechend anzupassen (Thrun, et al., 2005).

Diese Art der datengestützten Entscheidungsfindung ist besonders nützlich, wenn es darum geht, auf sich ändernde Marktanforderungen schnell zu reagieren oder innovative Produktideen zu entwickeln.

2.8.4 Integration intelligenter Systeme in den virtuellen Produktentwicklungsprozess

Die virtuelle Produktentwicklung bietet eine ideale Plattform, um intelligente Systeme effektiv zu integrieren. Insbesondere das Virtual-Engineering-Modell von Prof. Ovtcharova vom Karlsruher Institut für Technologie zeigt Potenzial, wie virtuelle Prototypen und Simulationen durch KI-Algorithmen optimiert und automatisiert werden könnten. Digitale Zwillinge – virtuelle Abbilder physischer Produkte – können durch intelligente Systeme in Echtzeit überwacht und angepasst werden, was zu einer erheblichen Verkürzung der Entwicklungszeiten führt (Ovtcharova, et al., 2015).

Die Integration von KI in die virtuelle Produktentwicklung ermöglicht es, verschiedene Szenarien und Simulationen gleichzeitig zu testen und die Ergebnisse sofort zu bewerten. Dies führt zu einer höheren Flexibilität und einer verbesserten Qualität der entwickelten Produkte, da potenzielle Fehler oder Schwachstellen frühzeitig identifiziert und behoben werden können (Gero & Kannengiesser, 2004).

Darüber hinaus fördert die KI-gestützte virtuelle Produktentwicklung die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Da moderne Produkte oft eine Kombination aus Mechanik, Elektronik und Software sind, hilft die Datenintegration durch intelligente Systeme, die verschiedenen Disziplinen besser zu koordinieren. Dadurch wird der gesamte Entwicklungsprozess beschleunigt und effizienter gestaltet (Eigner & Stelzer, 2009). Obwohl intelligente Systeme erhebliche Vorteile bieten, gibt es auch Herausforderungen, die bei ihrer Integration in den Produktentwicklungsprozess zu beachten sind:

- *Datenqualität und Datenverfügbarkeit:* KI-Systeme sind stark auf hochwertige Daten angewiesen. Mangelhafte oder unvollständige Daten können zu falschen Vorhersagen und damit zu suboptimalen Entscheidungen führen (Russell & Norvig, 2016). Unternehmen müssen sicherstellen, dass sie über ausreichende Datenkapazitäten und eine solide Dateninfrastruktur verfügen.

- *Akzeptanz und Schulung*: Die Implementierung intelligenter Systeme erfordert oft eine Umstellung der Arbeitsweise sowie eine umfangreiche Schulung der Mitarbeiter. Widerstände gegen neue Technologien können den Implementierungsprozess verzögern oder behindern (Plathottam, et al., 2023).
- *Ethik und Datenschutz*: Der Einsatz von KI bringt auch Fragen der Datensicherheit und des Datenschutzes mit sich, insbesondere wenn es um die Verarbeitung großer Mengen sensibler Daten geht. Unternehmen müssen sicherstellen, dass sie alle relevanten Datenschutzrichtlinien einhalten und ethische Bedenken berücksichtigen (Goodfellow, et al., 2016).

Die Integration intelligenter Systeme in den Produktentwicklungsprozess stellt einen signifikanten Fortschritt dar, indem sie Effizienz, Flexibilität und Innovation steigert. KI-gestützte Tools ermöglichen es, Designprozesse zu automatisieren, Simulationen zu optimieren und fundierte Entscheidungen auf Basis umfangreicher Daten zu treffen. Insbesondere in der virtuellen Produktentwicklung bieten intelligente Systeme erhebliche Vorteile, indem sie die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen fördern und den gesamten Prozess beschleunigen. Trotz der bestehenden Herausforderungen bieten intelligente Systeme einen klaren Mehrwert für die Produktentwicklung, der Unternehmen hilft, schneller und effizienter auf die Anforderungen des Marktes zu reagieren.

3 Handlungsbedarf und abgeleitete Anforderungen

In den nachfolgenden Kapiteln wird ein Ansatz zur Integration eines modellbasierten hybriden Vorgehensmodells im Kontext der virtuellen Produktentwicklung unter Adaption agiler Prozessmodelle in den Produktentwicklungsprozess (PEP) erarbeitet. Hierfür müssen zunächst der Handlungsbedarf sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen definiert werden. Diese Anforderungen sollen anschließend als Grundlage für die Umsetzung und Implementierung in die weiteren Phasen dieser Arbeit dienen. Um zu verdeutlichen, welche Ziele durch einen agilen PEP erreicht werden sollen, ist es notwendig, diese Ziele klar zu formulieren. Ein zentrales Ziel ist die Verkürzung der Time-to-Market, um die Wettbewerbsfähigkeit in einem sich schnell wandelnden Marktumfeld zu sichern. Dabei ist es von großer Bedeutung, dass die Produkte bei der Markteinführung aktuell und auf dem neuesten technologischen Stand sind, insbesondere in Bezug auf die nicht-physischen Komponenten wie Software und digitale Dienste. Letztere sollten nicht der Vorgängergeneration angehören, sondern das Produkt optimal ergänzen.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss der PEP so gestaltet sein, dass er flexibel genug ist, um kurzfristige Änderungen effizient zu integrieren. Dies erfordert eine Agilität in den Entwicklungsprozessen, die es Teams ermöglicht, schnell auf neue Anforderungen zu reagieren und Anpassungen vorzunehmen. Darüber hinaus muss die Koordination interdisziplinärer Teams vereinfacht werden, da moderne Produktentwicklungsprojekte oft eine Vielzahl von Disziplinen umfassen – von Maschinenbau über Elektrotechnik bis hin zu Softwareentwicklung. Auch die Zusammenarbeit mit Partnern aus dem Wertschöpfungsnetzwerk muss effizient gestaltet sein, um die Entwicklung nahtlos zu koordinieren und Synergieeffekte zu nutzen.

Trotz des Einsatzes neuer Methoden und Technologien darf jedoch die Qualität und Prozesssicherheit nicht beeinträchtigt werden. Vielmehr sollten diese mindestens auf dem bisherigen Niveau bleiben, wenn nicht sogar verbessert werden, um langfristig konkurrenzfähig zu sein.

3.1 Handlungsbedarf aufgrund steigender Komplexität in der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung wird zunehmend komplexer, da die Anforderungen an moderne Produkte sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht steigen. Produkte

müssen in kürzeren Entwicklungszeiten auf den Markt gebracht werden, dabei jedoch technisch ausgereift, nachhaltig und innovativ sein (Eigner, et al., 2014). Diese zunehmende Komplexität ergibt sich aus verschiedenen Faktoren:

- *Technologische Integration:* Produkte sind heute interdisziplinär aufgebaut und erfordern die Zusammenarbeit von Fachbereichen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung. Die Integration dieser verschiedenen Disziplinen ist eine Herausforderung, da jede Disziplin eigene Werkzeuge und Prozesse nutzt, die miteinander abgestimmt werden müssen (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Anforderungen an Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit:* In den letzten Jahren ist der Druck auf Unternehmen gestiegen, nachhaltige und umweltfreundliche Produkte zu entwickeln. Dies betrifft sowohl die verwendeten Materialien als auch die Produktionsprozesse. Die Entwicklung solcher Produkte erfordert neue Ansätze und Technologien, die traditionelle Methoden infrage stellen (Moehrle & Isenmann, 2005).
- *Individuelle Kundenanforderungen:* Kunden verlangen immer häufiger personalisierte Produkte, die auf ihre individuellen Bedürfnisse zugeschnitten sind. Dies führt zu einer erhöhten Komplexität in der Produktion und zu einer größeren Varianz in den Produktentwicklungsprozessen, da der flexible Einsatz von Produktionstechnologien wie z. B. Additive Manufacturing erforderlich ist (Eigner, et al., 2014).

3.2 Abgeleitete Anforderungen an den Produktentwicklungsprozess

Auf Basis des identifizierten Handlungsbedarfs lassen sich spezifische Anforderungen an zukünftige Produktentwicklungsprozesse ableiten. Diese Anforderungen müssen sicherstellen, dass die beschriebenen Herausforderungen adressiert und die Prozesse an die neuen Gegebenheiten angepasst werden:

- *Interdisziplinäre Zusammenarbeit:* Eine der wesentlichen Anforderungen ist die Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit. Es muss eine integrierte Plattform geschaffen werden, auf der verschiedene Disziplinen effizient zusammenarbeiten können. Dies erfordert sowohl organisatorische als auch technologische Lösungen, die den Informationsfluss und die Datenintegration zwischen verschiedenen Bereichen unterstützen (Eigner & Stelzer, 2009). Product-Lifecycle-Management (PLM)-Systeme bieten hierbei eine zentrale Grundlage für die Kollaboration.

- *Nutzung intelligenter Systeme:* Um die steigende Komplexität in der Produktentwicklung zu bewältigen, ist der Einsatz intelligenter Systeme unerlässlich. Künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen und generative Designansätze sollten fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses werden, um Prozesse zu automatisieren, Designalternativen zu generieren und Entscheidungshilfen zu bieten (Goodfellow, et al., 2016). Insbesondere die Optimierung der Designprozesse durch KI ermöglicht es, Produkte schneller und effizienter zu entwickeln.
- *Datenbasierte Entscheidungsfindung:* Die Fähigkeit, datengetriebene Entscheidungen zu treffen, ist eine wesentliche Anforderung an den modernen Produktentwicklungsprozess. Daten aus verschiedenen Quellen müssen integriert und in Echtzeit ausgewertet werden, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. Dies betrifft nicht nur die Entwicklungsphase, sondern auch die gesamte Wertschöpfungskette von der Konzeption bis zur Produktion (Bishop, 2006).
- *Flexibilität und Anpassungsfähigkeit:* Moderne Produktentwicklungsprozesse müssen flexibel und anpassungsfähig sein, um auf sich ändernde Marktanforderungen reagieren zu können. Hierbei spielt die Nutzung agiler Methoden eine zentrale Rolle, da sie iterative Entwicklungsprozesse fördern und eine schnelle Reaktion auf Änderungen ermöglichen (Schwaber & Sutherland, 2017). Agile Vorgehensmodelle wie Scrum und Kanban sollten in der Produktentwicklung integriert werden, um die Zusammenarbeit und Flexibilität zu verbessern.
- *Nachhaltigkeit und Effizienz:* Nachhaltigkeit muss als zentraler Bestandteil in den Produktentwicklungsprozess integriert werden. Dies erfordert die Entwicklung von Produkten, die ressourceneffizient und umweltfreundlich sind. Die Optimierung der Materialauswahl, Energieeffizienz und Wiederverwertbarkeit der Produkte wird immer bedeutsamer, um den Anforderungen des Marktes und der Gesetzgebung gerecht zu werden (Moehrle & Isenmann, 2005).

3.3 Anforderungen an intelligente Systeme in der Produktentwicklung

Die Rolle von intelligenten Systemen wird immer zentraler, wenn es darum geht, die Komplexität und die hohen Anforderungen der Produktentwicklung zu bewältigen. Intelligente Systeme können verschiedene Aufgaben in der Produktentwicklung übernehmen, von der automatisierten Optimierung von Designs bis hin zur Vorhersage von Marktanforderungen. Folgende Anforderungen lassen sich dabei identifizieren:

- *Automatisierung und Optimierung*: Intelligente Systeme müssen in der Lage sein, wiederholbare und komplexe Aufgaben in der Produktentwicklung zu automatisieren. Dies betrifft vor allem den Bereich der Simulation und Validierung, wo intelligente Systeme in der Lage sind, Designalternativen zu berechnen und zu bewerten (Schuck, et al., 2015). Durch die Automatisierung solcher Aufgaben können Entwicklungszyklen verkürzt und Kosten reduziert werden.
- *Integration in virtuelle Umgebungen*: Intelligente Systeme sollten nahtlos in virtuelle Produktentwicklungsumgebungen integriert werden. Der Einsatz von digitalen Zwillingen ermöglicht es, reale physische Produkte in virtuellen Umgebungen zu simulieren und zu testen. Diese Systeme müssen flexibel und skalierbar sein, um verschiedene Produktvarianten parallel zu entwickeln und zu validieren (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Lernfähigkeit und Anpassungsfähigkeit*: Um auf sich ändernde Anforderungen und Rahmenbedingungen reagieren zu können, müssen intelligente Systeme in der Lage sein, aus ihren Fehlern zu lernen und sich kontinuierlich zu verbessern. Maschinelles Lernen ist hier ein zentrales Werkzeug, das es ermöglicht, Systeme an neue Anforderungen anzupassen und bessere Vorhersagen über Designanforderungen und Marktbedingungen zu treffen (Goodfellow, et al., 2016).

3.4 Herausforderungen bei der Implementierung und Nutzung intelligenter Systeme

Trotz der klaren Vorteile intelligenter Systeme und ihrer Bedeutung für die Produktentwicklung gibt es Herausforderungen, die bei der Implementierung zu berücksichtigen sind:

- *Datenintegration und -qualität*: Eine der größten Herausforderungen bei der Implementierung intelligenter Systeme ist die Sicherstellung einer ausreichenden Datenqualität. Intelligente Systeme sind stark auf Daten angewiesen, um Vorhersagen zu treffen und Entscheidungen zu optimieren. Es müssen umfassende Datenintegrationsstrategien entwickelt werden, um sicherzustellen, dass Daten aus verschiedenen Quellen konsistent und vollständig sind (Russell & Norvig, 2016).
- *Technologische Infrastruktur*: Die Implementierung intelligenter Systeme erfordert eine robuste technologische Infrastruktur. Dies umfasst leistungsfähige Serverkapazitäten, Cloud-Lösungen und Datenbanken, die in der Lage sind, große Mengen an Daten in Echtzeit zu verarbeiten und zu analysieren. Unternehmen müssen in ihre IT-Infrastruktur investieren, um die Integration von intelligenten Systemen zu ermöglichen (Bishop, 2006).

- *Schulung und Akzeptanz der Mitarbeiter:* Die Einführung intelligenter Systeme erfordert eine Umstellung der Arbeitsprozesse und eine Neuschulung der Mitarbeiter. Unternehmen müssen sicherstellen, dass ihre Beschäftigten die notwendigen Fähigkeiten erwerben, um mit den neuen Technologien zu arbeiten. Gleichzeitig ist es erforderlich, die Akzeptanz dieser Systeme zu fördern, um Widerstände zu überwinden (Plathottam, et al., 2023).

3.5 Implementierung und Praxisanwendungen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Handlungsfelder und Anforderungen bieten eine Grundlage für die nachfolgenden Kapitel, in denen die Implementierung eines neuen Ansatzes in der virtuellen Produktentwicklung im Fokus steht. In Kapitel 5 werden die konkrete Implementierung der zuvor formulierten Anforderungen sowie Praxisanwendungen vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgen in Kapitel 6 eine Evaluierung und Validierung der implementierten Systeme, um deren Effektivität und Effizienz in realen Anwendungsfällen zu untersuchen.

Die in diesem Kapitel formulierten Anforderungen bieten einen Vorgehensplan für Unternehmen, um den wachsenden Herausforderungen in der Produktentwicklung zu begegnen und gleichzeitig ihre Wettbewerbsfähigkeit durch den Einsatz neuer Technologien zu stärken.

4 Konzeptionelle und methodische Vorgehensweise

Im wissenschaftlichen Diskurs sind die Begriffe Methoden, Methodik und Methodologie zentral, jedoch werden sie oft unterschiedlich verwendet. Für eine präzise Darstellung des Forschungsprozesses in dieser Arbeit ist es entscheidend, diese Begriffe klar abzugrenzen.

Methoden bezeichnen die spezifischen, systematischen Verfahren und Werkzeuge, die zur Erreichung eines bestimmten Ziels in der Forschung oder Entwicklung eingesetzt werden. Sie sind praxisorientierte Ansätze, die in dieser Arbeit zur Datenanalyse, Modellierung und Simulation genutzt werden, um den Produktentwicklungsprozess zu optimieren. Beispiele für Methoden in diesem Kontext sind u. a. die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Simulation mechanischer Belastungen oder die agilen Vorgehensmodelle wie Scrum und Kanban, die für flexible Entwicklungsprozesse genutzt werden (Alisch, et al., 2013).

Die Methodik beschreibt die praktische Anwendung und Auswahl der Methoden in einem strukturierten Prozess. Sie umfasst die Gesamtheit der eingesetzten Werkzeuge und Ansätze sowie deren gezielte Anwendung, um bestimmte Ziele zu erreichen. In der vorliegenden Arbeit stellt die Methodik die Vorgehensweise dar, wie die beschriebenen Methoden – wie z. B. Computer-Aided Design (CAD) oder virtuelle Produktentwicklung – eingesetzt werden, um den Produktentwicklungsprozess zu unterstützen und zu optimieren (Kornmeier, 2012). Die Methodik spiegelt somit die konkrete Umsetzung der theoretischen Ansätze wider.

Die Methodologie hingegen ist die wissenschaftstheoretische Grundlage, die die Auswahl und Anwendung von Methoden begründet. Hier steht die Frage im Fokus, warum bestimmte Methoden verwendet werden und welche Prinzipien hinter deren Einsatz stehen. In dieser Arbeit wird die Methodologie dazu genutzt, zu erklären, warum agile Methoden und digitale Technologien wie virtuelle Prototypen und Simulationen für die Anforderungen der modernen Produktentwicklung besonders geeignet sind. Sie liefert die theoretische Begründung für die Wahl der Methoden und stellt diese in den wissenschaftlichen Kontext (Bortz & Döring, 2006).

Zusammenfassend beschreiben die Methoden die spezifischen Werkzeuge und Verfahren, die in der Arbeit verwendet werden, um die Entwicklungsziele zu erreichen. Die Methodik bezieht sich auf die praktische Anwendung dieser Methoden im Forschungs- und

Entwicklungsprozess, während die Methodologie die wissenschaftliche Begründung für deren Einsatz liefert. Diese Abgrenzung ist notwendig, um die Herangehensweise in dieser Arbeit klar und nachvollziehbar darzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter einer Methode ein allgemeingültiges und planmäßiges Vorgehen verstanden (vgl. (Bell, 2009), (Bortz & Döring, 2006)). Sie grenzt sich somit vom Begriff der Methodik ab, unter dem ein System von Modellen, Methoden sowie Hilfsmitteln verstanden wird (vgl. (Ehrlenspiel, 2009)).

4.1 Agile Produktentwicklung für physische Produkte

Da sich Softwareprodukte und physische Produkte in der Entwicklung stark unterscheiden, liegt die Vermutung nahe, dass agile Methoden nicht ohne Anpassungen in der güterproduzierenden Industrie einsetzbar sind (vgl. (Cooper, 1990); (Royce, 1970)). Anhand von Tabelle 4-1 sind bereits Unterschiede zu erkennen. Auf dieser Basis werden nachfolgend Anpassungsbedarfe identifiziert:

- *Kundenanforderungen*: Eine Beschreibung der Anforderungen an ein Produkt aus Kundensicht ist bei einem physischen Gut nicht für jede Komponente möglich, da nicht alle Teilsysteme dem Kunden bewusst sind und für direkten Nutzen sorgen (Schwaber & Sutherland, 2017). Bei einem Kaffeevollautomaten beispielsweise fällt es schwer, die Elektronikkomponente als User-Story zu beschreiben. Eine Entwicklung, die ganzheitlich über User-Stories gesteuert wird, ist im physischen Bereich deshalb nicht umsetzbar (vgl. (Beck, 2004)).
- *Qualitätskontrolle und Testen*: Agile Methoden bauen auf kontinuierlichem Kundenfeedback auf, sodass nach kleineren Testphasen Anpassungen und Umpriorisierungen vorgenommen werden können (vgl. (Schwaber & Sutherland, 2017)). Bei einem physischen Produkt sind Testläufe jedoch erst viel später möglich, da es keine Beta-Version gibt, die an den Kunden geschickt werden kann. Bei der Herausgabe von Prototypen können Sicherheitsbedenken eine Rolle spielen, da mechanische oder elektrische Geräte vor der Aushändigung an Laien auf Sicherheit und Funktionsweise überprüft werden müssen (Beck, 2001). Dies würde Kosten, Nutzen und Zeit für einen Prototypen oder eine Testversion übersteigen (vgl. Cooper, 2008).
- *Dokumentation*: Innerhalb agiler Entwicklungsteams erfolgt die Dokumentation häufig über sogenannte Backlogs oder mithilfe von Visualisierungen wie Klebezetteln auf Tafeln, die den aktuellen Stand darstellen und als Treffpunkt für tägliche Team-Meetings dienen (vgl. (Schwaber & Sutherland, 2017)). Diese Form

der Dokumentation bietet Transparenz innerhalb des Teams, lässt sich jedoch schwer in offizielle Statusberichte für das Top-Management oder externe Stakeholder überführen (Cohn, 2010). Für physische Güter, die zahlreichen regulatorischen Anforderungen unterliegen, sind jedoch umfangreichere Dokumentationsstandards erforderlich (vgl. (Royce, 1970)).

- *Hoher Spezialisierungsgrad:* Einige Disziplinen erfordern so weitreichendes Fachwissen, dass sich die Experten deutlich voneinander unterscheiden. Bei besonders komplexen Produkten müssen viele Experten oft nur für kurze Zeiträume mitarbeiten, was eine komplexe Ressourcenplanung erfordert (vgl. (Kruchten, 2004)). Agile Methoden sehen eine solche ausgeprägte Form der Ressourcenplanung in der Regel nicht vor (vgl. (Beck, 2001)).
- *Anzahl der Fachdisziplinen:* Bei der Entwicklung eines komplexen Produkts wie einer Druckmaschine sind viele unterschiedliche Fachdisziplinen involviert. Diese müssen ihre Arbeitsschritte genauer abstimmen, als es in regelmäßigen Teamtreffen sinnvoll wäre (vgl. (Schwaber & Sutherland, 2017)). Bei Scrum beispielsweise müssten sich die Mitarbeiter jeden Morgen zu Sprint-Meetings treffen und sich anschließend nochmals in ihren Fachdisziplinen absprechen, was die verfügbare Zeit für tatsächliche Wertschöpfung erheblich reduziert (vgl. (Poppendieck & Poppendieck, 2003)).

	klassisch	agil
Teamgröße	beliebig	bis ca. 10 Personen
Umfang des Produkts	viele Wertschöpfungsschritte	überschaubare Anzahl an Wertschöpfungsschritten
Komplexität des Produkts	mittel bis niedrig	komplex
räumliche Trennung der Projektmitarbeiter	hoch	niedrig
Stakeholdereinfluss	mittel bis gering	hoch
Anforderungskonstanz	hoch	niedrig
geforderte Kundenspezifität	Kundenfeedback kann nur bis zu einem gewissen Grad in das Produkt einfließen	spezifische Produktentwicklung möglich

Tabelle 4-1: Auswahlkriterien für die Projektsteuerung

Die aufgezeigten Unterschiede verdeutlichen, dass eine bloße Übernahme agiler Methoden nicht ausreichend ist. Es bedarf eines Ansatzes, der die Vorteile agiler Entwicklungsmethoden mit der Sicherheit und Kontrollierbarkeit traditioneller Ansätze vereint. Dafür existieren unterschiedliche Herangehensweisen. Abhängig von der Unternehmensgröße und der Komplexität des Projekts muss ein angepasstes Vorgehen gewählt werden. Ein

möglicher erster Schritt in Richtung Agilität ist die Erweiterung und Anpassung des klassischen Produktentstehungsprozesses (PEP) durch agile Methoden. Diese Herangehensweise wird in Kapitel 5 näher betrachtet, wo ein erweitertes Vorgehensmodell entwickelt wird.

4.2 Modellbasiertes Vorgehen

Das modellbasierte Vorgehen in der virtuellen Produktentwicklung hat sich als zentraler Bestandteil moderner Produktentwicklungsprozesse etabliert. Es zielt darauf ab, digitale Modelle zu nutzen, um die Produktentwicklung effizienter, flexibler und transparenter zu gestalten. Diese Modelle ermöglichen eine konsistente und verlässliche Grundlage für die Entwicklung, Validierung und Optimierung von Produkten in virtuellen Umgebungen. Im Kontext dieser Arbeit wird das modellbasierte Vorgehen als integraler Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung betrachtet, um die Entwicklung komplexer Produkte über den gesamten Produktlebenszyklus zu unterstützen.

4.2.1 Grundprinzipien des modellbasierten Vorgehens

Das modellbasierte Vorgehen basiert auf der Nutzung von digitalen Modellen als zentrale Informationsquelle während des gesamten Produktentwicklungsprozesses. Diese digitalen Modelle, häufig in CAD-Systemen erstellt, bilden die Grundlage für alle weiteren Schritte der Entwicklung von der Konzeption über das Design bis hin zur Produktion. Sie bieten eine Plattform, auf der sämtliche relevanten Informationen zu einem Produkt gesammelt, analysiert und visualisiert werden können.

Zentrale Aspekte eines modellbasierten Vorgehens sind:

- *Zentrale Datenhaltung:* Die gesamte Produktentwicklung erfolgt auf Basis eines konsistenten Modells, das in einer zentralen Datenbank verwaltet wird. Dieses Modell wird im Laufe des Entwicklungsprozesses kontinuierlich aktualisiert und erweitert (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Multidisziplinäre Integration:* Das Modell muss in der Lage sein, Daten und Informationen aus verschiedenen Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung zu integrieren. Hierbei werden unterschiedliche technische Disziplinen über ein einheitliches Modell verbunden (Eigner, et al., 2014).
- *Iterative Optimierung:* Im Rahmen des modellbasierten Vorgehens erfolgt die Entwicklung in mehreren Iterationen. Die Modelle werden kontinuierlich überprüft und anhand von Simulationsergebnissen oder realen Tests optimiert. Dies fördert die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Entwicklung (Schuck, et al., 2015).

4.2.2 Virtuelle Produktumgebung als Basis

Eine virtuelle Produktumgebung (Virtual Product Environment, VPE) ermöglicht es, digitale Modelle in einer vollständig virtuellen Umgebung zu erstellen und zu testen. In einer solchen Umgebung werden sowohl physikalische als auch funktionale Eigenschaften eines Produkts simuliert, ohne dass physische Prototypen notwendig sind. Die virtuelle Produktumgebung bietet eine Plattform, auf der sämtliche Entwicklungsarbeiten digital durchgeführt und getestet werden können. Dies reduziert nicht nur die Entwicklungszeit, sondern auch die Kosten, da physische Prototypen erst in späteren Phasen notwendig werden (Schuck, et al., 2015).

Im Rahmen eines modellbasierten Vorgehens dient die virtuelle Produktumgebung als simulationsgestützte Plattform, auf der verschiedene Szenarien durchgespielt werden können. Mithilfe von digitalen Zwillingen kann das physische Produkt im digitalen Raum nachgebildet und hinsichtlich seiner Funktionalität und Leistung getestet werden. Hierdurch wird die Produktentwicklung effizienter, da Anpassungen und Optimierungen direkt im digitalen Modell vorgenommen werden können.

4.2.3 Phasen des modellbasierten Vorgehens

Das modellbasierte Vorgehen in der virtuellen Produktumgebung lässt sich in mehrere Phasen unterteilen, die in einem iterativen Zyklus durchlaufen werden:

1. *Anforderungsanalyse und Definition:* In dieser Phase werden die Anforderungen an das Produkt definiert und in das digitale Modell integriert. Die Anforderungsdefinition stellt sicher, dass das Modell sämtliche funktionalen und technischen Spezifikationen erfüllt, die im späteren Entwicklungsprozess benötigt werden. Häufig werden in dieser Phase Systems-Engineering-Methoden genutzt, um die Anforderungen in das Modell zu übertragen (Kossiakoff, et al., 2011).
2. *Modellierung und Design:* Auf Basis der definierten Anforderungen wird das digitale Modell des Produkts erstellt. Hier kommen CAD-Systeme und Simulationstools zum Einsatz, die es ermöglichen, das Produkt in einer virtuellen Umgebung zu entwerfen und seine Eigenschaften zu simulieren. Durch die modellbasierte Herangehensweise kann das Design in Echtzeit angepasst und auf Effizienz und Machbarkeit geprüft werden. Darüber hinaus können in dieser Phase auch generative Designansätze genutzt werden, die mithilfe von Algorithmen mehrere Designvarianten erzeugen und optimieren (Chakrabarti, et al., 2020).
3. *Simulation und Validierung:* Nachdem das Modell erstellt wurde, erfolgt die Simulation seiner physikalischen und funktionalen Eigenschaften. Diese Simulation

nen sind essenziell, um das Verhalten des Produkts unter verschiedenen Bedingungen zu testen. In der virtuellen Produktumgebung werden dabei Aspekte wie mechanische Belastungen, thermische Eigenschaften oder aerodynamische Effekte simuliert (Ovtcharova, et al., 2015). Im Anschluss an die Simulation erfolgt die Validierung des Modells, um sicherzustellen, dass es den definierten Anforderungen entspricht.

4. *Optimierung und Iteration*: Basierend auf den Ergebnissen der Simulation werden Verbesserungen und Anpassungen am Modell vorgenommen. Dieser iterative Prozess sorgt dafür, dass das Produkt kontinuierlich optimiert wird, bevor es in die nächste Entwicklungsphase übergeht. Der iterative Charakter des modellbasierten Vorgehens erlaubt es, Designfehler frühzeitig zu erkennen und zu beheben, was die Kosten senkt und die Time-to-Market verkürzt (Eigner, et al., 2014).
5. *Prototyping und Produktion*: Erst nachdem das digitale Modell in der virtuellen Umgebung erfolgreich getestet und validiert wurde, erfolgt die Fertigung eines physischen Prototyps. Dieser Prototyp dient dazu, die Ergebnisse der virtuellen Simulationen in der Praxis zu überprüfen. Durch das modellbasierte Vorgehen sind jedoch oft nur wenige physische Prototypen erforderlich, da der Großteil der Tests und Optimierungen bereits virtuell durchgeführt wurde (Schuck, et al., 2015).

4.2.4 Vorteile und Herausforderungen des modellbasierten Vorgehens

Das modellbasierte Vorgehen in der virtuellen Produktumgebung bietet zahlreiche Vorteile, ist jedoch auch mit Herausforderungen verbunden.

Als Vorteile wären hier zu nennen:

- *Kürzere Entwicklungszeiten*: Durch die Nutzung digitaler Modelle und virtueller Tests kann der Entwicklungsprozess erheblich beschleunigt werden. Änderungen am Design können schnell umgesetzt und direkt im Modell getestet werden (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Kostenreduktion*: Da physische Prototypen erst in späteren Phasen notwendig sind, können die Kosten für Prototyping und Tests deutlich reduziert werden. Zudem sinken die Kosten für Fehlerkorrekturen, da diese frühzeitig im digitalen Modell identifiziert werden (Schuck, et al., 2015).
- *Interdisziplinäre Zusammenarbeit*: Digitale Modelle bieten eine gemeinsame Plattform, auf der verschiedene Disziplinen zusammenarbeiten können. Dies fördert den Austausch zwischen den Teams und führt zu besseren Ergebnissen (Eigner, et al., 2014).

Es ergeben sich folgende Herausforderungen:

- *Datenintegration*: Eine der größten Herausforderungen besteht darin, Daten aus verschiedenen Quellen und Disziplinen in das zentrale Modell zu integrieren. Die Zusammenarbeit zwischen Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung erfordert leistungsfähige PLM-Systeme, die eine reibungslose Integration ermöglichen (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Datenqualität und Konsistenz*: Die Qualität der verwendeten Daten ist entscheidend für die Genauigkeit der Modelle. Inkonsistente oder fehlerhafte Daten können zu falschen Simulationsergebnissen führen, was den gesamten Entwicklungsprozess beeinträchtigen kann (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Technologische Anforderungen*: Die Implementierung eines modellbasierten Vorgehens erfordert eine moderne technologische Infrastruktur, die leistungsstarke Rechner und spezialisierte Software zur Verfügung stellt. Nicht alle Unternehmen verfügen über die notwendigen Ressourcen, um diese Technologien vollumfänglich zu nutzen (Schuck, et al., 2015).

Das modellbasierte Vorgehen in der virtuellen Produktentwicklung bietet signifikante Vorteile für die Entwicklung komplexer Produkte. Es fördert eine effizientere, interdisziplinäre Zusammenarbeit und ermöglicht es, Design und Funktionalität eines Produkts schon früh in der Entwicklung zu testen und zu optimieren. Die Verwendung virtueller Produktumgebungen reduziert nicht nur die Entwicklungszeit, sondern minimiert auch die Kosten, da physische Prototypen erst in späteren Phasen benötigt werden. Gleichzeitig bleibt jedoch die Herausforderung bestehen, Daten in hoher Qualität und Konsistenz bereitzustellen und zu gewährleisten, dass die technologische Infrastruktur den Anforderungen gerecht wird.

4.3 Interaktive Simulationsumgebung

Die interaktive Simulationsumgebung ist ein wesentlicher Bestandteil moderner virtueller Produktentwicklung und erweitert das modellbasierte Vorgehen um eine dynamische Komponente, bei der Anwender in Echtzeit mit dem Modell interagieren und Simulationen anpassen können. Diese Interaktivität ermöglicht es, verschiedene Szenarien zu testen, Designentscheidungen sofort zu validieren und den Entwicklungsprozess iterativ zu optimieren. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie die interaktive Simulationsumgebung in der virtuellen Produktentwicklung eingesetzt wird, um eine tiefere Integration von Simulation, Modellierung und Nutzerinteraktion zu erreichen.

4.3.1 Grundlegende Prinzipien der interaktiven Simulationsumgebung

Eine interaktive Simulationsumgebung unterscheidet sich von traditionellen, batch-basierten Simulationsansätzen dadurch, dass sie es Nutzern ermöglicht, in Echtzeit mit den digitalen Modellen zu arbeiten. Während herkömmliche Simulationen oft lange Berechnungszeiten erfordern, erlaubt eine interaktive Umgebung den Entwicklern, während der Simulation neue Parameter einzugeben, Änderungen am Design vorzunehmen und sofort zu sehen, wie sich diese auf das Verhalten des Modells auswirken. Diese Fähigkeit, in Echtzeit auf Designanpassungen zu reagieren, verkürzt die Zeit für die Optimierung von Produkten erheblich und fördert die Kreativität und Flexibilität im Entwicklungsprozess (Ovtcharova, 2015).

Durch die Kombination von virtuellen Modellen und Echtzeitsimulationen können Unternehmen verschiedene Designalternativen simultan testen und sofort die Auswirkungen von Änderungen auf die Leistungsfähigkeit eines Produkts analysieren. Dies ist besonders bedeutsam, wenn komplexe physikalische oder mechanische Phänomene simuliert werden, die stark von den Eingangsparametern abhängig sind, wie Strömungsdynamik, thermische Effekte oder Materialfestigkeit (Bernstein, 2023).

4.3.2 Anwendung in der virtuellen Produktentwicklung

Die Verwendung von interaktiven Simulationsumgebungen in der virtuellen Produktentwicklung basiert auf der Integration von CAD-Systemen, Finite-Elemente-Analyse (FEA) und Mehrkörper-Simulationen (MBS) in Echtzeitplattformen. Diese Simulationsumgebungen ermöglichen es, die physikalischen Eigenschaften eines Produkts zu simulieren und dabei direkt auf Designanpassungen zu reagieren. Dadurch lassen sich funktionale Anforderungen und Leistungsziele in einem flexiblen und agilen Entwicklungsprozess integrieren (Eigner & Stelzer, 2009).

Ein typischer Anwendungsfall ist die Optimierung mechanischer Bauteile in der Automobilindustrie. Entwickler können in einer interaktiven Umgebung beispielsweise die Belastung eines Fahrwerks simulieren, sofort Änderungen am Design vornehmen und sehen, wie sich diese Änderungen auf die Strukturfestigkeit auswirken. Solche Echtzeitsimulationen erlauben eine kontinuierliche Optimierung und reduzieren die Notwendigkeit aufwendiger Prototypentests (Schuck, et al., 2015).

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von interaktiven Simulationsumgebungen ist die Entwicklung von elektronischen Komponenten. In der virtuellen Produktumgebung können Entwickler elektrische Systeme in Echtzeit simulieren, Schaltkreise anpassen und die Auswirkungen dieser Änderungen auf die Leistungsfähigkeit des Systems sofort bewer-

ten. Dies ist besonders nützlich für die schnelle Entwicklung und Optimierung von Leiterplatten und Mikrochips, die in vielen Produkten integriert sind (Baez-Lopez, et al., 2012).

4.3.3 Vorteile der Interaktivität in Simulationsumgebungen

Die interaktive Simulationsumgebung bietet zahlreiche Vorteile für den Produktentwicklungsprozess, insbesondere in Bezug auf Zeitersparnis, Kollaboration und Qualitätsverbesserung:

- *Echtzeit-Validierung und schnelle Anpassungen*: Durch die Möglichkeit, Parameter in Echtzeit zu verändern und sofort die Auswirkungen zu sehen, können Entwickler schnellere Entscheidungen treffen und auf Änderungen reagieren. Dies spart nicht nur Zeit, sondern verbessert auch die Qualität der entwickelten Produkte, da Entwickler frühzeitig Rückmeldungen zu Designänderungen erhalten (Schuck, et al., 2015).
- *Reduktion physischer Prototypen*: Interaktive Simulationsumgebungen verringern die Notwendigkeit, zahlreiche physische Prototypen zu erstellen. Da viele Tests und Validierungen in der virtuellen Umgebung durchgeführt werden können, müssen physische Prototypen nur noch für die abschließende Validierung erstellt werden. Dies reduziert die Kosten erheblich und beschleunigt die Markteinführung (Schuck, et al., 2015).
- *Kollaboratives Arbeiten*: Interaktive Simulationsplattformen bieten auch die Möglichkeit, dass interdisziplinäre Teams in Echtzeit an einem Modell arbeiten können. Dies fördert die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung und ermöglicht es, Entscheidungen schneller und besser informiert zu treffen (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Verbesserte Risikobewertung*: Durch die Option, verschiedene Szenarien in Echtzeit durchzuspielen, können potenzielle Risiken und Schwachstellen frühzeitig identifiziert werden. Dadurch können Probleme im Design behoben werden, bevor sie in den Produktionsprozess übergehen, was wiederum die Produktqualität verbessert.

4.3.4 Technologische Voraussetzungen

Um eine interaktive Simulationsumgebung erfolgreich in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren, sind bestimmte technologische Voraussetzungen notwendig. Dazu gehören:

- *Leistungsstarke Rechner und GPUs:* Die Durchführung von Echtzeitsimulationen erfordert eine hohe Rechenleistung. Moderne Simulationssoftware ist stark von der Verarbeitungskapazität und der Grafikleistung abhängig, um komplexe physikalische Prozesse in Echtzeit berechnen zu können. GPU-basiertes Rechnen hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht und ermöglicht heute eine schnelle und effiziente Berechnung von Simulationen in Echtzeit (Fujimoto, 2015).
- *Simulationssoftware und digitale Werkzeuge:* Zur Implementierung einer interaktiven Simulationsumgebung ist der Einsatz spezialisierter Simulationssoftware notwendig, die Echtzeitdaten verarbeiten und visualisieren kann. Softwarelösungen wie ANSYS, Simulink oder Autodesk bieten entsprechende Funktionen zur Integration interaktiver Simulationsmodelle in den Entwicklungsprozess (Schuck, et al., 2015).
- *Datenintegration und PLM-Systeme:* Eine weitere Voraussetzung ist die Integration von Daten aus verschiedenen Quellen und Disziplinen in das zentrale Simulationsmodell. Hier kommen Product-Lifecycle-Management(PLM)-Systeme zum Einsatz, die sicherstellen, dass alle beteiligten Teams auf dieselben Daten zugreifen und ihre Simulationen auf einer konsistenten Datenbasis durchführen können (Eigner & Stelzer, 2009).

4.3.5 Herausforderungen bei der Implementierung

Trotz der zahlreichen Vorteile gibt es auch Herausforderungen bei der Implementierung interaktiver Simulationsumgebungen:

- *Komplexität der Modelle:* Die Erstellung von digitalen Modellen, die in Echtzeit interaktiv simuliert werden können, erfordert ein hohes Maß an Modellierungsgenauigkeit. Fehler in der Modellierung können zu falschen Simulationsergebnissen führen, was die Validität der gesamten Produktentwicklung gefährden kann (Eigner, et al., 2014).
- *Kosten und Ressourcen:* Die Einführung und Pflege einer interaktiven Simulationsumgebung erfordern erhebliche Investitionen in technologische Infrastruktur und Schulungen für die Mitarbeiter. Unternehmen müssen sorgfältig abwägen, welche Simulationsumgebungen für ihre speziellen Anforderungen geeignet sind und wie sie diese effektiv in den Entwicklungsprozess integrieren können (Ovtcharova, et al., 2005).
- *Datenqualität:* Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt stark von der Qualität der Daten ab, die in das System eingegeben werden. Unzureichende oder fehlerhafte Daten können zu fehlerhaften Simulationsergebnissen führen, was potenziell kostspielige Fehler im Produktionsprozess nach sich ziehen kann.

Die interaktive Simulationsumgebung stellt einen wesentlichen Fortschritt in der virtuellen Produktentwicklung dar. Sie ermöglicht es, Produkte effizienter zu entwickeln, Designentscheidungen in Echtzeit zu validieren und die Anzahl physischer Prototypen zu reduzieren. Durch die Kombination von Modellierung, Echtzeitsimulation und interaktiver Optimierung können Unternehmen Entwicklungszeiten verkürzen und die Qualität ihrer Produkte steigern. Dennoch erfordert die Implementierung solcher Umgebungen eine solide technologische Infrastruktur und die Sicherstellung einer hohen Datenqualität, um die Vorteile voll ausschöpfen zu können. Langfristig bietet die interaktive Simulationsumgebung ein hohes Potenzial, die Produktentwicklung agiler, flexibler und kosteneffizienter zu gestalten.

5 Hybrides modellbasiertes Vorgehensmodell in der virtuellen Produktentwicklung

Im vorliegenden Kapitel wird ein neues Vorgehensmodell vorgestellt, dieses wird sich aus klassischen und agilen Bestandteilen zu einem hybriden Modell zusammensetzen. Die technisch-methodische Grundlage (vgl. Abbildung 5-1: Schematischer Aufbau) bzw. Basis dieser Methodik bildet der modellbasierte und virtuelle Produktentstehungsprozess, der im darauffolgenden Abschnitt in den neuen Ansatz integriert wird. Die Nutzung dieser Methoden ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung des hier entwickelten Vorgehensmodells. Der Aufbau dieses Kapitels ist in zwei wesentliche Bereiche gegliedert, die durch eine dritte Komponente miteinander verbunden werden (vgl. Abschnitt 5.4). Zu Beginn wird das prozessorientierte Vorgehen vorgestellt. In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt auf prozessualen Fragestellungen hinsichtlich der Methodik.

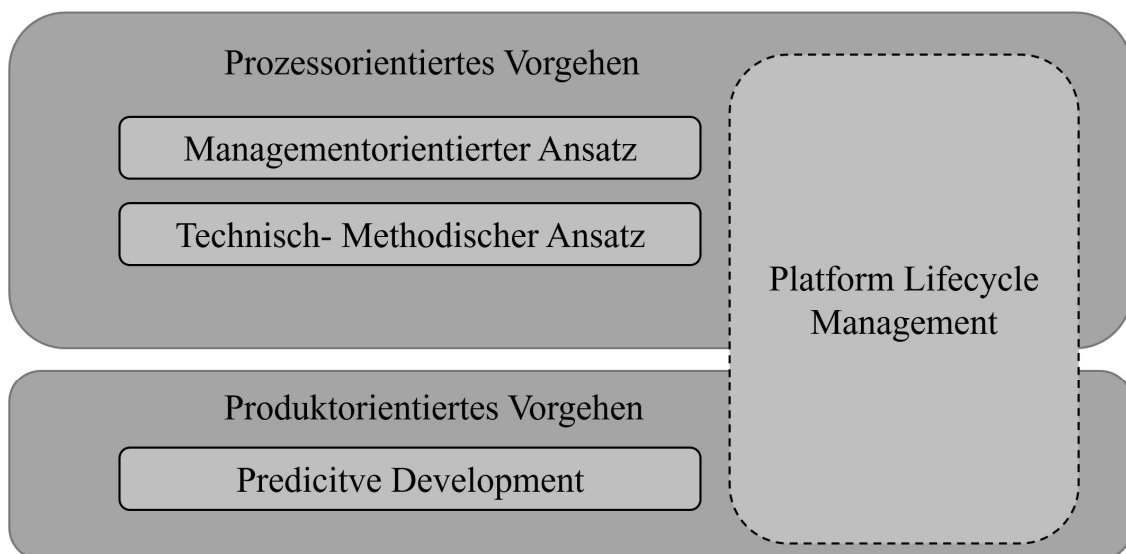


Abbildung 5-1: Schematischer Aufbau

Dies beinhaltet die Formulierung des agilen Arbeitsmodells innerhalb des managementorientierten Ansatzes sowie die technisch-methodischen Ansätze der verschiedenen Disziplinen (Mechanik, Elektronik, Software). Die Betrachtung erfolgt an dieser Stelle noch produktunabhängig. In diesem Abschnitt werden bereits bestehende Ansätze miteinander kombiniert, erweitert und in Form einer neuen Methodik postuliert. Im Weiteren wird auf das Rollenverständnis der Mitarbeiter im Rahmen der Anwendung eingegangen. Ein rein agiles Vorgehen erfordert ein grundlegend neues Mindset unter den Mitarbeitern. Der mit

agilen Methoden einhergehende Veränderungsprozess spielt eine zentrale Rolle, um die Methodik später erfolgreich einzusetzen. Entsprechend ist dieser Abschnitt hervorzuheben.

Anschließend werden das produktorientierte Vorgehen sowie die strategische Vorgehensweise bei der Produktplanung hinterfragt und überprüft. Hierbei wird der Produktlebenszyklus nach heutigem Wissen betrachtet und der Produktentwicklungsprozess generisch erweitert. In der Vergangenheit wurde dieser häufig nicht über den SOP hinaus definiert. Neue Vorgehensweisen, dynamische Anforderungen an das Produkt sowie neue Geschäftsmodelle fordern ein Umdenken.

Nachdem das generische Vorgehen vorgestellt wurde, wird eine Vorgehensweise für eine ganzheitliche Steuerung produkt- und prozessübergreifend formuliert. Begrifflich wird dieser Bereich als Platform-Lifecycle-Management bezeichnet. Die hier beschriebene Systematik ist davon abzugrenzen, obwohl auf den ersten Blick eine gewisse Kohärenz besteht. Das Platform-Lifecycle-Management geht über das Produkt-Lifecycle-Management (vgl. Abschnitt 3) hinaus. Es zielt darauf ab, eine vollumfängliche Sicht auf das Produkt, dessen Prozesse und die dazugehörige Infrastruktur zu ermöglichen. Das Platform-Lifecycle-Management verfolgt das Ziel, eine Plattform rund um den PEP aufzubauen und Synergien innerhalb dieses Prozesses produktübergreifend zu nutzen und zu steuern. Das Produktportfolio eines Unternehmens wird durch verschiedene Bausteine charakterisiert, in diesem Sinne stellt das Platform-Lifecycle-Management eine verbindende Komponente dar. Dies kann die Komplexität und Stabilität des Produktportfolios nachhaltig beeinflussen. In Abschnitt 2.5.6 wird weiter darauf eingegangen.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird das Anwendungskonzept nochmals zusammengefasst, bevor im folgenden Kapitel die Methodik im Rahmen von Forschungsprojekten angewendet und auf ihre Praktikabilität hin überprüft bzw. validiert wird.

5.1 Allgemeiner Aufbau der hybriden Methodik

Bei der Entstehung eines Produkts unterteilt sich der Schritt Entwicklung in mehrere Teilbereiche. Beispielsweise arbeiten das Designteam (Mechanik), das Team für die elektronischen Komponenten (Elektronik) und die Abteilung für die Softwareentwicklung (Informationstechnik) parallel (Eigner & Stelzer, 2009). Sobald ein abgestimmtes Konzept vorliegt, starten alle zeitgleich mit ihrer Arbeit. Im klassischen Produktentwicklungsprozess (PEP) sind bis zum ersten, manchmal auch zweiten Prototyp Abweichungen vom Konzept vorgesehen (Voigt, 2005). Um dem Kunden die Möglichkeit zu geben, mehr Einfluss auf sein Produkt zu nehmen, müssen häufigere Feedbackschleifen in den Entste-

lungsprozess eingebaut werden (Gausemeier, et al., 2016). Somit ist ein iteratives Vorgehen vor allem in Bereichen sinnvoll, die die Kunden direkt betreffen und vielen Änderungseinflüssen unterworfen sind, beispielsweise beim Bedienungskonzept, im Rahmen des Internet der Dinge (IoT) sowie bei Software allgemein (Ehrlenspiel, 2009).

Auf dieselbe Weise wie jedes Unternehmen ein an seine Bedürfnisse angepasstes Produktionssystem entworfen hat, sollten auch die agilen Entwicklungsmethoden abgewandelt und auf die jeweiligen Bedürfnisse zugeschnitten werden (Westkämper, 2006). Ein starres Einführen von beispielsweise Scrum – auch wenn dieses mittlerweile für generelles Projektmanagement gerne verwendet wird – ist nicht immer zielführend (Cockburn, 2007). Eine Möglichkeit ist daher die Unterteilung in Teilprojekte, um klassische und agile Entwicklungsmethoden in einem PEP gleichzeitig anzuwenden.

In diesem Sinne soll der Grad der Agilität problemspezifisch angepasst werden. Es sollte die Möglichkeit bestehen, entsprechende Teilprojekte agil zu gestalten und andere Projekte mit einem geringen Komplexitätsgrad sowie klaren Anforderungen klassisch zu gestalten. Gerade Teilprojekte mit einem hohen Softwareanteil könnten so stark von dem agilen Vorgehen profitieren. Für ein klassisches mechanisches Teilprojekt mit vorhandenem Lasten- und Pflichtenheft sowie wenig Lösungsspielraum macht ein Transformationsprozess wenig Sinn. In Abschnitt 5.5 werden Kriterien zur Identifikation von Teilprojekten dargestellt, in denen ein Vorgehen nach agilen Methoden sinnvoll wäre. Es handelt sich um ein generisches Vorgehen. Quantitativ sollen hier keine festen Größen definiert werden, dazu sind die technischen Anwendungsgebiete zu unterschiedlich und müssen technologie- und problemspezifisch festgelegt werden.

Der hybride agile Produktentstehungsprozess ist in Abbildung 5-2 visualisiert. Zu sehen ist die Unterteilung des Entwicklungsprojekts in mehrere Teilprojekte. Diese sind mit TP1 bis TP3 gekennzeichnet. Hierbei ist zu nennen, dass einzelne Teilprojekte mit iterativen Entwicklungsprozessen arbeiten und andere mit klassischen Methoden. Weiterhin stellen die Meilensteine MS 1–3 die Synchronisationspunkte zwischen den agil und klassisch gesteuerten Projekten dar. Nach den ersten Quality-Gates zum Anfang der zweiten Entwicklungsphase stellt die Vorentwicklung eine neue Technologie zur Verfügung. Hier greift der Prozess der Kategorisierung (vgl. Abschnitt 5.4.1) von kurzfristigen Änderungseinschüben. Nach der Entscheidung über die Einordnung geht der Prozess entweder mit oder ohne Änderungseinschub weiter.

Da bereits empfohlen wurde, das Projekt in kleinere Teilprojekte zu unterteilen, sind die ersten beiden Punkte der Tabelle nur bedingt relevant. Die ideale Teamgröße liegt bei drei bis zehn Mitgliedern. Die Komplexität des Produkts kann durch die logische Aufteilung in Teilprojekte ebenfalls verringert werden. Da agile Methoden von häufigen, kurzen

Abstimmungsrunden innerhalb des Teams leben, stellt die räumliche Trennung der Teammitglieder eine Herausforderung für das Projekt dar. Insbesondere Zeitunterschiede erschweren das Erreichen gemeinsamer Tagesziele. Zudem sollte unkomplizierte und spontane Zusammenarbeit gefördert werden, was durch eine geografische Trennung erschwert wird. Bei starkem Einfluss von Stakeholdern können die strikten Strukturen des klassischen Projektmanagements von Vorteil sein. Wenn die Anforderungen hingegen besonders volatil sind, insbesondere bei Kundenfeedback, eignen sich agile Methoden besser, um ein kundenorientiertes Produkt zu entwickeln.

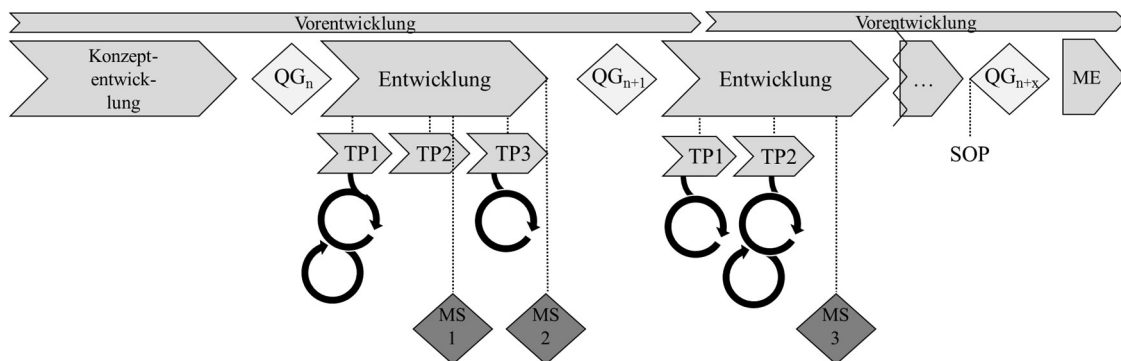


Abbildung 5-2: Allgemeiner Aufbau des PEP

Falls klassische und agile Methoden parallel eingesetzt werden, ist eine Synchronisation der Projekte erforderlich, da auch agil organisierte Teilprojekte Qualitätsfreigaben erreichen und auf einen fixierten Zustand hinarbeiten müssen. Der allgemeine Aufbau der Methodik im Produktentstehungsprozess ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Zusammen mit der Vorentwicklung ist der Entwicklungsprozess in Teilprojekte untergliedert, die je nach Anforderung agil oder klassisch gemanagt werden. In dem in dieser Arbeit entwickelten Vorschlag zur Anpassung des PEP dienen die bereits vorhandenen Meilensteine (MS) des Produktentwicklungsprozesses als Synchronisationspunkte. Sie führen die Entwicklungsphasen von klassischen und agilen Projekten zusammen und dienen als Ausgangspunkt für weitere inkrementelle oder iterative Schritte. Meilensteine und Quality-Gates sind in diesem Fall nicht dasselbe. Die eher zeitorientierten Meilensteine sollen den Projektstatus der verschiedenen Entwicklungsteams synchronisieren und als aktueller Ausgangspunkt für alle beteiligten Parteien dienen. Die Quality-Gates (QG_n) hingegen sind ergebnisorientiert. Hier ist konkrete Leistung gefragt, was es unmöglich macht, die Gates zu ignorieren (vgl. hierzu Abschnitt 2.1.4 und 2.1.5).

Zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses sollten die Meilensteine und Quality-Gates definiert werden. Diese teilen in den meisten Fällen den Produktentstehungsprozess in Teilprojekte ein, d. h., das gesamte Projektvorhaben wird untergliedert in z. T. voneinander abhängige Subprojekte. In diesem Rahmen ist eine Aufwandsschätzung durchzuführen. Die Planung und Einteilung von Ressourcen sowie Projektbeteiligten stehen hier im

Vordergrund. Zeitgleich sollte das Projekt in voneinander abhängige Teilaktivitäten zerlegt werden, um auf deren Basis eine Zeitplanung erstellen zu können. Dieses „Divide-and-Conquer-Prinzip“ erleichtert die Planung und in der Folge auch die Aufwandsschätzung, was einfacher und genauer ist, als ein Projekt in überschaubare Teilaktivitäten zu unterteilen oder das gesamte Projekt einschätzen zu müssen (Hummel, 2011). Welche Technik zur Aufwandsschätzung genutzt wird, ist technologie-, industrie- und produktabhängig. Disziplinabhängig werden hier unterschiedliche Methoden im Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Softwareentwicklung genutzt. Dieses Prinzip ist bei der Planung mit mehr Aufwand verbunden, kann aber bei korrekter Aufschlüsselung der Unteraktivitäten präzisere Werte bei der Einschätzung der Projektdauer liefern. Des Weiteren ist es möglich, bei der Planung den Kunden frühzeitig miteinzubinden und so Aktivitäten im Projekt zu identifizieren, die eine enge Zusammenarbeit mit diesem erfordern. Dem Kunden können zudem auf diese Weise Transparenz und Professionalität vermittelt werden (Hummel, 2011). Das in Abschnitt 5.2.3 vorgestellte modellbasierte Vorgehen ermöglicht es, das Produkt in eine Reihe von unterschiedlichen und voneinander abhängigen Teilsystemen zu zerlegen. Kombiniert mit der Projektplanung kann auf diese Weise anhand von vordefinierten Kriterien die zu bevorzugende Vorgehensweise festgelegt werden, d. h., ob ein agiles oder klassisches Vorgehen genutzt wird.

Zusammenfassend ergibt sich, dass im agilen Vorgehen im Produktentstehungsprozess eine Balance zwischen flexiblem und standardisiertem Vorgehen gefunden werden muss. Diese Erkenntnis wird von Boehm und Turner in ihrem Werk „Balancing Agility and Discipline“ bestätigt (Boehm, 2006). Die Autoren geben an, dass die richtige Balance zwischen Agilität und Standardisierung gefunden wird, wenn die Risiken beider Extreme abgewogen werden, um so zu einer effektiven hybriden Lösung zu gelangen (Boehm, 2006). Coallier bestätigt zusätzlich, dass sowohl in der Produktentwicklung als auch in einem agilen Umfeld Prozess- und Werkzeugstandards notwendig sind. Diese Standards ermöglichen eine Effizienzsteigerung und eine Wiederverwendbarkeit im Entwicklungsprozess (Coallier, 2007).

Eine Entscheidungsbewertung, unter welchen Bedingungen bzw. Kriterien eine entsprechende Vorgehensweise gewählt werden sollte, findet sich in Abschnitt 5.5.

5.2 Fragmentierung der Methodik

Nach der allgemeinen Einführung in Abschnitt 5.1 wird die allgemeine Vorgehensweise nachfolgend aufgespalten bzw. fragmentiert und in Form einzelner Bausteine vorgestellt. Abschnitt 5.1 bot einen groben Überblick über die Methode und die Vorgehensweise. Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise detailliert erarbeitet und erläutert. Nachdem die Fragmentierung in diesem Abschnitt erfolgte, werden anschließend in Abschnitt

5.4 alle Fragmente und Ergebnisse zusammengefasst und zu einem Gesamtsystem wiedervereinigt.

5.2.1 Konventionelles Vorgehen

Wie in 5.1 erläutert, gliedert sich die Methodik in ein konventionelles und ein agiles Vorgehen. Den Bedürfnissen entsprechend muss jedes durchzuführende Projekt dem jeweiligen Vorgehensmodell gerecht werden. Das in dieser Arbeit vorgestellte agile Vorgehen kann zwar auf hinreichend viele Fälle mit interdisziplinärer Problemstellung angewendet werden, unter bestimmten Bedingungen ist eine klassische Vorgehensweise ratsamer (vgl. Abschnitt 5.5). Eine parallele Anwendung beider Methoden in einem Gesamtprojekt ist dagegen unbedenklich, entscheidend ist vor diesem Hintergrund nur der in Abschnitt 5.1 beschriebene Synchronisierungszeitpunkt bei beiden Vorgehensweisen. Dies kann z. B. mithilfe von Meilensteinen oder Quality-Gates festgelegt werden. Ein agiles und modellbasiertes Vorgehen ist bei bestimmten technischen Problemstellungen nicht einfach umzusetzen. Dies kann u. a. an der nicht notwendigen Zusammenarbeit mit dem Kunden in diesem Teilprojekt, der geringen Anzahl und den einfachen Anforderungen liegen.

5.2.1.1 Modellbasiertes V-Modell nach Eigner

Das modellbasierte V-Modell nach Eigner ist ein etabliertes Vorgehensmodell, das in der Produktentwicklung zur systematischen Planung, Entwicklung und Validierung komplexer Produkte eingesetzt wird. Es basiert auf dem Grundsatz, dass die Entwicklung eines Produkts in einem strukturierten und sequenziellen Prozess erfolgt, wobei die Spezifikations- und Validierungsphasen in einer V-Form angeordnet sind. Diese Struktur ermöglicht eine klare Trennung und Abfolge der verschiedenen Entwicklungsphasen, beginnend mit der Anforderungsdefinition bis hin zur Validierung und Verifikation des Produkts.

Das V-Modell beschreibt die Abfolge von Aktivitäten, die für die Entwicklung eines Produkts erforderlich sind. Der linke Schenkel des V steht für die Spezifikationsphase, in der die Anforderungen an das Produkt schrittweise erfasst und verfeinert werden. Der rechte Schenkel des V repräsentiert die Validierungsphase, in der das Produkt anhand der zuvor definierten Anforderungen getestet und verifiziert wird. Diese Struktur fördert eine enge Verknüpfung zwischen der Spezifikation und der späteren Validierung, was sicherstellt, dass das entwickelte Produkt die gestellten Anforderungen erfüllt (Eigner & Stelzer, 2009).

Die zentrale Idee des V-Modells ist es, dass jeder Spezifikationsschritt durch einen entsprechenden Validierungsschritt gespiegelt wird. Dies gewährleistet eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Anforderungen und ihrer Erfüllung. Am unteren Punkt des V, wo

beide Schenkel zusammenlaufen, erfolgt die Implementierung des Produkts. Der iterative Charakter des Modells ermöglicht es, frühzeitig Fehler zu erkennen und zu beheben, was die Qualität des Endprodukts erheblich verbessert.

5.2.1.2 Anwendung des modellbasierten V-Modells

Das modellbasierte V-Modell geht über das klassische V-Modell hinaus, indem es auf einer modellbasierten Entwicklung basiert. In dieser Variante werden die Produkthanforderungen, Entwurfsentscheidungen und Validierungsergebnisse nicht nur dokumentiert, sondern auch in digitale Modelle überführt. Diese Modelle werden als zentrale Informationsbasis genutzt, um die Konsistenz zwischen den verschiedenen Entwicklungsphasen zu gewährleisten und den gesamten Entwicklungsprozess zu optimieren.

In der modellbasierten Produktentwicklung nach Eigner werden die digitalen Modelle in jeder Phase des V-Modells verwendet. In der Spezifikationsphase werden beispielsweise funktionale und technische Anforderungen in Form von Modellen definiert, die dann in der Designphase verfeinert und simuliert werden. Diese Modelle dienen gleichzeitig als Grundlage für die Validierung, bei der sie in verschiedenen Simulationsumgebungen getestet werden, um sicherzustellen, dass sie den gestellten Anforderungen entsprechen (Ovtcharova, et al., 2015).

Durch die Nutzung eines zentralen digitalen Modells wird eine enge Verbindung zwischen Spezifikation und Validierung geschaffen. Dies fördert die Kollaboration zwischen verschiedenen Disziplinen, da alle Beteiligten auf dieselben Modelle zugreifen und ihre Arbeit darauf aufbauen können (Eigner & Stelzer, 2009). Das ermöglicht es, die Kommunikation zwischen den Disziplinen zu verbessern und Fehler frühzeitig zu identifizieren.

Das modellbasierte V-Modell bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Entwicklungsansätzen:

- *Rückverfolgbarkeit und Transparenz:* Da jede Phase des Entwicklungsprozesses durch digitale Modelle abgebildet wird, ist eine vollständige Rückverfolgbarkeit der Anforderungen gewährleistet. Dies erleichtert es, sicherzustellen, dass alle Anforderungen während der Entwicklung erfüllt werden.
- *Frühe Fehlererkennung:* Durch die Verknüpfung von Spezifikation und Validierung können Fehler bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses identifiziert und behoben werden, was die Qualität des Endprodukts erhöht und Kosten senkt (Eigner & Stelzer, 2009).
- *Interdisziplinäre Zusammenarbeit:* Das zentrale Modell fördert die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Fachbereichen, da alle Teams auf dieselben Daten

zugreifen und Änderungen sofort im gesamten Prozess sichtbar sind. Dies verbessert die Konsistenz und vermeidet Kommunikationsprobleme.

- *Kontinuierliche Verbesserung*: Der iterative Charakter des V-Modells ermöglicht es, den Entwicklungsprozess ständig zu verbessern, indem Erkenntnisse aus der Validierung in die Spezifikation zurückgeführt werden.

Das modellbasierte V-Modell nach Eigner stellt eine Weiterentwicklung des klassischen V-Modells dar und bietet eine strukturierte Herangehensweise für die Entwicklung komplexer Produkte. Durch die Nutzung digitaler Modelle in jeder Phase des Entwicklungsprozesses werden die Transparenz und Rückverfolgbarkeit erhöht, während die interdisziplinäre Zusammenarbeit gefördert wird. Dies führt zu einer höheren Qualität der Produkte, einer schnelleren Entwicklungszeit und einer effizienteren Nutzung der Ressourcen.

5.2.2 Agiles Vorgehen und Rollendefinitionen

Im Folgenden wird nicht beschrieben, wie die verschiedenen agilen Methoden in den PEP integriert werden können. Der PEP selbst muss agil werden. Je nach Branche unterscheiden sich die Entwicklungsprozesse stark. Die Zeit, die benötigt wird, um ein Produkt in die Produktion oder sogar auf den Markt zu bringen, ist je nach Branche unterschiedlich. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt ein Ansatz vorgestellt, der allgemeine Empfehlungen beinhaltet. Die nächste Anpassung konzentriert sich im ersten Schritt auf die beiden Schritte der PEP-Planung und -Entwicklung.

Aus Kapitel 2 sind die zwölf Prinzipien des agilen Manifests für die Softwareentwicklung bekannt. Diese lassen sich nicht eins zu eins auf eine allgemeine Vorgehensweise in der Produktentwicklung außerhalb der Softwareentwicklung übertragen. Trotzdem ist es hilfreich, aus diesen Prinzipien ein allgemeines agiles Vorgehen abzuleiten. Für die Methodik in dieser Arbeit werden folgende sechs Prinzipien herangezogen:

- Iteratives Vorgehen
- Direkte Kommunikation
- Einfachheit
- Funktionsfähigkeit
- Autonomie
- Reflexion

Drei Prinzipien lassen sich direkt aus dem Manifest identifizieren, im Folgenden werden alle sechs Prinzipien erneut kurz erläutert. Ein wesentliches Merkmal des agilen Vorgehens ist der „iterative Prozess“, der sich durch eine zyklische und inkrementelle Arbeitsweise auszeichnet. Dieser sich wiederholende Prozess ist aus prozessualer und Produktsicht maßgeblich. So wird nach jeder Iteration eine Verbesserung des Produkts sowie des Prozesses gestrebt. Dies ist im Interesse aller Stakeholder.

Die „direkte Kommunikation“ zwischen allen Projektbeteiligten und externen Partnern ist ein zentraler Grundsatz, um kurze und schnelle Kommunikationswege zu ermöglichen. Dies reduziert auch bei den interdisziplinären Teams fehlerhafte Informationen. Alle Beteiligten müssen miteinbezogen werden und als direkter Ansprechpartner gelten. Das Prinzip der Transparenz für alle Stakeholder geht mit der Kommunikation einher. Die direkte Kommunikation darf allerdings nicht zur Belastung während einer Iteration werden, hierzu gibt es dedizierte Zeitpunkte vor und nach einer Iteration.

Unter Berücksichtigung aller weiteren Prinzipien ist stets die „Einfachheit“ der beste Weg zum Ziel. Es soll stets die einfachste Lösung im Entstehungsprozess gewählt werden. Hierzu ist es notwendig, dem interdisziplinären Team ausreichend Lösungsfreiraum zu gewähren, um auf einem möglichst hohen Abstraktionsgrad Lösungsansätze zu generieren. Das modellbasierte Vorgehen ist hier ein möglicher Ansatzpunkt.

Innerhalb des funktionierenden inkrementellen Vorgehens spielt die „Funktionsfähigkeit“ eine große Rolle. Diese macht es möglich, Fehler frühzeitig zu erkennen und ggf. zu beseitigen bzw. zu erfassen. Ziel ist es auch, den Kunden die ersten Ergebnisse anhand eines funktionierenden Prototyps oder einer Demonstration zu präsentieren und ein direktes Feedback zu erhalten. Hier ist der blanke Quellcode oder das abstrakte System sinnvoller als Power-Point-Folien.

Die Autonomie legt fest, dass eigenverantwortliche Teams selbstständig den Arbeitsumfang festlegen, der in einem Sprint bearbeitet werden soll, sowie die Methoden, die dabei genutzt werden. Das Team trägt dabei auch die Verantwortung für die erfolgreiche Bearbeitung bis zum Sprintende. Die Festlegung des ‚Wie‘ wird an dieser Stelle durch das Entwicklerteam definiert. Mikromanagement sollte an dieser Stelle vermieden werden.

Das Prinzip der Reflexion dient dazu, nachhaltige und kontinuierliche Prozessverbesserungen zu erreichen. Dazu reflektiert das Team nach jedem Sprint, wie die erreichten Ergebnisse umgesetzt worden sind, und sucht nach Verbesserungspotenzial. Die Reflexion trägt zu einer erfolgreichen Umsetzung des agilen Vorgehens bei und ist ein zentrales Kennzeichen agilen Vorgehens.

Wie in Kapitel 4 dargelegt, soll die agile Methode Scrum adaptiert und für den allgemeinen Produktentstehungsprozess angepasst werden. Die allgemeine Vorgehensweise von

Scrum lässt sich disziplinunabhängig im Bereich Projektmanagement adaptieren. Nur die Anwendung in einer hardwaregetriebenen Umgebung stellt das Scrum-Framework vor neue Herausforderungen. Im Zentrum dieser Methode steht das zyklische Vorgehen, das durch den sogenannten Sprint gekennzeichnet ist. Wie in Abbildung 5-2 allgemein dargestellt, kann der Produktentstehungsprozess oder das Teilprojekt in einer Abfolge von Sprints durchlaufen werden. Die Zuordnung dieses prozessualen Ablaufs wird hier dem managementorientierten Ansatz (vgl. Abschnitt 2.4) zugeordnet, obwohl dieser den technischen und methodischen Ansätzen nahekommt.

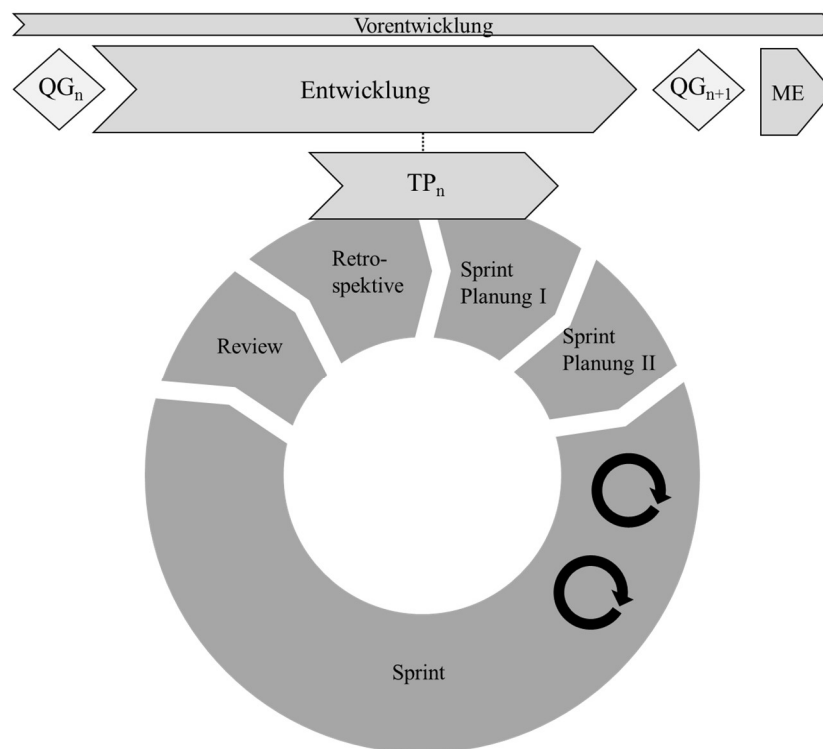


Abbildung 5-3: Das Rahmenmodell des agilen Entwicklungsprozesses

Im Zentrum der agilen Entwicklungsmethodik steht der Planungszyklus, der sogenannte Sprint. Die Phasen des Produktentstehungsprozesses werden anhand einer Folge von Sprints durchlaufen. Damit stellt der Sprint den prozessualen Handlungsrahmen innerhalb der Methodik dar. Dieser aktive Prozess wird nachfolgend als agiler Entwicklungsprozess bezeichnet.

Das (Teil-)Projekt unterteilt sich in eine vordefinierte Anzahl an n Sprints. Die festgelegte Zeitdauer des Sprints aus der Softwareentwicklung wird beibehalten und beträgt zwischen zwei und vier Arbeitswochen. Auf diese Weise wird das Ziel des Sprints nicht aus den Augen verloren und das Team erhält weithin wertvolles Feedback der Stakeholder. Ein Sprint beginnt mit dem Sprint-Planning I, in dem die Ziele oder Ergebnisse des

Sprints festgelegt werden (vgl. Abbildung 5-3). Hier wird die Frage des ‚Was‘ beantwortet. Das ‚Was‘ wird durch den Produktmanager definiert und priorisiert. In Sprint-Planung II wird der vorher abgestimmte Inhalt des Sprints konkretisiert und dargelegt, wie die angestrebten Ziele erreicht werden können. Hierbei die Frage des ‚Wie‘ beantwortet. Die Verantwortung hierbei liegt zu 100 % beim Team.

Im Zuge der Adaption müssen die Rollen der verschiedenen Teilnehmer des agilen Prozesses neu definiert werden. Eine komplette Adaption aus der Softwareentwicklung ist hier möglich, die unterschiedliche Struktur eines produzierenden Unternehmens im Vergleich zu einem Softwareunternehmen muss hier aber berücksichtigt werden. Es soll möglich sein, die Rollen einfach neu zu definieren, ohne die Hierarchie oder Unternehmensstruktur komplett neu zu gestalten. Die neuen Strukturen sollen unkompliziert in das Unternehmen integriert werden. Dies spiegelt sich auch in den verwendeten Termini wider, die es ermöglichen sollen, die verschiedenen Rollen, Artefakte und Iterationen schnell zu erfassen.

Im Rahmen eines Transformationsprozesses des gesamten Unternehmens ist eine komplette Adaption des Scrum-Ansatzes möglich und auch mittel- bis langfristig ratsam. In der Vergangenheit zeigte sich häufiger, dass ohne eine ganzheitliche Transformation der agile Ansatz missverstanden und nur eine neue Bezeichnung für alte Vorgehensweisen verwendet wurde (Borowski & Henning, 2013). Es wurde vielmehr als eine neue flexible Arbeitsweise interpretiert. Die Anwendung von agilen Methoden muss an einen Mentalitätswechsel gebunden sein. Eine falsche Interpretation würde sich schnell und deutlich u. a. durch eine steigende Mitarbeiterfluktuation bemerkbar machen. So ist der folgende Absatz mit seinem Terminus vielmehr als eine Übergangsphase zu verstehen, der später in die Transformationsphase übergehen sollte.

Der Produktmanager, im Scrum-Kontext der Product-Owner, ist für den wirtschaftlichen Erfolg des Entwicklungsprojekts verantwortlich. Er bewertet die gelieferten Ergebnisse des Entwicklungsteams nach jeder Iteration und ist für den Planungskatalog und den Katalog der Planungsmeilensteine zuständig. Weiter fungiert er als zentraler Ansprechpartner für den Auftraggeber.

Das interdisziplinäre Entwicklungsteam ist für die operative Durchführung des Sprints verantwortlich. Es ist für die Abarbeitung der vereinbarten Planungsumfänge jeder Iteration zuständig und muss die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse sicherstellen.

Der Prozessmanager, im Scrum-Kontext der Scrum-Master, ist Methoden- und Prozessverantwortlicher im Rahmen des Entwicklungsprozesses. Er unterstützt den Produktmanager und das Entwicklungsteam bei der Implementierung und Anwendung des agilen Vorgehens.

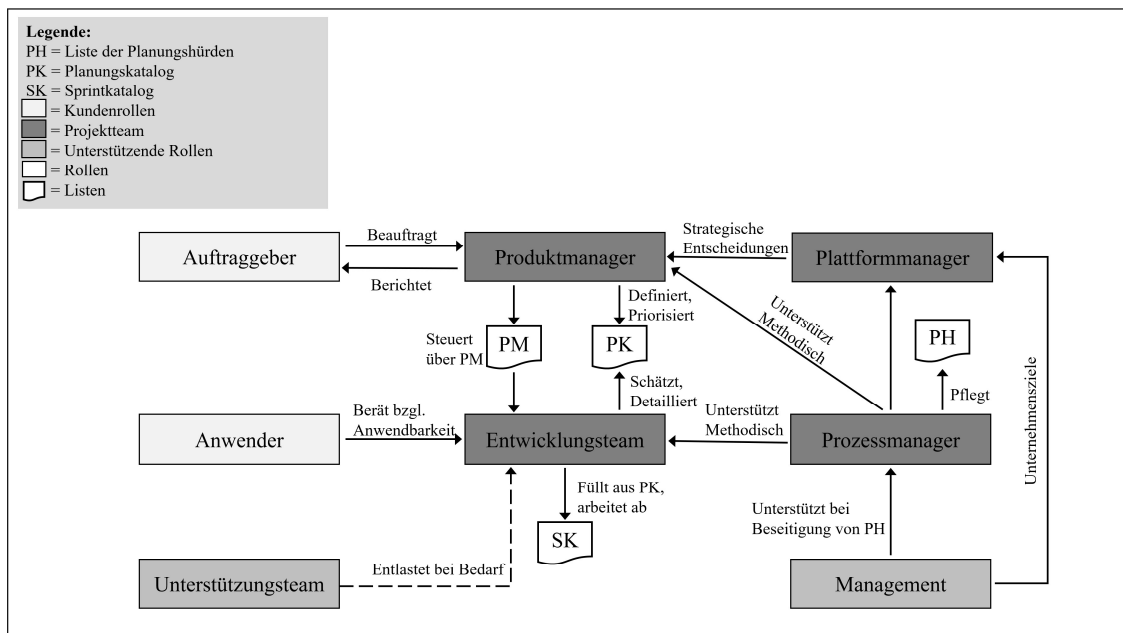


Abbildung 5-4: Das Rollenmodell des agilen Entwicklungsprozesses

Seine Aufgabe ist es, Planungshürden frühzeitig zu identifizieren und gemeinsam mit dem Management, Projektmanager und Entwicklungsteam Lösungen zu erarbeiten.

Der administrative Kunde des Produkts oder der Dienstleistung wird durch die Rolle des Auftraggebers repräsentiert. Der Auftraggeber setzt die Projektziele fest, überwacht kontinuierlich den Projektfortschritt und nimmt anschließend das finale Produkt bzw. die Dienstleistung ab.

Der operative Kunde nimmt die Rolle des Anwenders ein, er ist der erste Nutzer des zu entwickelnden Produkts oder der Dienstleistung und kennt seine Funktionalitäten sowie deren Eigenschaften. Durch seine praktischen Erfahrungen kann er das Entwicklungsteam in der Entwicklung der Leistung beraten.

Die Rolle Management wird durch die Führungsebene im Unternehmen eingenommen. Das Management besitzt eine unterstützende Funktion und stellt die Rahmenbedingungen zur Erfüllung der Projektziele sicher. Zusätzlich ist das Management für die Personalentwicklung und die Weiterbildung des Entwicklungsteams verantwortlich.

Das Unterstützungsteam ist eine optionale zu besetzende Rolle im agilen Entwicklungsprozess. Es unterstützt und entlastet das Entwicklungsteam durch die Übernahme von organisatorischen Tätigkeiten, die nicht originär planungsbezogen sind.

Ein Plattformmanager in der Softwareentwicklung ist verantwortlich für die Koordination und Optimierung von Softwareplattformen, die als Grundlage für verschiedene Anwendungen dienen. Er überwacht die Entwicklung, Wartung und Weiterentwicklung der

Plattform, um sicherzustellen, dass diese skalierbar, sicher und leistungsfähig ist. Zu seinen Aufgaben gehört die Zusammenarbeit mit Entwicklungsteams, um sicherzustellen, dass neue Funktionen reibungslos in die Plattform integriert werden können. Er stellt sicher, dass die technologischen Anforderungen der Plattform mit den Unternehmenszielen und den Bedürfnissen der Entwickler übereinstimmen. Ein Plattformmanager sorgt zudem für die Einhaltung von Standards, die Plattformkompatibilität sowie eine kontinuierliche Verbesserung der Infrastruktur. Er überwacht Sicherheitsaspekte und stellt sicher, dass die Plattform den erforderlichen Sicherheitsstandards entspricht. Darüber hinaus ist er auch ein zentraler Ansprechpartner für Stakeholder, um sicherzustellen, dass die Plattform langfristig den Unternehmensanforderungen entspricht.

Der Entwicklungsprozess wird über Kataloge und Listen gesteuert. Die Zusammenstellung der Kataloge und Listen wurde an die der Scrum-Methodik angelehnt. Ein Planungsumfang ist ein in sich abgeschlossenes Arbeitspaket. Jeder Planungsumfang kann in atomare Planungsaufgaben untergliedert werden. Die Planung und Umfänge werden nach Priorität der Abarbeitung sortiert und im Planungskatalog gespeichert, wobei der Produktmanager für die Pflege des Katalogs zuständig ist. Der Planungskatalog enthält somit alle notwendigen Aufgaben zur Entwicklung des Produkts oder der Dienstleistung. Da die Abarbeitung der Planungsumfänge iterativ erfolgt, wird aus dem Planungskatalog eine Menge von Planungsumfängen in den Sprintkatalog übernommen. Der Sprintkatalog enthält somit die Planungsumfänge, die innerhalb eines Sprints abgearbeitet werden sollen. Der Umfang des Sprintkatalogs ist durch die Kapazität des Teams begrenzt und er enthält stets die am höchsten priorisierte Planungsumfänge. Der Katalog der Planungsmilensteine gibt einen Überblick über alle Planungsmilensteine im Projekt. Die Liste der Planungshürden enthält alle Planungshürden, die das Entwicklungsteam von der Abarbeitung der Planungsumfänge abhält.

Mit der agilen Entwicklungsmethodik wurden Praktiken definiert, die der Steigerung der Agilität der Produktentwicklung dienen. Sie stellen eine Handlungsempfehlung für die Umsetzung der agilen Grundsätze im Entwicklungsprozess dar. Die Praktiken dienen dem Management des Entwicklungsprozesses, der Unterstützung der Kommunikation im Team und bieten Richtlinien für die operative Produktentwicklung. Ein zentraler Punkt ist die relative Aufwandsschätzung für jeden einzelnen Planungsumfang in sogenannten Planungspunkten im Entwicklungsteam. Die Aufwandsschätzung dient der Prognose des Ressourcenbedarfs bzw. der Abschätzung der bearbeitbaren Umfänge eines Sprints.

5.2.3 Modellbasierte und virtuelle Produktentwicklung

In Abschnitt 2.3 wurde in die Grundlagen und den Stand der Technik der modellbasierten Produktentwicklung eingeführt und an dieser Stelle die Adaption des modellbasierten

Vorgehens im Rahmen dieser Arbeit eingeleitet. Um das modellbasierte Vorgehen nutzen zu können, ist eine Anpassung an den agilen Entwicklungsprozess notwendig. Das iterative und instrumentelle Vorgehen muss mit dem modellbasierten Vorgehen zusammengeführt werden.

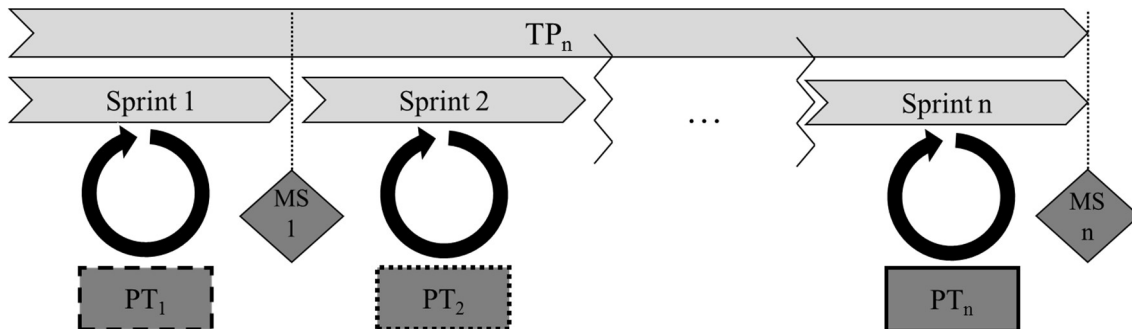


Abbildung 5-5: Darstellung des Ablaufs der Sprints in einem Teilprojekt und modellbasierten Vorgehens sowie den Prototypen

In Abbildung 5-5 ist der iterative Entwicklungsprozess innerhalb eines agilen (Teil-)Projekts dargestellt. Innerhalb der einzelnen Sprints wird nach dem agilen Vorgehen aus Abschnitt 5.2.2 gearbeitet. Ein Teilprojekt TP_n wird in eine aufeinanderfolgende Anzahl von Sprints n unterteilt. Jeder dieser Sprints stellt einen modellbasierten Entwicklungszyklus dar, an dessen Ende ein funktionierender Prototyp PT_n fertiggestellt wird. Dieser Prototyp stellt in dem Sinne kein fertiges Produkt dar, sondern ist ein zu Beginn abstrahiertes digitales Attribut, das im Verlaufe des Entwicklungsprozesses bzw. der Sprints weiter konkretisiert wird. Zu Beginn des Entwicklungsprozesses kann dieser Prototyp auch nur eine Produktvision darstellen, die durch bestimmte hochpriorisierte Anforderungen charakterisiert ist. Der konkretisierte Prototyp soll am Ende des Entwicklungsprozesses ein vollständiger, funktionaler und digitaler Prototyp sein, der sämtliche Absicherungsschritte, u. a. die simulative Verifikation, durchlaufen hat. Dieses Vorgehen ähnelt einem der Grundsätze der agilen Softwareentwicklung, in der die inkrementelle Arbeitsweise und die Lieferung von funktionierender Software postuliert werden. An dieser Stelle wird auf das Systemdenken aus Abschnitt 2.2.3 verwiesen. Dieses Vorgehen ist nur mit Unterstützung der virtuellen/digitalen Produktentwicklung zu realisieren, die komplett rechnerunterstützt stattfindet. Der Bau eines realen Prototyps ist erst nach Erreichen eines vorher definierten Meilensteins oder Quality-Gates vorgesehen. Der Übergang von einem Sprint zum nächsten kann flüssig erfolgen, das Einfügen eines Meilensteins ist, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, nicht nach jedem Meilenstein vorgesehen, sondern diese werden projektabhängig festgelegt. Am Ende eines jeden Teilprojektes wird ein funktioneller Prototyp oder Teilprototyp geliefert. Im Rahmen des modellbasierten Vorgehens kann auch von der Lieferung eines fertigen Systems oder Teilsystems bzw. Subsystems gesprochen werden. Auf diese Weise ist es wie in der agilen Softwareentwicklung möglich,

den Kunden frühzeitig Ergebnisse zu liefern und diese auch einer gewissen Form erlebbar zu machen. Kunden und Auftraggeber sind so in der Lage, den aktuellen Entwicklungsstand und etwaige Änderungen frühzeitig in den Produktentwicklungsprozess einzubringen.

Im Folgenden wird der Ablauf eines iterativen Sprints definiert und erläutert. In Kapitel 2 wurde in die Grundlagen und den Stand der Technik des modellbasierten Vorgehens eingeführt sowie der Gedanke des Systems-Engineering erläutert. In Kapitel 4 wurde das modellbasierte Vorgehen untersucht und dargelegt, warum sich dieses für die zugrundeliegende Arbeit als Adaption eignet.

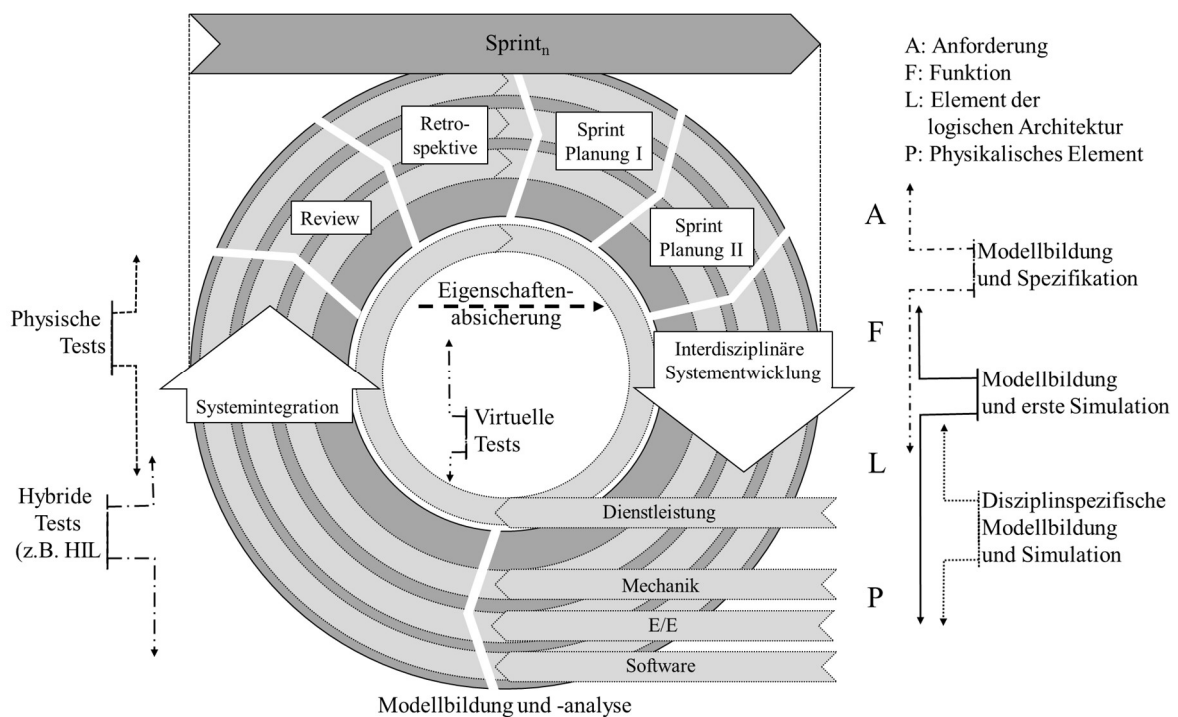


Abbildung 5-6: Agiles modellbasiertes Vorgehensmodell

In Abbildung 5-6 ist das adaptierte agile und modellbasierte Vorgehensmodell basierend auf dem erweiterten V-Modell (VDI 2206, 2004) bzw. dem MVPE-Vorgehensmodell zu sehen (Eigner, et al., 2012), das ursprünglich auf die VDI Richtlinie 2206 für die Entwicklung mechatronischer Systeme zurückgeht. Das erweiterte V-Modell besteht aus vier Hauptteilen: dem linken Flügel, der die interdisziplinäre Systementwicklung abbildet, dem Unterteil zur disziplinspezifischen Detailierung, dem rechten Flügel zur Systemintegration und einem darüber liegenden Systemlebenszyklus und PLM-Backbone. Wie im V-Modell wird auch hier mit dem RFLP- bzw. dem AFLP-Ansatz des MVPE-Vorgehensmodells gearbeitet, das dem modellbasierten Systems-Engineering zugrunde liegt.

Im Vorfeld des Sprints wird die Dauer der durchzuführenden Iteration definiert, die zwischen einer und vier Wochen beträgt. Der eigentliche Sprint beginnt mit der Festlegung von Ergebnissen und den Zielen durch das Sprint-Planning I, also dem ‚Was‘. Daraufaufgehend wird im Sprint-Planning II das ‚Wie‘ definiert, also wie die Ergebnisse und Ziele erreicht werden können. Anschließend an das Sprint-Planning I wird damit begonnen, das Anforderungsmodell zu bilden oder zu erweitern, das in diesem Sprint umgesetzt werden soll. Die *Modellbildung und Spezifikation* auf der Ebene der Anforderungen (A), Funktion (F) und Logischen Architektur (L) soll das System in einem ersten Schritt vor allem mit qualitativen Modellen beschreiben, wie bspw. dem Anforderungs- oder Funktionsmodell. In der Regel sind diese nicht ausführbar. Mithilfe einer Modellierungssprache wie SysML kann daraus ein erstes, zentrales Systemmodell spezifiziert werden. Auf diese Weise soll ein erstes Systemmodell erzeugt werden, an dem sich alle Disziplinen orientieren können und die dadurch unterstützt werden sollen. In der Sicht *Modellbildung und Simulation*, die auf den letzten drei Ebenen des AFLP-Ansatzes angesiedelt ist, wird das Systemmodell auch um quantitative Aspekte angereichert, was erste Simulationen des Systems ermöglicht. So können die Anforderungen, die für diesen Sprint aufgestellt worden sind, vorzeitig überprüft und validiert werden. In der dritten Sicht *Disziplinspezifische Modellbildung und Simulation* auf den letzten beiden Ebenen des Ansatzes wird das Systemmodell auch disziplinspezifisch weiter angereichert. Hier können u. a. CAx-Modelle entwickelt werden, die die exakte Konstruktion und viele dazugehörige Aspekte des Systems abbilden und zur Verifikation der Modelle aus den vorherigen Sichten herangezogen werden können. So ergeben sich innerhalb dieser Sicht auch die ersten geometrischen Merkmale des Prototyps. An dieser Stelle startet der disziplinspezifische und parallele Arbeitsprozess im Bereich der M-CAD-, E-CAD- und CASE-Modelle, die in einem späteren Stadium wieder zusammengeführt werden bzw. während des gesamten Entwicklungsprozesses miteinander verbunden sind.

Die rechte Seite des Vorgehensmodells widmet sich überwiegend der Erstellung des Anforderungsmodells, der Bildung eines interdisziplinären Systemmodells und der Systemanalyse sowie der späteren disziplinspezifischen Modellierung. Die linke Seite beschäftigt sich nach der disziplinspezifischen Gestaltung mit der Systemintegration, in der die entwickelten Komponenten simuliert und getestet sowie anschließend in das Gesamtsystem integriert und nach Verifikation und Validierung geprüft werden. Diese Schritte können durch z. B. virtuelle, hybride oder physische Tests erfolgen. Zum Ende des Sprints finden, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, das Review und die Retrospektive statt. Der nun fertig gestellte Prototyp sollte den gestellten Anforderungen zu Beginn des Prozesses genügen und, wie schon in diesem Kapitel erwähnt, funktionsfähig sein. Dieser Prototyp stellt in der Regel kein Gesamtsystem dar und kann auch nur aus einem Teilsystem bzw. Subsystem bestehen. Auch die Konkretisierung oder der Detaillierungsgrad ist hier zu nennen, denn der Prototyp sollte nur ein funktionierendes System darstellen, lässt sich

aber in nachfolgenden Sprints weiter detaillieren oder konkretisieren. Dieses iterative Vorgehen führt zu einer starken Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen. Im Vergleich zum klassischen und sequenziell ablaufenden V-Modell wird die Zusammenarbeit der unterschiedlichen Fachdisziplinen nach jedem Schritt erneut durchlaufen. Die Gefahr eines Auseinanderlaufens der Fachdisziplinen während des Entwicklungsprozesses ist so stark reduziert. Die zeitlichen Anteile im AFLP-Ansatz sind hier nicht festzulegen und hängen von verschiedenen Faktoren wie u. a. der Komplexität des Produkts oder dem Anteil des Entwicklungsaufwands jeder einzelnen Fachdisziplin ab.

Synchronisierung

Die Synchronisierung zwischen Fachdisziplinen in einem interdisziplinären Modell erfordert eine klare Kommunikation, einheitliche Datenstrukturen und koordinierte Arbeitsprozesse. Ein zentraler Aspekt der Synchronisierung ist die Verwendung eines gemeinsamen digitalen Modells als Grundlage, auf das alle Disziplinen zugreifen können, wie beispielsweise ein Product-Lifecycle-Management(PLM)-System. Solche Systeme ermöglichen es, Daten und Informationen aus verschiedenen Disziplinen – wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareentwicklung – zu integrieren und konsistent zu halten.

Die Echtzeitaktualisierung der Modellinformationen ist entscheidend, um sicherzustellen, dass Änderungen in einer Disziplin sofort für die anderen sichtbar sind. Dies vermeidet Inkonsistenzen und Verzögerungen im Entwicklungsprozess. Außerdem werden iterative Feedbackschleifen eingerichtet, in denen Ergebnisse und Designanpassungen regelmäßig zwischen den Teams abgestimmt werden, was die Fehlerminimierung unterstützt und die Effizienz steigert.

Werkzeuge wie digitale Zwillinge und Simulationsmodelle können ebenfalls zur Synchronisierung beitragen, indem sie die Simulation und Validierung von Entwürfen über verschiedene Disziplinen hinweg ermöglichen. Insgesamt ist die kontinuierliche Datenintegration, unterstützt durch klare Prozesse und Kommunikationsprotokolle, der Schlüssel zur erfolgreichen Synchronisierung in einem interdisziplinären Modell.

Grad der Agilität

Der Grad an Agilität in einem Entwicklungsprozess wird bestimmt durch die Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Iterationsfrequenz der angewendeten Methoden und Prozesse. Er hängt davon ab, wie schnell ein Team auf Änderungen in den Anforderungen oder der Umgebung reagieren kann. Der Agilitätsgrad wird durch mehrere Faktoren beeinflusst:

- *Iterative Zyklen*: Ein hoher Agilitätsgrad zeichnet sich durch kurze Iterationszyklen aus, in denen das Team regelmäßig Feedback einholt und das Produkt kontinuierlich verbessert. Methoden wie Scrum oder Kanban fördern diese Iterationen, indem sie die Entwicklung in kurze, überprüfbare Einheiten – sogenannte Sprints – unterteilen (Schwaber & Sutherland, 2017).
- *Kunden- und Stakeholder-Feedback*: Ein weiterer Indikator für den Agilitätsgrad ist die regelmäßige Einbindung von Kundenfeedback. Ein hoher Grad an Agilität erfordert häufige Feedbackschleifen und eine enge Zusammenarbeit mit den Stakeholdern, um sicherzustellen, dass das Produkt den Erwartungen entspricht (Beck, 2001).
- *Teamautonomie und Entscheidungsfreiheit*: Teams, die in einem agilen Umfeld arbeiten, haben oft mehr Entscheidungsfreiheit und Autonomie. Der Grad an Agilität wird erhöht, wenn das Team selbstorganisiert agieren und schnell Entscheidungen treffen kann, ohne auf hierarchische Prozesse zu warten (Rigby, et al., 2016).
- *Anpassungsfähigkeit des Prozesses*: Der Grad an Agilität hängt auch davon ab, wie flexibel der Prozess auf Änderungen reagiert. Ein agiler Prozess erlaubt es, die Richtung der Entwicklung je nach neuen Erkenntnissen oder geänderten Anforderungen schnell anzupassen, ohne lange Vorlaufzeiten (Highsmith, 2009).

Ein gängiges Modell zur Bewertung des Agilitätsgrads ist das Agile-Maturity-Model (AMM), das verschiedene Stufen von Agilität definiert, von der reinen Anwendung agiler Praktiken bis hin zur vollständigen Implementierung agiler Werte und Prinzipien (Cohn, 2010).

5.2.4 Requirements-Management

Im modellbasierten Produktentwicklungsprozess (PEP) spielt das Requirements-Management eine zentrale Rolle, um sicherzustellen, dass die definierten Anforderungen an ein Produkt während des gesamten Entwicklungszyklus konsequent verfolgt und erfüllt werden. Requirements-Management umfasst die Erfassung, Dokumentation, Verfolgung und Validierung von Anforderungen und ist entscheidend für die Qualität, Effizienz und Nachvollziehbarkeit des Entwicklungsprozesses.

1. Erfassung und Spezifikation der Anforderungen

Der erste Schritt im Requirements-Management ist die Erfassung und Spezifikation der Anforderungen. Hierbei werden sowohl funktionale als auch nichtfunktionale Anforderungen definiert, die von verschiedenen Stakeholdern stammen, wie Kunden, Management und regulatorischen Behörden. Diese Anforderungen werden in einem modellbasierten PEP nicht nur textuell dokumentiert, sondern auch in digitale Modelle überführt, die als zentrale Informationsquelle für den gesamten Prozess dienen (Eigner & Stelzer, 2009).

Durch die modellbasierte Herangehensweise wird die Spezifikation der Anforderungen präzise und visuell nachvollziehbar. Hierbei werden Tools wie Model-Based-Systems-Engineering (MBSE) genutzt, um Anforderungen mit den entsprechenden Modellen und Simulationsdaten zu verknüpfen (Eigner, et al., 2014). Dies ermöglicht eine klare Abbildung der Anforderungen auf die Produktstruktur und die zu entwickelnden Komponenten.

2. Anforderungen verknüpfen und verfolgen

Im modellbasierten PEP ist die Verknüpfung der Anforderungen mit den verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses entscheidend. Die Anforderungen werden direkt mit 3D-CAD-Modellen, Simulationsdaten und anderen relevanten Entwicklungsartefakten verbunden. Dies erleichtert die Verfolgung der Anforderungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts und gewährleistet eine konsistente Entwicklung (Kossiakoff, et al., 2011).

Traceability spielt hier eine zentrale Rolle: Durch die Rückverfolgbarkeit kann zu jedem Zeitpunkt nachvollzogen werden, wie und ob eine bestimmte Anforderung in den Produktmodellen abgebildet wurde. Dies hilft dabei, sicherzustellen, dass alle Anforderungen erfüllt sind und keine übersehen werden. Ein Product-Lifecycle-Management(PLM)-System unterstützt dabei, die Anforderungen durchgängig zu verfolgen und mit den entsprechenden Entwicklungsständen zu verknüpfen (Eigner, et al., 2012).

3. Validierung und Verifikation der Anforderungen

Ein wesentlicher Teil des Requirements-Managements ist die Validierung und Verifikation. Im modellbasierten PEP erfolgt die Verifikation über digitale Simulationen und Tests, die sicherstellen, dass die in den Modellen abgebildeten Anforderungen erfüllt werden. Validierungsprozesse stellen darüber hinaus sicher, dass die entwickelten Produkte den ursprünglichen Anforderungen und Bedürfnissen der Stakeholder entsprechen (Schuck, et al., 2015).

Durch die enge Verzahnung von Anforderungen und Modellierung können Änderungen während des Entwicklungsprozesses leichter integriert und überprüft werden. Diese Flexibilität ist entscheidend in einem agilen Umfeld, in dem Anforderungen häufig geändert oder angepasst werden müssen. Modelle können in Echtzeit aktualisiert werden, was eine schnelle Reaktion auf veränderte Bedingungen ermöglicht (Pohl & Rupp, 2015).

Fazit

Das modellbasierte Requirements-Management bietet wesentliche Vorteile für den PEP. Es sorgt für eine höhere Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Effizienz im Entwicklungsprozess. Durch die digitale Modellierung der Anforderungen und die Verknüpfung mit Entwicklungsartefakten können Teams sicherstellen, dass alle Anforderungen eingehalten und valide Ergebnisse erzielt werden. Dies führt zu einer verbesserten Qualität und minimiert das Risiko von Fehlentwicklungen.

5.3 Wissensmanagement in der hybriden Methodik

Zur Steigerung der Effizienz des agilen Vorgehens wird nachfolgend eine Methode entwickelt, die das projektübergreifende Wissensmanagement ermöglicht. Der Fokus liegt auf dem projektübergreifenden Transfer von prozessbezogenem Wissen. Darunter ist das Wissen über den Prozess selbst, mit seinen Aufgaben, Verantwortlichkeiten, Abhängigkeiten sowie Hintergrundinformationen und Erfahrungen zu verstehen (DGHH, 2002).

Als Prämisse für die Methodenentwicklung wird die vollständige Integration der Methode in die existierende Methodik definiert. Alle definierten Grundsätze werden für das weitere Vorgehen übernommen. Ziel ist es, den Aufwand für das Wissensmanagement durch Integration der Methode zu minimieren und zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu führen.

Als Lösungshilfe für das projektübergreifende Wissensmanagement wird in dieser Arbeit ein Referenzprozess vorgeschlagen. Dieser kann als Träger des prozessbezogenen Wissens dienen und würde durch den projektübergreifenden Einsatz den Wissenstransfer zwischen Projekten ermöglichen.

Neben der prozessualen Sichtweise steht das Wissensmanagement im agilen Umfeld in einem ähnlichen Spannungsfeld. Bei agilen Vorgehensweisen wird großer Wert auf direkte Kommunikation gelegt, weshalb Dokumentationsprozesse in der Produktentstehung eine untergeordnete Rolle spielen. Damit ist ein Risiko für den Wissensverlust verbunden, das durch die Mitarbeiterfluktuation zusätzlich erhöht wird (Boehm, 2006). Für den in dieser Arbeit untersuchten Wissenstransfer und die Skalierung des vorhandenen

Wissens in der Organisation ist jedoch die Kodifizierung des Wissens zwingend erforderlich (Hansen, et al., 1999); (Bogner & Bansal, 2007). Dies resultiert in einem Spannungsfeld zwischen agilem Wissensmanagement mittels kommuniziertem implizitem Wissen auf der einen und gesteuertem Wissensmanagement mittels dokumentiertem Wissen auf der anderen Seite (Boehm, 2006). Der hier vorgeschlagene Referenzprozess muss eine richtige Balance zwischen Agilität und Standardisierung herstellen.

Auf Basis der Identifikation dieses vielversprechenden Ansatzes wird nachfolgend die Methode zur Gestaltung und Nutzung eines Referenzprozesses in der agilen hybriden Methodik weiterentwickelt.

5.3.1 Entwicklung eines Referenzplanungsprozesses als Lösungshilfe für das projektübergreifende Wissensmanagement

Durch den Einsatz eines Referenzplanungsprozesses sollen die Strukturierung und Standardisierung des Prozesses sowie der verwendeten Methoden gefördert werden (Offergelt, et al., 2024). Der Prozess soll den Aufbau, die Speicherung und den Transfer von methoden- und prozessbezogenem Wissen fördern und geografisch verteilte Teams unterstützen (Lipnack & Stamps, 2000); (Preußig, 2024). Nachfolgend wird der Referenzplanungsprozess für die agile Prozessplanung vorgestellt. Es werden zunächst die Struktur des Prozesses und seine Eigenschaften beschrieben. Anschließend wird die Methode zur Generierung und Nutzung des Referenzplanungsprozesses vorgestellt.

5.3.1.1 Modellierung der Referenzprozessstruktur auf Basis der Meilensteine im PEP

Die Modellierung des Referenzprozesses erfolgt auf Basis einer hierarchischen Struktur. Der Referenzprozess bildet den gesamten Prozess vom Start bis zur Übergabe an den Kunden ab. Es wird zunächst diese Hierarchiestruktur vorgestellt und anschließend die Struktur des Referenzprozesses abgeleitet. Es ergeben sich insgesamt fünf Hierarchieebenen, die nachfolgend beschrieben werden.

Analyse der Hierarchiestruktur des APP-Prozesses

Auf oberster Ebene des Prozessmodells (Hierarchieebene 1) wird der gesamte Geschäftsprozess grobgranular abgebildet. Diese Ebene gibt einen Überblick über den vollständigen Prozess von Prozessstart bis -ende. Auf der darunterliegenden Ebene (Hierarchieebene 2) werden Subprozesse abgebildet. Diese Subprozesse umfassen große zusammenhängende Teile des gesamten Geschäftsprozesses und strukturieren diesen. Die Subprozesse sind aus einzelnen Sprints (Prozessiterationen) aufgebaut (Hierarchieebene 3). Innerhalb jedes Sprints existiert eine Menge von Planungsumfängen (Prozessschritte)

(Hierarchieebene 4). Jeder Planungsumfang ist dabei als ein eigenständiges Aufgabenpaket zu verstehen. Abschließend können Planungsumfänge in einzelne Planungsaufgaben (Vorgänge) gegliedert werden (Hierarchieebene 5). Jede Planungsaufgabe stellt eine stark abgegrenzte atomare Tätigkeit dar, die sich nicht weiter untergliedern lässt.

Die Ausgestaltung der Hierarchieebenen kann nach dem Top-down- oder Bottom-up-Ansatz erfolgen. Für die Modellierung eines Soll-Zustandes ist der Top-down-Ansatz zu bevorzugen (Hirzel, 2005). Dieser rückt das ganzheitliche Verständnis des Prozesses in den Vordergrund und findet daher nachfolgend Anwendung.

Für die Modellierung des Referenzprozesses ist die Berücksichtigung der verwendeten Datenstruktur im Prozess notwendig, da sie den Rahmen für die Speicherung des prozessbezogenen Wissens bildet. Weiter wird die Datenstruktur in die Hierarchiestruktur des PEPs eingegliedert. Die Datenstruktur entspricht einem Baum und enthält auf oberster Ebene die Checklisten für jeden Meilenstein des PEPs (vgl. Abbildung 5-3).

An jeden Meilenstein ist eine Checkliste geknüpft, die definiert, welche Planungsergebnisse bis zum Meilenstein fertiggestellt sein müssen. Die Checkliste ist dabei das führende Medium für die Prozessbeteiligten, da sie die zu erbringenden Ergebnisse einer PEP-Phase eindeutig definiert. Jeder Eintrag der Checkliste wird als ein Checklistenpunkt bezeichnet. Für die Abarbeitung eines Checklistenpunkts kann die Bearbeitung mehrerer Themengebiete notwendig sein. Somit gliedert sich jeder Checklistenpunkt in ein oder mehrere Themen. Diese werden innerhalb der APP in einem Sprint bearbeitet. Für die Bearbeitung eines Themas ist die Abarbeitung eines Planungsumfanges oder mehrerer Planungsumfänge notwendig. Die Planungsumfänge sind auf der untersten Ebene des Baumes in atomare Planungsaufgaben gegliedert.

Modellierung der Hierarchiestruktur des Referenzprozesses

Für die Modellierung des Referenzprozesses wird eine angepasste Prozessstruktur vorgeschlagen. Der Referenzprozess unterscheidet zwischen einem langfristigen und einem kurzfristigen Zeithorizont. Diese Abgrenzung wird nachfolgend als taktische und operative Ebene bezeichnet.

Die taktische Ebene definiert den Referenzprozess grobgranular. Diese Ebene umfasst aus Datensicht die Meilensteine und Checklistenpunkte des PEPs. Der Prozess ist auf dieser Ebene stark abstrahiert und für alle Entwicklungsprojekte einer Organisation einheitlich. Viele entwickelnde Unternehmen nutzen einen für ihre Bedürfnisse optimierten PEP, der die für sie maßgeblichen Meilensteine und Checklistenpunkte enthält. Letztere sind unternehmensweit definiert und finden übergreifend in allen Entwicklungsprojekten

Anwendung. Auf dieser Ebene können projekt- bzw. produktspezifische Prozesscharakteristika nur unzureichend abgebildet werden, da der Abstrahierungsgrad zu hoch ist. Es wird daher eine untergeordnete operative Prozessebene eingeführt.

Die operative Ebene beschreibt den Prozessablauf detaillierter und enthält projekt- bzw. produktspezifische Informationen über den Prozess. Aus Datensicht sind in dieser Ebene die Themen und Planungsumfänge enthalten. Die Planungsthemen können je nach zu entwickelndem Produkt bzw. zu entwickelnder Produktkomponente unterschiedlich sein. Es ist daher keine projektübergreifende Standardisierung möglich. Da Unternehmen jedoch häufig mehr als einen Produkttyp bzw. verschiedene Produktkomponenten entwickeln, ist die Einführung dieser operativen Ebene zielführend. Diese Ebene ermöglicht es, prozessbezogenes Wissen für die Entwicklung des jeweiligen Produkttyps bzw. der jeweiligen Produktkomponente zu dokumentieren. Die Strukturierung nach Produktkomponenten orientiert sich an der Struktur der Methodik zur Investitionsermittlung von Produktionssystemen nach Schuba et al. (vgl. (Schuba, et al., 2013)).

Eine Berücksichtigung atomarer Planungsaufgaben ist im Rahmen des Referenzprozesses nicht vorgesehen. Planungsaufgaben enthalten spezifische Informationen über die konkrete Ausführung eines Teils eines Planungsumfangs und sind individuell sowie projektabhängig gestaltet.

Es ergibt sich insgesamt ein dynamisches Prozessmodell auf Basis einer zweigeteilten hierarchischen Struktur des Referenzprozesses (vgl. Abbildung 5-4). Auf taktischer Ebene ist ein produktübergreifend standardisierter und unternehmensweit einheitlicher Prozess definiert, der die Struktur der Prozessplanung mit Meilensteinen und Checklisten grob definiert.

Dieser Prozess wird auf der darunterliegenden operativen Ebene je nach Produkt bzw. Produktkomponente individuell ausgestaltet. Hierdurch ergibt sich ein höherer Detaillierungsgrad des Referenzprozesses, der für die Planung des jeweiligen Produkts angepasst ist. Der höhere Detaillierungsgrad und die Anpassung des Prozesses an das zu planende Produkt optimieren die Prozessausführung und verbessern den Umgang mit prozessspezifischem Wissen (Eccles & Johnson, 1988); (Shum, 1994). Die vorgestellte Baumstruktur ermöglicht eine eindeutige hierarchische Zuordnung nach dem Bottom-up-Prinzip.

Definition der notwendigen Daten für den Referenzprozess

Für die Ausgestaltung der vorgestellten Datenstruktur werden nachfolgend die notwendigen Daten definiert, die für eine Speicherung des prozessbezogenen Wissens notwendig sind. Diese sind je nach Hierarchieebene der Datenstruktur unterschiedlich.

Alle Datenelemente auf allen Hierarchieebenen benötigen eine Typdefinition, einen Titel sowie eine ausführliche Beschreibung der Inhalte. Zur Generierung der Baumstruktur ist eine Verknüpfung mit dem jeweils übergeordneten Element notwendig. Auf der operativen Ebene muss für jedes Thema und jeden Planungsumfang die entsprechende Produktkomponente definiert werden. Darüber hinaus kann dem Element eine besondere Priorität zugewiesen werden. Für jeden Planungsumfang sind zusätzlich die Angaben über den Bearbeitenden, ein Kommentar, das Erstellungs- und Fertigstellungsdatum, der geschätzte und tatsächliche Aufwand sowie eventuell angehängte bzw. verknüpfte Dokumente notwendig. Abschließend wird für jeden Planungsumfang der Rang im Planungskatalog dokumentiert. Diese Daten geben gemeinsam ein umfangreiches und detailliertes Wissen über den Ablauf des Prozesses wieder. Die Angabe der Priorität enthält die Information über die Wichtigkeit der Abarbeitung dieses Planungsumfangs. Der dokumentierte Bearbeitende ist als Ansprechpartner für Fragen in der Prozessausführung verfügbar. Zusätzlich verbessern Kommentare des Bearbeitenden das Verständnis über die Inhalte des Planungsumfangs. Datumsangaben und Aufwände enthalten Informationen über Dauer und Aufwand der Bearbeitung und ermöglichen eine vorausschauende Planung. Zusätzlich dienen verknüpfte Dokumente als Beispiellösung des Planungsumfangs und reduzieren damit den Aufwand für die erneute Abarbeitung.

Durch die vorgestellte Struktur ist eine Generierung des Referenzprozesses innerhalb des agilen Prozesses möglich. Die Methode orientiert sich am Wissenstransferprozess und umfasst einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess zur Steigerung der Qualität des Referenzplanungsprozesses.

5.3.1.2 Generierung des Referenzprozesses im agilen Vorgehen

Die Initiierung des Wissenstransfers stellt den ersten der drei Prozessschritte im Wissenstransferprozess dar. Sie gliedert sich innerhalb des agilen Prozesses in einen Subprozess mit sechs Prozessschritten.

Die Grundlage für die Generierung des Referenzplanungsprozesses ist die Definition des PEPs mit seinen Phasen und Meilensteinen. Aufgrund der taktischen Ausrichtung dieser Prozessebene sind die Phasen und Meilensteine produktunabhängig, sodass sie im Unternehmen wiederverwendbar sind. Dieser Prozessschritt (Schritt 1) ist insbesondere dann notwendig, wenn im Unternehmen zuvor kein PEP definiert wurde. Ist bereits eine PEP-Struktur vorhanden, kann diese nach einer Überprüfung der Passgenauigkeit auf das aktuelle Planungsprojekt angewendet werden.

Nachdem die Struktur des Stage-Gate-Prozesses definiert wurde, sind Checklisten für jeden Meilenstein zu erstellen (Schritt 2). Jede Checkliste gibt an, welche Ergebnisse bis zum entsprechenden Meilenstein fertigzustellen sind. Die geforderten Ergebnisse sind produktunabhängig und damit wiederverwendbar zu formulieren.

Diese Prozessschritte sind einmalig zu Projektbeginn auszuführen, um die Grobstruktur des Planungsprozesses festzulegen. Die nachfolgenden Prozessschritte werden im Rahmen des agilen Prozesses iterativ, d. h. mit jedem Sprint ausgeführt.

Wird er jedoch erfolgreich abgenommen, so überprüft das Team den Planungsumfang im Review auf Wiederverwendbarkeit im Rahmen des Referenzprozesses (Schritt 3). Hierzu muss zunächst überprüft werden, ob der Planungsumfang den INVEST-Kriterien genügt. Zusätzlich wird kontrolliert, ob die Zusammenfassung und Beschreibung des Planungsumfangs inhaltlich aussagekräftig sind. Weiter wird überprüft, ob der Planungsumfang, falls nötig, mit einem aussagekräftigen Kommentar des Bearbeiters versehen ist und ob relevante Dokumente verknüpft wurden.

Ist die Überprüfung bzw. Nachbearbeitung des Planungsumfangs abgeschlossen, folgt eine Kontrolle des tatsächlich aufgewendeten Arbeitsaufwands für die Bearbeitung (Schritt 4). Dabei ist zu diskutieren, ob der exakte geschätzte Arbeitsaufwand dem tatsächlichen Aufwand entspricht. Das Teammitglied, das diesen Planungsumfang fertiggestellt hat, kann hierzu die notwendigen Informationen bereitstellen. Sollte eine Abweichung festgestellt werden, so ist der tatsächliche Aufwand in Planungspunkten im Planungsumfang zu dokumentieren. Der tatsächliche Aufwand umfasst den gesamten Aufwand für die Abarbeitung eines Planungsumfangs über alle Iterationen hinweg, sofern für die Abarbeitung mehrere Iterationen notwendig waren.

Darauffolgend werden die Inhalte und die Syntax der in den Planungsumfängen und in den Themen hinterlegten Daten überprüft (Schritt 5). Hierbei ist sicherzustellen, dass alle geforderten Daten vollständig und korrekt ausgefüllt sind.

Im letzten Prozessschritt werden die für die Übertragung in den Referenzplanungsprozess festgelegten Planungsumfänge und Themen auf Konsistenz mit dem bereits existierenden Referenzprozess überprüft (Schritt 6). Hierbei können Inkonsistenzen aufgedeckt werden, die beispielsweise durch Duplikate oder sich inhaltlich überschneidende Planungsumfänge entstehen können. Die Inkonsistenz muss durch Löschung des Duplikats oder die Integration mehrerer Planungsumfänge zu einem einzelnen behoben werden. Die Überprüfung der Syntax und Konsistenz ist ein essenzieller Schritt für die strukturierte Speicherung der Daten, ohne die eine fehlerfreie Wiederverwendung nicht möglich ist.

Nach Beendigung dieses Prozessschrittes können die abgeschlossenen Planungsumfänge und Themen in den Referenzprozess aufgenommen werden. Dieser Prozess wiederholt sich iterativ mit jedem Planungszyklus. Somit stehen direkt nach Abschluss des Planungszyklus die aktuellsten Informationen im Referenzplanungsprozess zur Verfügung und können von anderen Projektteams genutzt werden. Für die Prozessausführung ist der Pro-

zessmanager verantwortlich. Er moderiert das Review jedes Planungszyklus und ist aufgrund seiner Rolle als Methodenspezialist für die Einhaltung und Weiterentwicklung des agilen Prozesses zuständig. Das Planungsteam und der Produktmanager unterstützen ihn durch das Einbringen ihrer Fachkenntnis und ihrer Erfahrungen aus dem operativen Prozess. Das Planungsteam ist darüber hinaus dafür verantwortlich, dass die abgearbeiteten Planungsumfänge mit detaillierten Beschreibungen, hilfreichen Kommentaren und verknüpften Dokumenten versehen werden. Diese Definition der Verantwortlichkeiten mit einer zentralen Instanz in Form des APP-Spezialisten ist essenziell für das erfolgreiche Wissensmanagement (Shin, 2000).

5.4 Predictive Development

Der Begriff Predictive Development ist in der aktuellen Literatur noch nicht etabliert, weshalb er in dieser Arbeit erstmals eingeführt und das zugrunde liegende Konzept im Folgenden detailliert erläutert wird. Übersetzt bedeutet ‚Predictive‘ so viel wie voraussagend, vorausschauend oder prophetisch. Dieser Begriff wurde bewusst gewählt, da er das Konzept am besten beschreibt und die Idee einer zukunftsgerichteten, proaktiven Herangehensweise in der Produktentwicklung widerspiegelt. Predictive Development steht für eine Weiterentwicklung traditioneller Entwicklungsansätze, bei der datenbasierte Prognosen, KI-gestützte Modelle und simulative Verfahren genutzt werden, um bereits im Vorfeld fundierte Entscheidungen über Produktdesign, Anpassungen und Optimierungen zu treffen.

Im Wesentlichen stellt Predictive Development eine Erweiterung und Neugestaltung der klassischen Produktentwicklung dar, indem zukünftige Anforderungen und Marktbedürfnisse antizipiert und in den Entwicklungsprozess integriert werden. Dabei lassen sich vier zentrale Formen der Konstruktion unterscheiden:

- *Neukonstruktion*: Die Entwicklung eines völlig neuen Produkts von Grund auf, bei der sämtliche Prozesse und Komponenten neugestaltet werden.
- *Anpassungskonstruktion*: Hierbei handelt es sich um die Optimierung oder Modifikation bestehender Produkte, um sie an neue Anforderungen oder Technologien anzupassen.
- *Variantenkonstruktion*: Diese Form umfasst die Schaffung von Produktvarianten auf Basis bestehender Produkte, um eine breitere Marktabdeckung oder spezifische Kundenanforderungen zu bedienen.

- *Bestehende Konstruktionen anpassen/erweitern:* Dies bezieht sich auf die Weiterentwicklung bestehender Produkte durch ergänzende Funktionen oder technologische Erweiterungen, um den Lebenszyklus eines Produkts zu verlängern und dessen Marktwert zu steigern.

Predictive Development nutzt fortschrittliche Datenanalysen, maschinelles Lernen und Simulationen, um frühzeitig potenzielle Herausforderungen und Chancen zu erkennen, was die Effizienz des gesamten Produktentwicklungsprozesses erheblich steigert. So können Risiken minimiert, Entwicklungszeiten verkürzt und gleichzeitig die Innovationskraft erhöht werden.

Kernidee ist die voraussehbare und vorhersehbare Modellierung eines Produkts in naher Zukunft basierend auf Erkenntnissen der Produktnutzung und des Kundenfeedbacks. Das Predictive Development erstreckt sich über den Produktentwicklungsprozess hinaus und deckt den gesamten Produktlebenszyklus ab, es ist in dieser Hinsicht aber von Predictive Maintenance abzugrenzen, die sich mit der Überwachung und dem Service des Produkts beim Nutzer auseinandersetzt. Dieser Erkenntnisprozess soll nicht zu Beginn oder am Ende des Entwicklungsprozesses bzw. in zeitlich festgelegten Abständen stattfinden, sondern in Echtzeit. Das Predictive Development soll als strategische Entscheidungsgrundlage dienen, um zu bestimmen, wann ein Produkt am Markt etabliert werden soll. Darüber hinaus soll festgelegt werden, in welchem Entwicklungszustand sowie mit welchen Funktionen oder Eigenschaften ein Produkt, das sich bereits auf dem Markt oder beim Nutzer befindet, weiterentwickelt und nachgerüstet werden sollte. Der Kunde und Nutzer hat dadurch großen Einfluss auf den Produktlebenszyklus. Das Produkt kann auf diese Weise nachträglich für eine gewisse Käufergruppe weiter individualisiert werden. Es ist daher als eine strategische Methode anzusehen und dient als systematisches Vorgehen zum Produktentwicklungsprozess-Monitoring. Die Systematik lässt sich nicht allein in den Produktentwicklungsprozess integrieren, sondern bildet eine Schnittstelle zu einem gesonderten Unternehmensbereich. Wie dieser aussehen könnte, sei an dieser Stelle freigestellt, aufgrund seiner hohen IT-unterstützenden Anforderungen lässt er sich allerdings eher im IT-Bereich eines Unternehmens ansiedeln. Nur eine vollvernetzte Unternehmensumgebung und die Nutzung eines cyber-physischen Produkts ermöglichen die Nutzung dieser Methodik. Die Basis für dieses Vorgehen bilden das Internet of Things und die Nutzung von cyber-physischen Systemen sowie eine hochflexible Produktionsumgebung des Unternehmens.

In der Vergangenheit lag der Fokus auf der Auslieferung eines Produkts, das zum Zeitpunkt der Markteinführung als fertig entwickelt galt. Im Weiteren konzentriert sich der Service auf Updates oder Wartung des Produkts. Das Predictive Development geht von der Prämisse aus, dass ein Produkt niemals technisch ausgereift ist. Aus diesem Grund findet eine gezielte Weiterentwicklung des Produkts nach Markteinführung statt. Es ist

erst möglich, ein Produkt auf den Markt zu bringen, dass gewisse Quality-Gates passiert hat. Diese sind zu Beginn des Produktentstehungsprozesses festzulegen. Von den Quality-Gates sollte unter gewissen Umständen im weiteren Entstehungsprozess nicht abgewichen werden, es sei denn, besondere unternehmerische Risiken machen dies notwendig. Sobald ein gewisses Quality-Gate erreicht wurde, wird anhand der Informationen über die Nutzung einer bereits existierenden Produktversion PV_{n-1} und durch Beobachtung der Wettbewerber über die Markteinführung der neuen Produktversion PV_{n+1} entschieden. Ziel ist es, den Wettbewerbern in dieser Form zuvorzukommen und das Produkt zum richtigen Zeitpunkt auf dem Markt zu integrieren. Anhand der Kategorisierung (vgl. Abschnitt 5.4.1) werden zukünftige Funktionen und Eigenschaften festgelegt, über die der Kunde erst zu einem späteren Zeitpunkt in seinem Produkt verfügt. Das Produkt reift in dieser Form beim Kunden aus.

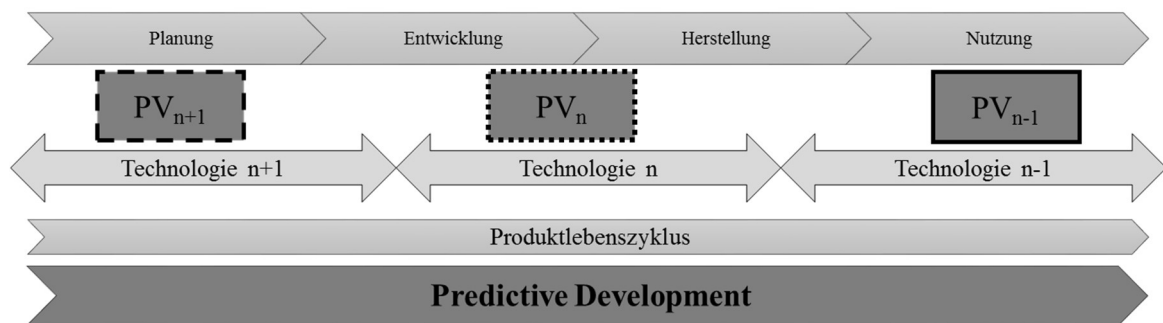


Abbildung 5-7: Einordnung des Predictive Developments

Das Predictive Development kann theoretisch als technologieunabhängig betrachtet werden. Für elektronische oder elektrotechnische Komponenten, die direkt dem Endverbraucher geliefert werden, ist diese Methodik einfacher anzuwenden. Als Zulieferer, u. a. von rein mechanischen Komponenten, kann sich die Integration eines cyber-physischen Systems, das für den Daten- und Informationsfluss zuständig ist, als aufwendig herausstellen. Dies ist unternehmerisch abzuwägen. Das Predictive Development ist an gesetzliche Rahmenbedingungen des jeweiligen Landes gebunden, dies betrifft den Verbraucherschutz wie auch den gesetzlichen Datenschutz. Bei einem Produkt, das international vertrieben wird, ergibt sich so ein inhomogener Daten- und Informationsfluss, was bei der späteren Analyse und Auswertung berücksichtigt werden muss.

Das Predictive Development ist nicht darauf fokussiert, nur dem Unternehmen einen Mehrwert zu bieten, sondern es findet eine Interaktion zwischen Nutzer oder Kunden (E2E oder B2B) und dem Unternehmen statt. Das Unternehmen bietet dem Kunden zusätzlich Funktionen und Leistungen im Tausch gegen z. B. Informationen und Daten an. Auf welcher Basis dieses Geschäft stattfindet, d. h., ob er beispielsweise entgeltlich oder kostenfrei ist, hängt vom jeweiligen Geschäftsmodell des Unternehmens ab. Dies betrifft

auch die Funktionen und Eigenschaften, die das Produkt charakterisieren. Es ist dem Unternehmen und dem Kunden überlassen, auf welcher vertraglichen Basis sie ihre Beziehung definieren.

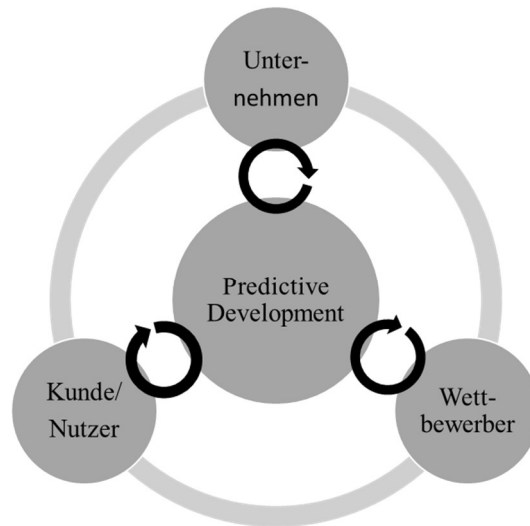


Abbildung 5-8: Interaktion in der Produktentwicklung

Das Predictive Development kann als Resultat des sich schnell verändernden Marktes angesehen werden. Kennzeichnend sind die kurzen Technologielebenszyklen, die dem längeren Produktlebenszyklus entgegenstehen und ein Bedürfnis beim Kunden erzeugen, ständig über die neusten technologischen Innovationen zu verfügen (vgl. Kapitel 2). Die zunehmende Digitalisierung, bei der Produkte einen hohen Elektronik- und Softwareanteil aufweisen, kann ebenfalls als Einflussfaktor angesehen werden.

In Abbildung 5-8 sind die Hauptakteure innerhalb dieses Prozesses dargestellt. Die Interaktion von Kunden bzw. den Nutzern, Wettbewerbern und dem eigenen Unternehmen bildet die Systematik hinter dem Predictive Development. Die IT-gestützte Analyse des Verhaltens dieser drei Beteiligten und die daraus resultierende unterstützte Entscheidungsfindung sind Aufgabe des Predictive Developments im Produktentstehungsprozess.

An dieser Stelle sollen Grundsätze aufgestellt werden, die dieser Methodik zugrunde liegen. Diese stellen entweder eine Voraussetzung oder einen verbindlichen Orientierungsrahmen im Kontext der Anwendung dar. Im Folgenden sind zu nennen:

- Virtualisierung
- Vernetzung

- Vorhandensein
- Echtzeit
- Entscheidungsorientiert

Die Virtualisierung bzw. in diesem Kontext auch die Digitalisierung bilden die wesentliche Basis des Predictive Developments. Eine vollumfängliche Virtualisierung aller Prozesse und Information des Unternehmens sowie die Realisierung des Produktentstehungsprozesses mittels der virtuellen Produktentwicklung bilden die Grundlage, um das virtuelle Produkt mit allen notwendigen Prozessen zu koppeln.

Eine Vernetzung über das eigene Unternehmen hinaus mit dem bereits ausgelieferten cyber-physischen Produkt auf Basis des Internet of Things bildet das Rahmengerüst. Das Produkt CPP ist dabei nahezu dauerhaft mit der IT-Infrastruktur des Unternehmens gekoppelt oder übermittelt Informationen zu vordefinierten Zeitpunkten.

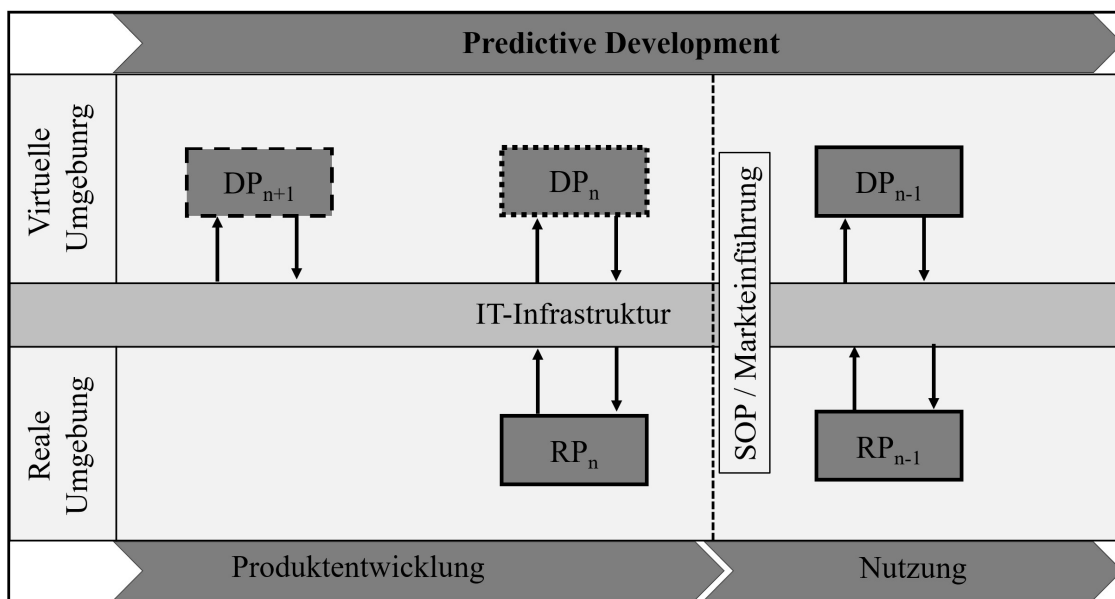


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung und Informationsfluss des Predictive Developments

Eine weitere zentrale Grundlage für die Realisierung ist das Vorhandensein einer bereits bestehenden Produktversion PV_{n-1} , die sich bereits in der Nutzung beim Kunden befindet, wie in Abbildung 5-7 dargestellt. Diese Produktversion dient als zentrale Informations- und Datenquelle für die zukünftigen Produktentwicklungsprozesse, die als die Produktversionen PV_n und PV_{n+1} realisiert werden sollen.

In Abbildung 5-9 ist eine schematische Darstellung des Predictive Developments zu sehen, bei der virtuelle Produktentwicklung, reale Prototypenentwicklung und Produktnutzung eng miteinander verknüpft sind. In der virtuellen Umgebung werden zukünftige Entwicklungsstände des digitalen Produkts DP_{n+1} mithilfe von Simulationen und digitalen Modellen frühzeitig entwickelt und bewertet. Über eine integrierte IT-Infrastruktur werden diese Erkenntnisse kontinuierlich mit realen Prototypen RP_n und dem digitalen Zwilling DP_n abgeglichen. Weitere bedeutsame Erkenntnisse werden mithilfe des Produkts beim Nutzer RP_{n-1} gewonnen. Dadurch entsteht ein iterativer Informationsfluss zwischen virtueller Produktentwicklung, realer Prototypenentwicklung und der Produktnutzung, der Entwicklungsentscheidungen frühzeitig unterstützt und den Produktentwicklungsprozess effizienter gestaltet.

Die Echtzeit, in der die zukünftige Produktentwicklung stattfinden soll, wird durch einen kontinuierlichen Informations- und Datenfluss realisiert. Die IT-Infrastruktur, die für die Verarbeitung des Informations- und Datenflusses zuständig ist, sorgt für dessen ständige Aufarbeitung und Visualisierung auf der Entscheidungsebene.

Dies führt zum nächsten Punkt, dem entscheidungsorientierten Handeln über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Hiervon sind alle Produktversionen mit deren integrierten Funktionen und Eigenschaften betroffen.

5.4.1 Kategorisierung

Kurzfristige Änderungen werden nicht durch plötzliche technologische Fortschritte verursacht, vielmehr sind diese Technologien bereits im Voraus bekannt. Die Vorentwicklung hat die Aufgabe, diese neuen Fortschritte so aufzubereiten, dass sie für zukünftige Produkte genutzt werden können. Da die Vorentwicklung unabhängig von spezifischen Produkten arbeitet, ist es häufig der Fall, dass eine neue Technologie erst dann einsatzbereit ist, wenn ein neues Produkt im Produktentwicklungsprozess (PEP) bereits weit fortgeschritten ist. Die Integration dieser technologischen Neuerungen erhöht den Reifegrad aller nachfolgenden Produkte. Um diese Neuerungen auch für Produkte zu nutzen, die sich bereits im Entstehungsprozess befinden, sollte ein Kategoriensystem eingeführt werden. Dieses System sollte die Neuerungen hinsichtlich Zeit, Kosten, Nutzen und Risiko ihrer nachträglichen Integration in das Produktkonzept bewerten. Änderungen können sowohl vor dem Produktionsstart als auch nach der Markteinführung implementiert werden. Neben der Unterscheidung zwischen vor und nach der Markteinführung ist es auch sinnvoll, zwischen Produktkomponenten und Softwarekomponenten zu differenzieren. Diese Unterteilung gibt Aufschluss darüber, ob die Stückliste des Produkts von der Änderung betroffen ist oder lediglich die Software. Dadurch entstehen vier Kategorien, die in Abbildung 5-10 dargestellt sind.

cherungen unabhängig vom Produkt durchgeführt werden. Dies eröffnet dem Produktentstehungsprozess die Möglichkeit, kurzfristige Änderungen in Bezug auf Software, Services oder Backendsysteme zu integrieren.

Kategorie 4: Aufgrund der zunehmenden Vernetzung und des einfachen sowie sicheren Zugangs zum Internet ist es beispielsweise durch Over-the-Air(OTA)-Updates möglich, Software auch nach der Markteinführung einfach zu aktualisieren oder sogar vollständig auszutauschen.

5.4.2 Predictive Hardware-Development

Nach Abschnitt 5.4.1 werden Produktkomponenten der Kategorie 1 und 2 der Hardwareentwicklung zugeordnet. Im Rahmen dieses Abschnittes werden die mechanischen und elektronischen Systeme des Produkts als Hardware definiert. Diese unterliegen aber im Rahmen des Predictive Developments anderen Voraussetzungen. Die Entwicklung beider Systeme basiert auf einem modellbasierten Vorgehen, das in Abschnitt 5.2.3 erläutert wird. Die Arbeit findet durch interdisziplinäre Entwickler parallel an einem Modell statt. Wie in Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3 unterscheiden sich die Vorgehensmerkmale der Mechanik und Elektrotechnik. Das Produktmodell muss aber in sich zwischen beiden Disziplinen abgestimmt sein. Wie dies zu bewerkstelligen ist, wird in Abschnitt 5.2.3 erläutert. Das cyber-physische System (vgl. Abschnitt 2.2.5) besteht aus einer Reihe von elektrotechnischen/elektrischen Komponenten, die in Verbindung mit der Geometrie/Topologie erweiterungsfähig aufgebaut werden müssen. Das hier beschriebene Kategoriensystem soll helfen, die Hardwarecharakteristika zu unterteilen. Die zum Markteintritt integrierten Funktionalitäten müssen durchgehend anpassbar und aufbaufähig sein, sofern die Erweiterung von Hardwarekomponenten nach Markteintritt geplant ist. Der Handlungsspielraum bei der Entwicklung ist entsprechend gering und die Kosten sind in der Regel deutlich größer als bei Softwareupdates. Aus diesem Grund sollte eine robuste Hardware verbaut werden, die zu einem späteren Zeitpunkt möglichst viel Spielraum bietet, um neu integrierte Software nutzbar zu machen. Im Rahmen der geometrischen und topologischen Gestaltung ist es notwendig, eine neue Variable einzuführen. Diese Variable soll den Gestaltungsspielraum von Hardwareanpassungen oder Änderungen nach der Markteinführung gewährleisten.

5.4.3 Predictive Software-Development

Der Gestaltungsspielraum der Softwareentwicklung ist im Rahmen des Predictive Developments deutlich größer. Wie in der Kategorisierung erläutert, kann die Software auf einfache Weise nach der Markteinführung, sofern eine Verbindung zu dem Produkt be-

steht, in Form eines Software-Updates nachgeliefert werden. Auf diese Weise ist es möglich, komplett neu entwickelte Softwareversionen auf dem Produkt zu installieren. Gestaltungsspielräume werden hier durch die Funktionen der Hardwarekomponenten begrenzt. Aus Gründen der Effizienz ist die Erweiterung der bereits vorhandenen Software in den meisten Fällen der einfachste Weg.

5.5 Generisches Bewertungsmodell

Die Entscheidung zwischen einem agilen und einem klassischen Vorgehensmodell in der Produktentwicklung ist eine zentrale Herausforderung, insbesondere bei komplexen und dynamischen Projekten. Um die richtige Methodik zu wählen, sind zwei bekannte Frameworks – die Stacey-Matrix und das Cynefin-Modell – hilfreich. Beide Modelle bieten Orientierung, um die Komplexität eines Projekts zu bewerten und basierend darauf die passende Vorgehensweise zu bestimmen.

5.5.1 Bewertung der Komplexität und Unsicherheit

Die Stacey-Matrix (siehe Abbildung 5-11), entwickelt von Ralph Stacey, untersucht die Beziehung zwischen Anforderungen (Was?) und Technologie (Wie?). Sie visualisiert die Unsicherheiten in diesen beiden Dimensionen, wodurch sich eine Entscheidungshilfe zur Auswahl zwischen agilen oder klassischen Vorgehensmodellen ableiten lässt (Stacey, 1996).

- *Einfache Projekte:* In der Stacey-Matrix fallen Projekte mit klaren Anforderungen und einer bekannten Lösungstechnologie in die Kategorie der einfachen Projekte. Hier bietet es sich an, ein klassisches Vorgehensmodell wie das Wasserfallmodell zu nutzen, da der gesamte Entwicklungsprozess vorhersehbar ist und auf festgelegten Schritten basiert (Schwaber & Sutherland, 2017). Diese Methode ist besonders geeignet, wenn Anforderungen stabil sind und die Lösung aus bewährten Methoden und Technologien besteht.
- *Komplizierte Projekte:* Bei komplizierten Projekten sind die Anforderungen klar, aber die Lösung ist ungewiss und erfordert eine detaillierte Analyse. Dies kann durch den Einsatz von Expertenwissen und iterativen Modellen wie dem V-Modell oder modellbasierter Produktentwicklung gelöst werden (Eigner & Stelzer, 2009). Hier bieten klassische Ansätze Struktur und Kontrolle, während die technologische Unsicherheit durch gezielte Planung und Simulation minimiert wird.
- *Komplexe Projekte:* Bei komplexen Projekten sind sowohl die Anforderungen als auch die technologischen Lösungen unsicher. Hier eignet sich eine agile Methodik

wie Scrum, da sie Flexibilität und Anpassungsfähigkeit fördert. In solchen Projekten entstehen neue Erkenntnisse erst während der Entwicklung und es ist notwendig, regelmäßig auf Feedback zu reagieren und den Prozess iterativ anzupassen. Diese Projekte profitieren von kurzen Entwicklungszyklen und der Möglichkeit, auf unvorhergesehene Veränderungen schnell zu reagieren (Beck, 2001).

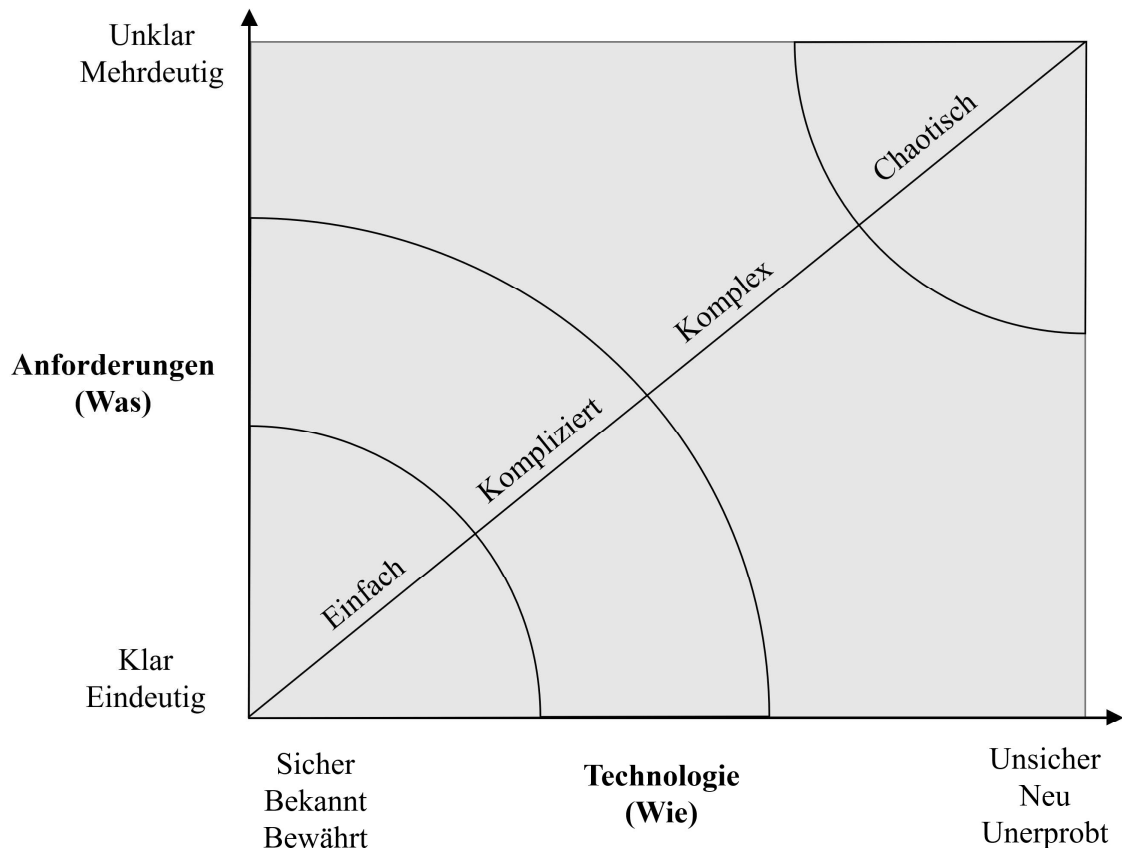


Abbildung 5-11: Stacey-Matrix nach (Goll & Hommel, 2015)

- *Chaotische Projekte:* In dieser Kategorie sind sowohl die Anforderungen als auch die Lösungen vollkommen unklar. Projekte in der chaotischen Domäne erfordern schnelle, experimentelle Ansätze. Hier kann ein agiles Vorgehen, das schnelle Prototypen, Design-Thinking und iterative Ansätze kombiniert, helfen, Struktur in die chaotische Situation zu bringen. Das Ziel besteht darin, Stabilität zu schaffen und aus dem Chaos heraus eine geordnete Struktur zu entwickeln (Schwaber & Sutherland, 2017).

5.5.2 Cynefin-Modell

Das Cynefin-Modell (siehe *Abbildung 5-12*), entwickelt von Dave Snowden, ergänzt die Stacey-Matrix, indem es den Entscheidungsprozess anhand von fünf Domänen strukturiert: klar, kompliziert, komplex, chaotisch und Unordnung. Diese Domänen helfen, die Natur eines Projekts zu bestimmen und entsprechend die richtige Herangehensweise zu wählen (Snowden & Boone, 2007).

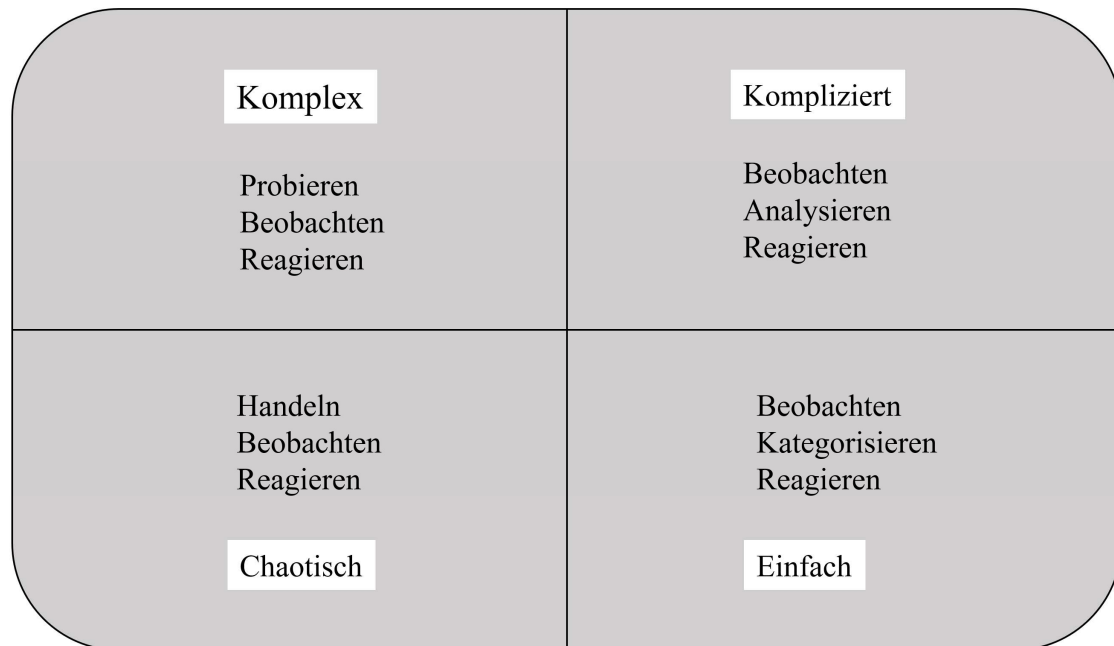


Abbildung 5-12: Cynefin-Modell nach (Lange, 2015)

- *Einfach (Obvious Domain)*: Diese Domäne beschreibt Situationen, in denen Anforderungen und Lösungen eindeutig sind. In dieser Domäne bietet ein klassisches Vorgehensmodell wie das Wasserfallmodell die richtige Struktur, da die Ursache-Wirkungs-Beziehungen bekannt sind und bewährte Prozesse verwendet werden können. Für Projekte in der klaren Domäne ist keine agile Flexibilität erforderlich, da die Anforderungen stabil und vorhersagbar sind.
- *Kompliziert (Complicated Domain)*: In der komplizierten Domäne sind die Anforderungen klar, die Lösungen aber noch nicht eindeutig. Dies erfordert die Einbindung von Expertenwissen, um eine passende Lösung zu entwickeln. Im PEP kann hier ein iteratives Vorgehen wie das V-Modell oder der Einsatz von modellbasierter Entwicklung geeignet sein, da zwischen verschiedenen Lösungsmöglichkeiten abgewogen wird und fundierte Entscheidungen getroffen werden. Die Flexibilität von agilen Methoden ist in dieser Domäne nicht zwingend erforderlich, solange genügend technologische Expertise vorhanden ist.

- *Komplex (Complex Domain)*: Projekte in dieser Domäne sind durch eine hohe Unsicherheit und Unvorhersehbarkeit gekennzeichnet. Hier bieten agile Methoden den größten Mehrwert, da der Entwicklungsprozess auf Experimenten, Feedback und Anpassungen basiert. In der Produktentwicklung ermöglicht eine agile Methodik wie Scrum, den Prozess dynamisch an sich ändernde Anforderungen anzupassen. Diese Projekte profitieren davon, dass Lösungen im Laufe der Zeit durch iterative Ansätze und fortlaufende Validierung gefunden werden (Beck, 2001).
- *Chaotisch (Chaotic Domain)*: In der chaotischen Domäne fehlen sowohl klare Anforderungen als auch eindeutige Lösungsansätze. Projekte in diesem Bereich erfordern schnelle und experimentelle Ansätze, um Struktur zu schaffen. Ein agiles Vorgehen mit starkem Fokus auf Prototyping und iterativen Zyklen ist hier am besten geeignet, um zunächst Stabilität herzustellen und dann langsam in ein strukturiertes Vorgehen zu wechseln (Snowden & Boone, 2007). In der Produktentwicklung wird in dieser Domäne oft mit schnellen Prototypen gearbeitet, um erste Erkenntnisse zu gewinnen und diese kontinuierlich zu verbessern.

5.5.3 Entscheidungsfindung – agil vs. klassisch

Die Wahl zwischen agilen und klassischen Vorgehensweisen kann durch die Anwendung der Stacey-Matrix und des Cynefin-Modells strukturiert getroffen werden:

Bei klaren Anforderungen und Lösungen (Stacey: einfach; Cynefin: klar) bietet ein klassisches Vorgehensmodell wie das Wasserfallmodell die beste Struktur, da hier Vorhersehbarkeit und Planungssicherheit gewährleistet sind.

Bei unklaren Technologien, aber klaren Anforderungen (Stacey: kompliziert; Cynefin: kompliziert), eignen sich iterative Ansätze wie das V-Modell, da Expertenwissen erforderlich ist, um die richtige Lösung zu erarbeiten.

Bei komplexen Anforderungen und unsicheren Lösungen (Stacey: komplex; Cynefin: komplex) ist ein agiles Vorgehen ideal, da es Flexibilität, schnelle Anpassungen und kontinuierliches Feedback fördert.

Bei chaotischen Projekten (Stacey: chaotisch; Cynefin: chaotisch) sollte mit agilen Methoden gearbeitet werden, die schnell auf Unsicherheiten reagieren und Experimente ermöglichen, um Klarheit zu schaffen.

Diese beiden Modelle unterstützen die Entscheidungsfindung, indem sie die Komplexität und Unsicherheit eines Projekts analysieren und dadurch eine fundierte Wahl zwischen agilen und klassischen Ansätzen ermöglichen. Ein hybrider Ansatz, bei dem agile und

klassische Methoden kombiniert werden, kann in vielen Projekten ebenfalls sinnvoll sein, insbesondere in solchen, die sowohl stabile als auch unsichere Komponenten enthalten.

5.6 Transformationsprozess

Der Übergang von einer klassischen (oft auch als Wasserfallmodell bezeichneten) zu einer agilen Methodik ist ein bedeutender Schritt für Unternehmen, um den Herausforderungen eines sich schnell ändernden Marktes besser begegnen zu können. Dieser Transformationsprozess erfordert nicht nur eine Anpassung der Arbeitsmethoden, sondern auch eine Veränderung der Unternehmenskultur, der Rollen und Verantwortlichkeiten sowie der Kommunikationswege. Der dynamische Wechsel zwischen klassischen und agilen Ansätzen setzt Flexibilität und eine klare Strategie voraus, um erfolgreich zu sein.

1. Veränderung der Unternehmenskultur

Ein zentraler Bestandteil des Transformationsprozesses ist die Anpassung der Unternehmenskultur. In einem klassischen Umfeld basiert die Arbeit oft auf detaillierten Planungen, festen Hierarchien und längerfristigen Zielen. Bei einem agilen Ansatz stehen hingegen die Flexibilität, Teamautonomie und die Fähigkeit, sich schnell an Änderungen anzupassen, im Vordergrund. Unternehmen müssen daher eine offene und transparente Kultur schaffen, in der kontinuierliches Feedback, kollaboratives Arbeiten und kurze Iterationszyklen als Norm angesehen werden (Rigby, et al., 2016).

2. Iterative Einführung agiler Methoden

Der Wechsel von klassisch zu agil erfolgt selten unmittelbar und schnell. Ein erfolgreicher Ansatz ist die schrittweise Einführung agiler Methoden, oft zunächst in einzelnen Teams oder Abteilungen. Scrum oder Kanban können zunächst in kleineren, überschaubaren Projekten getestet werden, um die Wirksamkeit der neuen Vorgehensweise zu evaluieren. Diese Pilotteams dienen als Modell für den restlichen Teil des Unternehmens, wobei sie ihre Erkenntnisse und Best Practices an andere Teams weitergeben (Schwaber & Sutherland, 2017).

3. Anpassung der Rollen und Verantwortlichkeiten

In der klassischen Produktentwicklung gibt es oft stark hierarchische Strukturen mit klar definierten Rollen wie Projektmanager, Entwickler und Tester. In einem agilen Umfeld werden diese Rollen oft neu definiert. Der Product-Owner ist für das Anforderungsmanagement zuständig, während das Entwicklungsteam selbstorganisiert arbeitet. Zudem wird die Rolle des Scrum-Masters eingeführt, der als Coach fungiert und die Einhaltung

der agilen Prinzipien sicherstellt (Beck, 2001). Unternehmen müssen also sowohl Rollen neu definieren als auch Verantwortlichkeiten dezentralisieren.

4. Dynamischer Wechsel zwischen klassisch und agil (hybrider Ansatz)

Einige Unternehmen setzen nicht ausschließlich auf eine agile Transformation, sondern verfolgen einen hybriden Ansatz, bei dem klassische und agile Methoden je nach Projektanforderungen kombiniert werden. Dies ist besonders in komplexen Projekten hilfreich, bei denen einzelne Teile gut planbar sind (klassische Ansätze), während andere Teile flexibles Vorgehen erfordern (agile Ansätze). Hier kann beispielsweise der Stage-Gate-Prozess für strategische Entscheidungen eingesetzt werden, während in der operativen Umsetzung agile Methoden wie Scrum oder Kanban angewendet werden (Rigby, et al., 2016).

5. Herausforderungen und Lösungen

Der Übergang von klassisch zu agil ist mit Herausforderungen verbunden. Widerstände gegen Veränderungen, unklare Verantwortlichkeiten und das Fehlen eines einheitlichen Verständnisses der agilen Prinzipien können zu Problemen führen. Eine kontinuierliche Schulung und Weiterbildung der Mitarbeiter sowie die Einführung eines Change-Management-Prozesses sind entscheidend, um den Wandel erfolgreich zu gestalten (Kotter, 1996). Zudem muss das Management agiles Arbeiten aktiv fördern und Vorbild für die neuen Arbeitsweisen sein.

Der Transformationsprozess von einer klassischen zu einer agilen Arbeitsweise in Unternehmen erfordert mehr als nur eine methodische Umstellung. Es geht um eine tiefgreifende Veränderung der Unternehmenskultur, der Rollenverteilung sowie der Denkweise. Durch die schrittweise Einführung agiler Methoden und die Nutzung eines hybriden Modells können Unternehmen flexibler auf Marktveränderungen reagieren und gleichzeitig die Planungssicherheit bewahren, die sie aus der klassischen Produktentwicklung kennen.

5.7 IoT-Datenmanagement

Das Internet der Dinge (IoT) beschreibt die Vernetzung von physischen Objekten, die mit Sensoren, Software und anderen Technologien ausgestattet sind, um Daten über das Internet auszutauschen und miteinander zu kommunizieren. Diese Objekte, auch als IoT-Produkte bezeichnet, können von alltäglichen Geräten wie Smart-Home-Thermostaten bis hin zu komplexen industriellen Maschinen reichen. IoT-Produkte ermöglichen eine interaktive Umgebung, in der Daten kontinuierlich erfasst, analysiert und für verschiedene Anwendungen genutzt werden können (Gubbi, et al., 2013).

IoT-Produkte sind charakterisiert durch ihre Fähigkeit, in Echtzeit Daten zu sammeln und zu verarbeiten. Mithilfe von eingebetteten Sensoren, Aktoren und Kommunikationsmodulen können IoT-Geräte nicht nur Informationen über ihre Umgebung und Nutzung sammeln, sondern auch eigenständig darauf reagieren. Beispielsweise kann ein intelligenter Thermostat die Temperatur eines Raums automatisch anpassen, basierend auf den Vorlieben des Nutzers und den aktuellen Wetterbedingungen (Satyanarayanan, 2017).

Durch die Integration von IoT-Produkten in industrielle Prozesse (Industrial IoT) oder den täglichen Gebrauch (Consumer IoT) entstehen neue Möglichkeiten, Effizienz, Wartung und Kundenerfahrungen zu verbessern. In der Industrie ermöglichen IoT-Lösungen beispielsweise vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance), indem Daten über den Zustand von Maschinen erfasst und analysiert werden, um potenzielle Ausfälle zu verhindern (Lee & Lee, 2015). Insgesamt tragen IoT-Produkte zur Digitalisierung und Automatisierung von Prozessen bei und fördern die Entwicklung smarterer, vernetzter Systeme.

Im Kontext des Internet of Things (IoT) spielen die Datenakquise und Datenverarbeitung eine zentrale Rolle. IoT-Produkte sind darauf ausgelegt, Daten aus ihrer Umgebung zu sammeln, diese zu verarbeiten und schließlich zur Analyse weiterzuleiten, um fundierte Entscheidungen oder Automatisierungen zu ermöglichen. Die präzise und effiziente Handhabung dieser Daten ist essenziell für den Erfolg von IoT-Systemen. Im Folgenden wird der Prozess der Datenerfassung und -verarbeitung in IoT-Produkten beschrieben.

1. Datenakquise (Data-Acquisition)

IoT-Produkte sind mit Sensoren, Aktoren und Kommunikationsmodulen ausgestattet, die kontinuierlich Daten über die Nutzung und den Zustand des Produkts sammeln. Diese Daten umfassen:

- *Nutzungsdaten*: Informationen über die Art und Weise, wie das Produkt verwendet wird (z. B. Betriebszeiten, Nutzungsfrequenz, Moduswechsel).
- *Umgebungsdaten*: Daten über die Umgebung, in der das Produkt eingesetzt wird (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Druck).
- *Leistungsdaten*: Echtzeitinformationen über die Funktionsfähigkeit des Produkts wie Energieverbrauch, Abnutzung von Teilen oder auftretende Fehler.

Die Erfassung erfolgt in Echtzeit, sodass die gesammelten Daten sofort für die weitere Verarbeitung verfügbar sind (Gubbi, et al., 2013).

Ein zentraler Aspekt der Datenakquise in IoT-Systemen ist die Rolle von Edge-Computing. Hierbei werden Daten vor Ort (am ‚Edge‘ des Netzwerks) gesammelt und in der Nähe des Datenquellenpunktes verarbeitet. Dies reduziert die Latenz und Bandbreite, da

nur relevante oder bereits vorverarbeitete Daten an zentrale Systeme gesendet werden müssen (Satyanarayanan, 2017).

Diese Daten werden über drahtlose Netzwerke wie Wi-Fi, Mobilfunk oder Bluetooth an eine Cloud-Infrastruktur übermittelt, wo sie in großen Mengen gespeichert und verarbeitet werden (Gubbi, et al., 2013).

2. Datenvorverarbeitung (*Data-Preprocessing*)/Datenmanagement und Analyse

Nach der Akquise werden die gesammelten Rohdaten einer Vorverarbeitung unterzogen, um sie für die nachgelagerte Analyse vorzubereiten. Dies umfasst Schritte wie:

- *Filterung*: Unnötige oder fehlerhafte Daten werden aus den Rohdaten entfernt.
- *Aggregation*: Ähnliche oder zusammenhängende Datenpunkte werden kombiniert, um die Datenmenge zu reduzieren.
- *Kompression*: Daten werden so komprimiert, dass weniger Speicherplatz benötigt und die Übertragungseffizienz gesteigert wird.

Diese Vorverarbeitungsschritte können ebenfalls im Rahmen des Edge-Computings durchgeführt werden, um die Menge der an die Cloud gesendeten Daten zu reduzieren. Dies verbessert die Effizienz des gesamten Systems, da weniger Bandbreite benötigt und die Verarbeitungslast in der Cloud verringert wird (Shi, et al., 2016).

Die in der Cloud erfassten Daten werden in einer zentralen Datenbank gesammelt und mit Technologien wie Big Data und Künstlicher Intelligenz (KI) analysiert.

Durch den Einsatz von Machine-Learning (ML) können die Daten kontinuierlich ausgewertet werden, um Muster in der Nutzung und Leistung der Produkte zu identifizieren und Rückschlüsse auf mögliche Verbesserungen zu ziehen (Lee & Lee, 2015).

3. Datenverarbeitung (*Data-Processing*) und Datenanalyse (*Data-Analytics*)

In der Datenverarbeitung und Datenanalyse werden die vorverarbeiteten Daten in der Cloud oder auf Edge-Geräten analysiert. Hier kommen fortschrittliche Technologien wie Big Data und Machine-Learning (ML) zum Einsatz, um u. a. folgende Aspekte zu betrachten:

- Anomalien zu identifizieren (z. B. unerwartete Ausfälle oder Nutzungsmuster).
- Trends in der Produktnutzung zu erkennen (z. B. häufig genutzte Funktionen oder weniger genutzte Features).
- Vorhersagemodelle zu erstellen, um Wartungsbedarf oder mögliche Produktausfälle im Voraus zu erkennen.

Je nach Anwendungsfall wird die Verarbeitung in Echtzeit (z. B. zur Steuerung von Maschinen oder Geräten) oder als Batch-Verarbeitung (z. B. für große Datensätze, die periodisch analysiert werden) durchgeführt (Khan, et al., 2012).

Ein weiterer zentraler Aspekt der Datenverarbeitung in IoT-Systemen ist die Verwendung von Algorithmen zur Erkennung von Trends und Anomalien. Hierbei werden ML-Modelle trainiert, um auf Basis historischer Daten Vorhersagen über zukünftige Ereignisse zu treffen. Ein Beispiel wäre die Vorhersage von Maschinenausfällen in industriellen IoT-Anwendungen durch Predictive Maintenance (Zhang, et al., 2018).

Die Ergebnisse der Analyse werden verwendet, um den Produktentwicklungsprozess zu verbessern, betriebliche Entscheidungen zu treffen oder die Wartungszyklen zu optimieren. Techniken wie Predictive Analytics oder Prescriptive Analytics werden eingesetzt, um prädiktive Modelle zu erstellen, die anhand der IoT-Daten zukünftige Zustände oder Ereignisse prognostizieren (Lee & Lee, 2015).

4. Fachliche Einordnung

Das Sammeln und Verarbeiten von Daten in IoT-Produkten wird oft als Teil einer IoT-Datenpipeline beschrieben. Diese umfasst alle Schritte von der Datenerfassung bis zur Analyse und Visualisierung der Daten. Technologien wie Edge-Computing, Big Data und Machine-Learning spielen eine zentrale Rolle bei der Verarbeitung und Analyse der großen Datenmengen, die von IoT-Systemen erzeugt werden. Durch diese Methoden können IoT-Systeme nicht nur in Echtzeit reagieren, sondern auch langfristige Optimierungen und Verbesserungen ermöglichen.

5. Feedbackschleife in den Produktentwicklungsprozess (PEP)

Die gesammelten und analysierten Daten aus den IoT-Produkten fließen nun in den Produktentwicklungsprozess ein, indem sie eine kontinuierliche Feedbackschleife bilden. Dieser Prozess wird in mehreren Schritten umgesetzt:

- *Anforderungsdefinition und -anpassung:* Die aus der Analyse gewonnenen Erkenntnisse über die Produktnutzung und -leistung werden verwendet, um die Anforderungen für zukünftige Produktversionen oder neue Produktentwicklungen anzupassen. Beispielsweise können häufig genutzte Funktionen weiter optimiert und wenig genutzte Funktionen entfernt oder überarbeitet werden.
- *Prototypenentwicklung und Simulation:* Basierend auf den neuen Anforderungen werden digitale Modelle und Prototypen erstellt. Simulationen mit den realen Nutzungsdaten der IoT-Produkte helfen, die Performance und Lebensdauer des neuen Produkts zu bewerten, bevor es in die Fertigung geht (Eigner & Stelzer, 2009).

- *Iterative Produktverbesserung*: Durch die kontinuierliche Sammlung und Analyse von Daten aus im Feld befindlichen IoT-Produkten werden laufend neue Erkenntnisse gewonnen, die in den Entwicklungsprozess einfließen. Dies ermöglicht eine iterative Weiterentwicklung und kontinuierliche Verbesserung des Produkts, basierend auf realen Daten.
- *Predictive Maintenance und Optimierung*: Die im Entwicklungsprozess integrierten Daten können auch zur vorausschauenden Wartung (Predictive Maintenance) genutzt werden. Hierdurch kann die Wartungsplanung basierend auf dem tatsächlichen Zustand des Produkts optimiert werden, wodurch unnötige Ausfälle vermieden werden und die Lebensdauer verlängert wird (Lee & Lee, 2015).

6. Nutzung eines PLM-Systems zur Integration

Ein Product-Lifecycle-Management(PLM)-System dient als Plattform zur Integration der gesammelten IoT-Daten in den gesamten Entwicklungsprozess. Dieses System stellt sicher, dass alle relevanten Daten von den Sensordaten bis hin zu den Analysen für die verschiedenen Teams (z. B. Ingenieure, Designer, Qualitätskontrolle) zugänglich sind. Hierdurch werden die Rückverfolgbarkeit und Konsistenz der Entwicklungsdaten gewährleistet, während die Zusammenarbeit zwischen den Abteilungen verbessert wird (Eigner & Stelzer, 2009).

Vorteile des Konzepts

- *Verbesserte Produktqualität*: Durch die Einbindung realer Nutzungsdaten können Produkte besser auf die Bedürfnisse der Benutzer abgestimmt und deren Qualität kontinuierlich verbessert werden.
- *Reduzierte Entwicklungszeiten*: Echtzeitdaten aus IoT-Produkten bieten Einblicke, die es den Entwicklern ermöglichen, schneller auf Fehler zu reagieren und Lösungen effizienter zu implementieren.
- *Optimierte Wartung und Produktlebensdauer*: Die Verwendung von IoT-Daten zur Optimierung der Wartungspläne verlängert die Lebensdauer des Produkts und minimiert Ausfallzeiten.

Das Sammeln und Integrieren von Daten aus IoT-Produkten in den Produktentwicklungsprozess ermöglichen eine datengetriebene Entwicklung. Dieses Konzept führt zu einer dynamischeren und effizienteren Produktentwicklung, da Produkte kontinuierlich auf Grundlage von realen Nutzungsdaten verbessert werden können. Die Kombination von Big Data, KI und modernen Entwicklungsplattformen schafft eine zukunftsorientierte Grundlage für den gesamten PEP.

6 Anwendung und Bewertung der Methodik

6.1 Einführung

Um Kapitel 6 „Anwendung und Bewertung der Methodik“ einzuleiten, ist es notwendig, die Verbindung zu den vorherigen Kapiteln herzustellen, in denen die Methodik theoretisch entwickelt und verfeinert wurde. Dieses Kapitel stellt den Übergang von der theoretischen Grundlage zur praktischen Anwendung dar. Dabei wird bewertet, wie gut sich die entwickelte Methodik in der Praxis bewährt.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde ein neuer hybrider Ansatz für agile und modellbasierte Produktentwicklungsprozesse vorgestellt, der traditionelle Ingenieurpraktiken mit modernen digitalen Methoden – insbesondere aus dem Bereich des virtuellen Engineerings und des agilen Managements – kombiniert. Die hybride Methodik soll die Komplexität und den interdisziplinären Charakter der heutigen Produktentwicklung adressieren, indem sie Mechanik, Elektronik und Softwareentwicklung integriert.

In Kapitel 6 wird diese entwickelte Methodik anhand eines praktischen Beispiels angewendet, um zu demonstrieren, wie sie in (realen) wissenschaftlich-industriellen Projekten genutzt werden kann. Der Fokus liegt auf der Überprüfung, ob der entwickelte Ansatz den in den vorherigen Kapiteln definierten Anforderungen und Kriterien entspricht. Dabei wird die Struktur der Methodik einschließlich des Anforderungsmanagements und der Integration der virtuellen Produktentwicklung in diesen Szenarien getestet.

Das Kapitel beginnt mit der Beschreibung des Forschungs- und Entwicklungsprojekts, in dem die Methodik angewendet wurde. Dieses Projekt dient als Testfall, um die Praxistauglichkeit, Effizienz und Skalierbarkeit der Methodik zu validieren. Es wird untersucht, wie sich die Integration von digitalen Werkzeugen, agilen Methoden und modellbasierten Prozessen auf die Time-to-Market, die Produktqualität und die interdisziplinäre Zusammenarbeit auswirkt.

Im Anschluss an die Analyse wird eine Bewertung vorgenommen, wie gut die Methodik mit den in den vorherigen Kapiteln definierten Zielen übereinstimmt. Besonderes Augenmerk liegt auf ihrer Anwendbarkeit in komplexen, interdisziplinären Umgebungen wie der Entwicklung von mechanischen und elektronischen Systemen sowie darauf, ob die Techniken der virtuellen Produktentwicklung einschließlich Simulationen und digitalen Zwillingen zum Projekterfolg beigetragen haben.

Diese praktische Untersuchung stellt eine Brücke zwischen den theorielastigen Kapiteln, die ihr vorausgingen, und der abschließenden Bewertung sowie den Schlussfolgerungen dar, die folgen werden. So wird eine umfassende Analyse der praktischen Anwendung der entwickelten Methodik gewährleistet.

6.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der bisherigen Arbeit wurde eine umfassende Methodik zur Unterstützung und Optimierung von Prozessen in der Produktentwicklung entwickelt und vorgestellt. In diesem Kapitel wird der Fokus auf die praktische Anwendung dieser Methodik gelegt, die in realen Szenarien erprobt und bewertet wird. Ein zentrales Beispiel ist die Herausforderung der Dekontamination von Rohrleitungen, insbesondere in kerntechnischen und petrochemischen Anlagen, wo sich radioaktive Ablagerungen bilden. Diese Anwendung unterstreicht die Verbindung zwischen der theoretischen Entwicklung der Methodik und deren praktischer Relevanz.

Natürlich vorkommende radioaktive Stoffe (NORM – Naturally Occurring Radioactive Materials) kommen in tiefen Gesteinsformationen vor und können bei der Gewinnung von Rohstoffen freigesetzt werden (Gelermann, et al., 2003). In der Petroindustrie und bei kerntechnischen Anlagen sammeln sich während der Nutzung radioaktive Ablagerungen an den Innenwänden von Rohren, was erhebliche Dekontaminationsprobleme mit sich bringt. Der Rückbau von Wasserrohrleitungen in kerntechnischen Anlagen oder kontaminierte Rohre in der Petroindustrie stellt daher eine erhebliche Herausforderung dar (Reichelt, 2004).

Traditionelle Dekontaminationsmethoden wie das Strahlverfahren sind oft ineffizient und erzeugen zusätzliche Probleme wie z. B. die Entstehung von hochgradig kontaminiertem Sekundärabfall, der wiederum aufwendig konditioniert werden muss (Ambos, et al., 2012). Im Vorprojekt „Neue Verfahrenstechnik zur Dekontamination und Probennahme in kontaminierten Rohrleitungen mittels Vibrationstechnik“ wurde bereits ein innovatives Vibrationsverfahren der Firma Wacker Neuson erprobt. Dieses Verfahren verspricht eine effizientere und umweltfreundlichere Dekontamination von Rohrleitungen, indem es die Strahlenbelastung der beteiligten Mitarbeiter und die Entstehung von Sekundärabfall reduziert (Ambos, et al., 2012).

In diesem Kapitel wird das Ziel verfolgt, das neue Vibrationsverfahren anhand eines interaktiven Simulationsmodells zu qualifizieren und zu bewerten. Durch die Anwendung der in den vorigen Kapiteln entwickelten Methodik sollen die Einflussfaktoren – wie Prozessparameter, Ablagerungsarten und Werkzeugparameter – genauer untersucht und op-

timiert werden. Dabei wird die Simulationsunterstützung genutzt, um den Dekontaminationsprozess zu modellieren und zu simulieren, was kostspielige und strahlenexponierte physische Tests ersetzt oder reduziert (Ambos, et al., 2012).

Das Ziel dieses Kapitels ist es somit, die entwickelte Methodik in einem realen Anwendungsfall zu testen, um deren Praxistauglichkeit zu demonstrieren und mögliche Optimierungen zu identifizieren. Die Erkenntnisse aus dem Vorprojekt (Ambos, et al., 2012) und die in den vorherigen Kapiteln entwickelten theoretischen Ansätze zur interaktiven virtuellen Produktentwicklung werden in diesem Kapitel weitergeführt, um eine effiziente Lösung für die Rohrdekontamination zu entwickeln.

6.3 Kurzvorstellung SimViDekont Forschungsprojekt

Das Projekt „SimViDekont“ (Simulation von Vibrationsverfahren zur Dekontamination) wurde im Zeitraum von 2012 bis 2015 durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit einem Budget von etwa 875.000 Euro gefördert. Das Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Qualifizierung eines innovativen Vibrationsverfahrens, das zur Dekontamination von kontaminierten Rohrleitungen in der Kerntechnik sowie in der Erdöl- und Erdgasindustrie eingesetzt wird.

Das Projekt adressiert die spezifischen Herausforderungen herkömmlicher Dekontaminationsverfahren, die aufgrund von schlechten Zugänglichkeiten und beengten Raumverhältnissen ineffizient sind und zusätzlichen Sekundärabfall erzeugen. Im Gegensatz dazu ermöglicht das neue Vibrationsverfahren eine mechanische Dekontamination mit geringer Entstehung von Sekundärabfall, was einen erheblichen Vorteil darstellt, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie Kernkraftwerken.

Das Simulationsmodell ermöglichte die Nachbildung und Untersuchung komplexer physikalischer Prozesse während der Vibration, ohne dass aufwändige physische Versuche nötig waren. Es berücksichtigte eine Vielzahl von Einflussfaktoren wie Rohrgeometrie, Ablagerungsmaterial und Werkzeugparameter. Dadurch konnten die Prozessparameter optimiert und die Effizienz des Verfahrens gesteigert werden. Ein wesentlicher Vorteil der simulationsgestützten Vorgehensweise war die Reduktion der Entwicklungszeit und Kosten sowie die Möglichkeit, schwer zugängliche Bereiche der Rohre realitätsnah zu simulieren und zu untersuchen.

Die entwickelte Simulation erlaubte es außerdem, frühzeitig Fehler zu erkennen und das Verfahren virtuell vorzuqualifizieren, bevor es in der Praxis eingesetzt wurde. Dank der Flexibilität des Simulationsmodells kann es für verschiedene Anlagen durch einfache An-

passung der Eingabeparameter wiederverwendet werden. Dies macht das Projekt zu einem bedeutenden Schritt in Richtung einer effizienteren und umweltfreundlicheren Dekontamination von Rohrleitungen in sicherheitsrelevanten Industrien.

6.4 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Voraussetzungen geschaffen, unter denen das Vorhaben zur Qualifizierung des neuen Rohrdekontaminationsverfahrens durchgeführt werden konnte. Während das prinzipielle Funktionieren des Verfahrens bereits im Vorprojekt erfolgreich nachgewiesen wurde, stand die vollständige Verfahrensqualifizierung noch aus. Diese sollte in einem zeitlich überschaubaren Rahmen erfolgen und durch moderne Simulationstechniken unterstützt werden, die in der Lage sind, komplexe Prozesse und Verfahren virtuell und unter realitätsnahen Bedingungen abzubilden. Der Einsatz eines Simulationsmodells bietet den Vorteil, dass komplexe Einflussfaktoren berücksichtigt werden können, ohne dabei die Risiken und Einschränkungen einer realen Vor-Ort-Situation in Kauf nehmen zu müssen. Zudem ermöglicht das Modell eine zielgerichtete Visualisierung von Prozessen, Größen und Objekten, die sonst schwer zugänglich oder sichtbar wären.

Das Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI) deckt in diesem Vorhaben die Kompetenzen im Bereich der virtuellen Produktentwicklung und der angewandten Methoden ab. Gemeinsam mit der sat. Kerntechnik GmbH, die als Praxispartner fungiert, werden bereits vorhandene Erfahrungen mit der Dekontamination von Rohrleitungen in die Entwicklung des neuen Verfahrens einbezogen. In Abbildung 6-1 sind die unterschiedlichen Aufgabengebiete der Projektpartner dargestellt, die eine optimale Verzahnung von Theorie und Praxis ermöglichen.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele der simulationsbasierten Analyse des Vibrationsverfahrens zur Dekontamination von Rohrleitungen umfassen:

- die durchgängige simulationsbasierte Unterstützung des Dekontaminationsprozesses in Rohrleitungen
- die Einbeziehung aller relevanten Einflussfaktoren und Randbedingungen in das Simulationsmodell
- die Auslegung und Dimensionierung des bestehenden Werkzeugprototypen für verschiedene Anwendungsfälle
- die Ermittlung der Verfahrensgrenzen bei unterschiedlichen Kombinationen von Einflussfaktoren

- die Validierung des Simulationsmodells in allen Entwicklungsphasen anhand der Messdaten des Versuchsstands
- die Verbesserung des Dekontaminationsverfahrens und der Werkzeuge basierend auf Simulationsergebnissen
- eine Simulation als Ersatz für Versuche vor Ort, bei denen das Personal einer Gefahr durch Radioaktivität ausgesetzt wäre
- eine nutzergerechte Prozessdarstellung zur besseren und frühzeitigen Planung von Dekontaminationsvorhaben

KIT	Institutspartner	Industriepartner
Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb	sat. Kerntechnik GmbH
Projektkoordination, simulative Untersuchung, Dokumentation	Werkstattversuche	Ermitteln der realen Kennwerte von kontaminierten Proben

Tabelle 6-1: Kooperationsmodell

Diese Aspekte verdeutlichen, dass durch die simulationsgestützte Vorgehensweise eine erhebliche Effizienzsteigerung im Dekontaminationsprozess erreicht wird, während gleichzeitig Sicherheitsrisiken minimiert und Kosten gesenkt werden.

6.5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens zur Qualifizierung des neuen Rohrdekontaminationsverfahrens werden die definierten Randbedingungen und Arbeitsziele in spezifische Arbeitspakete (AP) gegliedert, wie in *Abbildung 6-2* dargestellt. Diese Arbeitspakete bestehen aus unterschiedlichen Arbeitsschritten, die jeweils spezifische Teilziele verfolgen. Die Gesamtbearbeitungsdauer beträgt drei Jahre. Dabei spielt das hybride modellbasierte Vorgehensmodell eine zentrale Rolle, insbesondere in den Arbeitspaketen zur Simulationsmodellierung und Validierung.

AP1: Koordination und Dokumentation

Das Arbeitspaket 1 umfasst die Koordination der Aufgaben innerhalb des Konsortiums sowie die Kommunikation mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Dazu gehören auch die regelmäßige Berichterstattung über den Fortschritt des Projektes sowie die Sicherstellung der Dokumentation der erzielten Ergebnisse.

AP2: Problemanalyse

Dieses Arbeitspaket befasst sich mit der Identifizierung und Analyse der relevanten Einflussfaktoren, die das Dekontaminationsverfahren beeinflussen. Diese werden durch eine zielgerichtete Analyse bestimmt und umfassen u. a. die Geometrie und Materialeigenschaften der Rohre sowie der Ablagerungen, die Kinematik und Dynamik des Werkzeugs und Umweltfaktoren (Gelermann, et al., 2006). Die Wertebereiche dieser Parameter werden entweder experimentell ermittelt oder durch Annahmen festgelegt, die kontinuierlich verfeinert werden. Ein zentraler Bestandteil ist die mathematische Prozessbeschreibung, die die physikalischen Vorgänge beim Einsatz des Vibrationsverfahrens beschreibt. Diese Beschreibung bildet die Grundlage für die sukzessive Entwicklung eines mathematischen Modells, das die mechanischen Abläufe während der Dekontamination abbildet (Ambos, et al., 2012).

AP3: Simulationsmodell

Das Arbeitspaket 3 stellt den Kern des Vorhabens dar und basiert auf einem hybriden modellbasierten Vorgehen, das in den vorigen Kapiteln als Methodik entwickelt wurde (Schuck, et al., 2015). Ziel ist die Erstellung eines umfassenden Simulationsmodells, das verschiedene Teilsimulationsmodelle integriert und auf eine Vielzahl von Anwendungsfällen angewendet werden kann.

Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge: Durch den Vergleich verschiedener Softwarelösungen (CAD, Pre- und Post-Prozessoren, FEM-, DEM- und MKS-Solver) wird die am besten geeignete Software für die Simulation ausgewählt (Eigner & Stelzer, 2009). Diese Werkzeuge werden dann zur Modellierung der mechanischen und physikalischen Prozesse verwendet, die beim Vibrationsverfahren auftreten.

Erstellung eines hybriden Simulationsmodells: Das modellbasierte Vorgehen ermöglicht die Entwicklung mehrerer Teilsimulationsmodelle, die den Rohr- und Ablagerungszustand, das Verhalten des Werkzeugs sowie die Materialeigenschaften abbilden. Diese Modelle werden mithilfe von CAD-Systemen und anderen Berechnungstools erstellt. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Parametrisierung gelegt, um eine hohe Flexibilität und Wiederverwendbarkeit des Modells sicherzustellen (Eigner & Stelzer, 2009).

Iterative Modellanpassung: Im Laufe des Projekts werden die Simulationsmodelle fortlaufend validiert und verbessert. Basierend auf experimentellen Untersuchungen und den Ergebnissen der Simulationen werden die Modelle weiterentwickelt, um möglichst realistische Vorhersagen über das Verhalten des Werkzeugs und der Ablagerungen unter verschiedenen Bedingungen zu treffen.

Validierung und Optimierung: Die Simulationsergebnisse werden kontinuierlich mit den experimentellen Untersuchungen verglichen. So kann das Simulationsmodell präzise auf

die realen Bedingungen abgestimmt und optimiert werden. Das Modell bietet eine solide Grundlage zur Vorqualifizierung des Verfahrens, bevor es in der Praxis angewendet wird (Ambos, et al., 2012); (Schuck, et al., 2015).

AP4: Nutzergerechte Schnittstellen

In diesem Arbeitspaket wird das Simulationsmodell auf die Bedürfnisse der Nutzer angepasst. Dazu gehört die nutzergerechte Parametrisierung der Simulationsmodelle, sodass die Eingabeparameter für verschiedene Anwendungsfälle flexibel und konsistent eingegeben werden können (Eigner & Stelzer, 2009). Zudem wird eine automatisierte Generierung von Simulationsmodellen implementiert, die die Benutzereingaben direkt in ein geeignetes Modell übersetzt. Die multimodale Darstellung der Simulationsergebnisse einschließlich haptischer und akustischer Signale unterstützt die intuitive Nutzung des Modells und ermöglicht eine realitätsnahe Visualisierung in Virtual Reality (Schuck, et al., 2015).

AP5: Validierung

Das validierte Simulationsmodell wird gegen Projektende auf Plausibilität und Benutzerfreundlichkeit überprüft. Hierbei werden die gewonnenen Erkenntnisse aus allen vorherigen Arbeitspaketen eingebracht, um sicherzustellen, dass das Dekontaminationsverfahren unter realen Einsatzbedingungen anwendbar ist (Schuck, et al., 2015). Dies bildet den Abschluss der Qualifizierung des Verfahrens und der Simulationswerkzeuge.

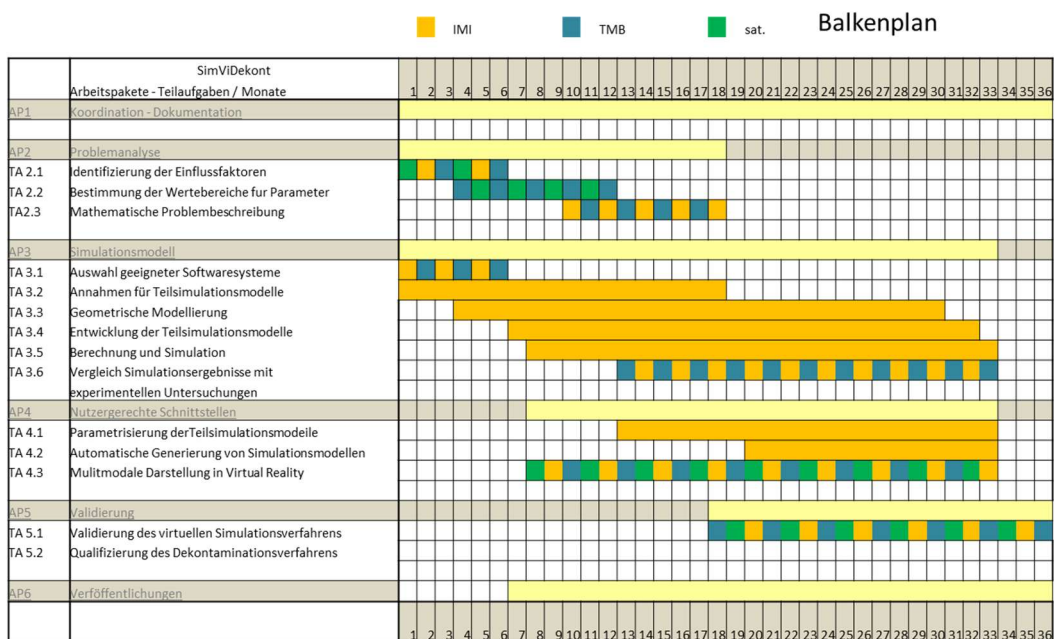


Abbildung 6-2: Balkenplan und Arbeitspakete im Projekt

AP6: Öffentlichkeitsarbeit und Verbreitung von Ergebnissen

Die Ergebnisse des Projektes wurden durch kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit verbreitet, etwa über eine Projektwebsite und auf internationalen Konferenzen. Ziel ist es, die entwickelten Methoden und Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen und die Anwendbarkeit in anderen Bereichen zu fördern.

Das dargestellte Gantt-Diagramm zeigt den zeitlichen Ablauf des Projekts, gegliedert in sechs Hauptarbeitspakete (AP1-AP6), die über einen Zeitraum von 36 Monaten ausgeführt werden. Jedes Arbeitspaket ist in mehrere Phasen unterteilt, die nacheinander ausgeführt werden. AP1 „Koordination und Dokumentation“ erstreckt sich über die gesamte Projektdauer, um die laufende Kommunikation und Berichterstattung sicherzustellen. AP2 „Problemanalyse“ startet in den ersten Monaten des Projekts und legt den Grundstein für das Verständnis der Einflussfaktoren und Parameter, die für die nachfolgenden Arbeitspakete entscheidend sind. AP3 „Simulationsmodell“ und AP4 „Nutzergerechte Schnittstellen“ beginnen nach Abschluss der Problemanalyse und bilden die Kernelemente des Projekts, da sie die Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells fokussieren. AP5 „Validierung“ beginnt im letzten Drittel des Projekts, um die Plausibilität und Anwendbarkeit der entwickelten Lösungen unter realen Bedingungen zu überprüfen. AP6 „Veröffentlichungen“ läuft über die gesamte Projektdauer, mit intensiveren Aktivitäten gegen Ende des Projekts.

Das Projekt wird hybrid geplant, wobei klassische und agile Elemente kombiniert werden, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden. Während in den frühen Phasen ein strukturierter Ansatz zur Problemanalyse und Modellierung verfolgt wird, der eine klare Planung und Nachvollziehbarkeit gewährleistet, wird in den späteren Phasen ein iteratives Vorgehen eingeführt. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an neue Erkenntnisse, insbesondere während der Simulations- und Validierungsprozesse. Die hybride Herangehensweise vereint die Vorteile beider Ansätze: eine strukturierte Planung in der Konzeptionsphase und die Agilität, um in späteren Phasen flexibel auf Änderungen reagieren zu können. Klare Meilensteine dienen dabei als Orientierungspunkte, während regelmäßige Feedback-Schleifen eine kontinuierliche Optimierung sicherstellen.

6.6 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Dieses Projekt knüpft an die Erkenntnisse des abgeschlossenen BMBF-Projekts „Neue Verfahrenstechniken zur Dekontamination und Probenahme in Rohrleitungen mittels Vibrationstechnik“ (Förderkennzeichen 02S8639) an. In jenem Projekt wurden grundlegende Methoden zur effizienten und umweltfreundlichen Rohrdekontamination ohne den Einsatz von chemischen Zusatzstoffen entwickelt. Dabei lag der Fokus auf der Nutzung

eines mechanischen Vibrationsverfahrens, das durch den Einsatz eines Werkzeugträgers Vibrationen erzeugt, die über ein angeschlossenes Bearbeitungswerkzeug auf die Rohrablagerungen übertragen werden. Die Ablagerungen werden durch hochfrequente Vibrationen von der Rohrwand gelöst und anschließend mithilfe eines Sauggerätes entfernt.

Der in jenem Projekt entwickelte Versuchsstand wurde am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des KIT aufgebaut. Dabei wurden umfangreiche Messensensoren installiert, um die während des Prozesses auftretenden Kräfte und Schwingungen präzise zu messen. Für die Versuche wurde ein modifizierter Vibrationskörper als Werkzeugträger verwendet, der zusätzliche Freiheitsgrade in der Rotation und eine variable Drehzahl der Unwuchtmasse ermöglichte. Zur Bewegung des Werkzeugträgers im Rohr wurde eine Vorschubeinheit eingesetzt, die Flexibilität und Präzision bei der Untersuchung der Dekontaminationsprozesse ermöglichte. Aufgrund der potenziellen Gefährdung durch die Originalablagerungen wurden die Abtragversuche an simulierten Ablagerungen durchgeführt, die in ihren wesentlichen Charakteristika den kontaminierten Originalen entsprachen.

Die ersten experimentellen Untersuchungen zeigten vielversprechende Ergebnisse. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Vibrationsverfahren grundsätzlich funktioniert. Insbesondere die Prozessgrößen wie die Frequenz der Vibrationen und die Vorschubgeschwindigkeit erwiesen sich als entscheidende Einflussfaktoren für die Effizienz der Dekontamination. Mit den richtigen Einstellungen gelang es, nahezu 100 % der simulierten Ablagerungen zu entfernen. Die experimentellen Daten bestätigten die Eignung des Verfahrens für den praktischen Einsatz, was auch durch die Verwendung eines hybriden Simulationsmodells weiter validiert wurde.

Im Zuge dieser Untersuchungen traten jedoch weitere Einflussfaktoren auf, die nicht nur das Werkzeug und den Prozess, sondern auch die Eigenschaften der Ablagerungen selbst betrafen. Diese Faktoren sind von zentraler Bedeutung, um eine umfassende Prozessoptimierung zu ermöglichen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde im aktuellen Projekt ein vertiefter Ansatz entwickelt, der die modellbasierten und simulationsgestützten Verfahren in den Mittelpunkt stellt. Dies ermöglicht eine präzisere Untersuchung und Optimierung des Dekontaminationsprozesses, ohne dass umfangreiche reale Tests notwendig sind, was den Aufwand, die Kosten und das Risiko für die Beteiligten erheblich reduziert.

Durch die Verbindung dieser experimentellen Ergebnisse mit den in dieser Arbeit entwickelten modellbasierten Methoden und der Nutzung hybrider Simulationsverfahren kann eine fundierte Weiterentwicklung des Vibrationsverfahrens erfolgen. Insbesondere die Parameterdefinition und -anpassung werden durch diese Methoden gestützt, wodurch eine bessere Prozesssteuerung und -anpassung an verschiedene Szenarien ermöglicht wird (Schuck, et al., 2015); (Eigner & Stelzer, 2009); (Ovtcharova, et al., 2015).

6.7 Durchführung und Anwendung des Vorgehensmodells

In diesem Abschnitt wird die praktische Durchführung des Projekts beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf der Anwendung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten modellbasierten Ansatzes liegt. Der modellbasierte Ansatz erlaubt es, die komplexen Dekontaminationsprozesse virtuell abzubilden, zu analysieren und zu optimieren. Durch den Einsatz von Simulationstechniken und die enge Verknüpfung experimenteller Daten mit Simulationsmodellen werden die kritischen Parameter der Rohrdekontamination identifiziert und iterativ verfeinert.

Die Durchführung des Projekts basiert auf der kontinuierlichen Rückkopplung zwischen experimentellen Versuchen und der modellbasierten Simulation. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine schrittweise Validierung und Optimierung des Verfahrens, während gleichzeitig die Flexibilität und Wiederverwendbarkeit der Modelle sichergestellt werden. Die Anwendung des modellbasierten Ansatzes trägt dazu bei, die Effizienz und Präzision der Rohrdekontaminationsprozesse zu verbessern, ohne dass aufwändige reale Versuche notwendig sind.

Es ist zu beachten, dass nicht alle Ergebnisse des Forschungsprojektes im Rahmen dieser Arbeit ausführlich diskutiert und wiedergegeben werden können, da dies den Umfang überschreiten würde. Bedeutsame Ergebnisse und weiterführende Analysen, die das Verständnis des Verfahrens vertiefen, sind im Anhang dieser Arbeit zusammengefasst und stehen für eine detailliertere Betrachtung zur Verfügung.

6.7.1 AP1: Koordination und Dokumentation

Zu Beginn der Akquise des Forschungsprojekts wurde ein allgemeines, klassisches Vorgehen vereinbart, das sich stark an der etablierten VDI-Richtlinie 2221 orientierte (siehe Abbildung 6-4). Diese Methodik bietet eine bewährte Grundlage für die systematische Entwicklung technischer Systeme und ist insbesondere in der frühen Phase des Projekts hilfreich, um eine strukturierte Vorgehensweise zu gewährleisten.

Da jedoch im Verlauf des Projekts immer mehr auf virtuelle Methoden zurückgegriffen wurde, stellte sich heraus, dass ein flexibleres Vorgehen erforderlich war. Insbesondere durch den intensiven Einsatz von Simulationsverfahren und die Einbindung verschiedener virtueller Modelle, die stetig angepasst und optimiert werden mussten, wurde entschieden, das klassische Vorgehen durch ein modellbasiertes, agiles Vorgehen zu ergänzen. Dies ermöglichte es, schneller auf neue Erkenntnisse zu reagieren und iterative Verbesserungen in den Simulationsmodellen vorzunehmen, ohne den gesamten Entwicklungsprozess neu strukturieren zu müssen.

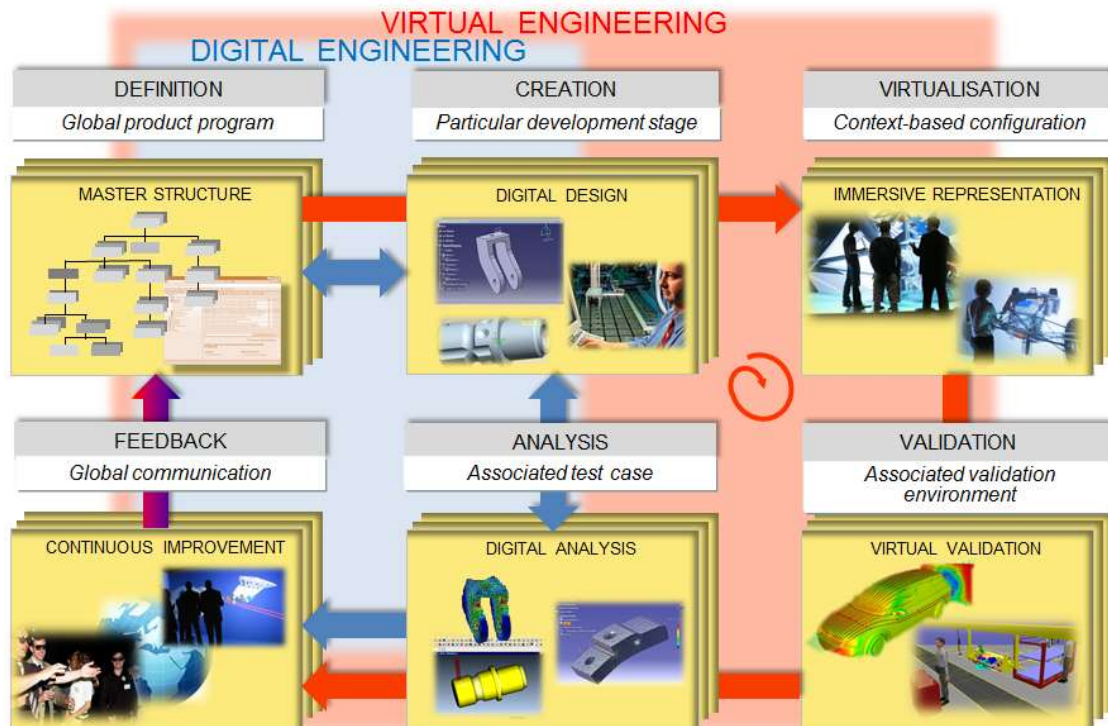


Abbildung 6-3: Prozessmodell des Virtual Engineerings (Ovtcharova J., 2005)

Das Virtual Engineering, das bereits seit einigen Jahren erfolgreich am IMI (Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen) eingesetzt wird, bot dabei den idealen Rahmen für diese iterative und flexible Arbeitsweise. Abbildung 6-4 zeigt die Methodik des Virtual Engineerings, die es erlaubt, Prozesse vollständig virtuell zu modellieren und zu simulieren. Die Einführung des modellbasierten agilen Vorgehens ermöglichte eine kontinuierliche Anpassung der Modelle an neue Bedingungen und Ergebnisse und führte zu einer optimierten Effizienz des gesamten Projekts.

Die Transformation von einem klassischen wasserfallbasierten Ansatz zu einem hybriden Vorgehensmodell wurde in einem sechsmonatigen, iterativen Prozess realisiert. Der Ausgangspunkt war eine umfassende Analyse der bestehenden Prozesse und Strukturen im Projektmanagement. Im ersten Schritt wurden die Schwächen des Wasserfallmodells identifiziert, insbesondere in Bezug auf die Flexibilität bei sich ändernden Anforderungen und die fehlende Integration interdisziplinärer Teams.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein hybrides Modell entwickelt, das die Stabilität und Planbarkeit des Wasserfallansatzes mit der Dynamik und Kundenorientierung agiler Methoden kombiniert. Dieser Übergang wurde durch eine stufenweise Implementierung erleichtert: Zunächst wurden zentrale Prinzipien agiler Methoden wie Scrum in die bestehenden Prozesse integriert, z. B. die Einführung von Sprints und regelmäßige Feedback-Schleifen. Gleichzeitig blieben strukturierte Elemente des Wasserfallmodells

wie Meilensteine und Gate-Konzepte erhalten, um die Gesamtprojektausführung zu steuern.

Innerhalb von sechs Monaten wurden alle relevanten Teammitglieder auf das neue Vorgehensmodell vorbereitet. Zudem wurde die methodische Anpassung durch eine geeignete IT-Infrastruktur unterstützt, die die virtuelle Produktentwicklung und den interdisziplinären Austausch erleichtert. In den ersten Anwendungszyklen konnte das hybride Modell seine Effizienz beweisen, indem es eine kürzere Reaktionszeit auf Kundenfeedback und eine verbesserte Synchronisation zwischen den Teams ermöglichte.

Der Projekterfolg wurde durch regelmäßige retrospektive Sitzungen sichergestellt, in denen die Methodik kontinuierlich evaluiert und weiterentwickelt wurde. Heute dient das hybride Vorgehensmodell als zentrale Steuerungsmethode, die Flexibilität, Transparenz und Effizienz im Projektmanagement vereint. Es hat sich insbesondere in komplexen, interdisziplinären Projekten als nachhaltig und anpassungsfähig erwiesen. Im mittleren Projektverlauf wurde der modellbasierte Ansatz von Eigner (Eigner, et al., 2014) mit in die Projektstruktur und Toolumgebung integriert.

6.7.1.1 Entwickeln und Konstruieren des Systems

Im Vorgängerforschungsprojekt wurden zwar die zentralen mechanischen Konstruktionsprinzipien berücksichtigt, jedoch fehlte ein methodisches Vorgehen, wie es in der Industrie üblich ist. Auf Basis der bisherigen Ergebnisse wurde deshalb das Werkzeug systematisch neu entwickelt und überprüft, um einen hohen Qualitätsstandard zu gewährleisten (Pahl, et al., 2007).

Das in der Industrie gängige methodische Vorgehen bei der Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme ist eng an allgemeine Problemlösungsprozesse angelehnt. In der VDI-Richtlinie 2221 (siehe Abbildung 6-4) wird ein systematisches Vorgehensmodell dargestellt, das als Problemlösungsstrategie für alle Lebensphasen eines Systems dient. Der erste Schritt in diesem Modell ist die Problemanalyse, bei der die Problemstellung präzise erfasst und oft durch zusätzliche Informationen ergänzt wird, um eine fundierte Grundlage für den weiteren Entwicklungsprozess zu schaffen (VDI 2221, 1993).

Da es sich bei diesem Projekt um eine virtuelle Produktentwicklung handelt, war es notwendig, das statische Vorgehensmodell der VDI 2221 anzupassen. Dies erfolgte vor allem aus zwei Gründen: Erstens handelte es sich um ein relativ kleines Entwicklerteam von ca. drei bis vier Personen und zweitens waren im Verlauf des Projekts wiederholte Änderungen der Anforderungen erforderlich. Aus diesem Grund wurde ein hybrides Vorgehensmodell gewählt, das agile Methoden integriert. Insbesondere die Scrum-Methode, bei der das Projekt in kleinere, gut strukturierte Arbeitspakete unterteilt wurde, erwies sich als effizient. Diese Methodik ermöglichte es, auf veränderte Anforderungen flexibel und schnell zu reagieren, indem einfache Modifikationen vorgenommen wurden. Dies

war insbesondere in den Arbeitspaketen mit einem hohen Anteil an Softwareentwicklung von Vorteil (Schwaber & Sutherland, 2017).

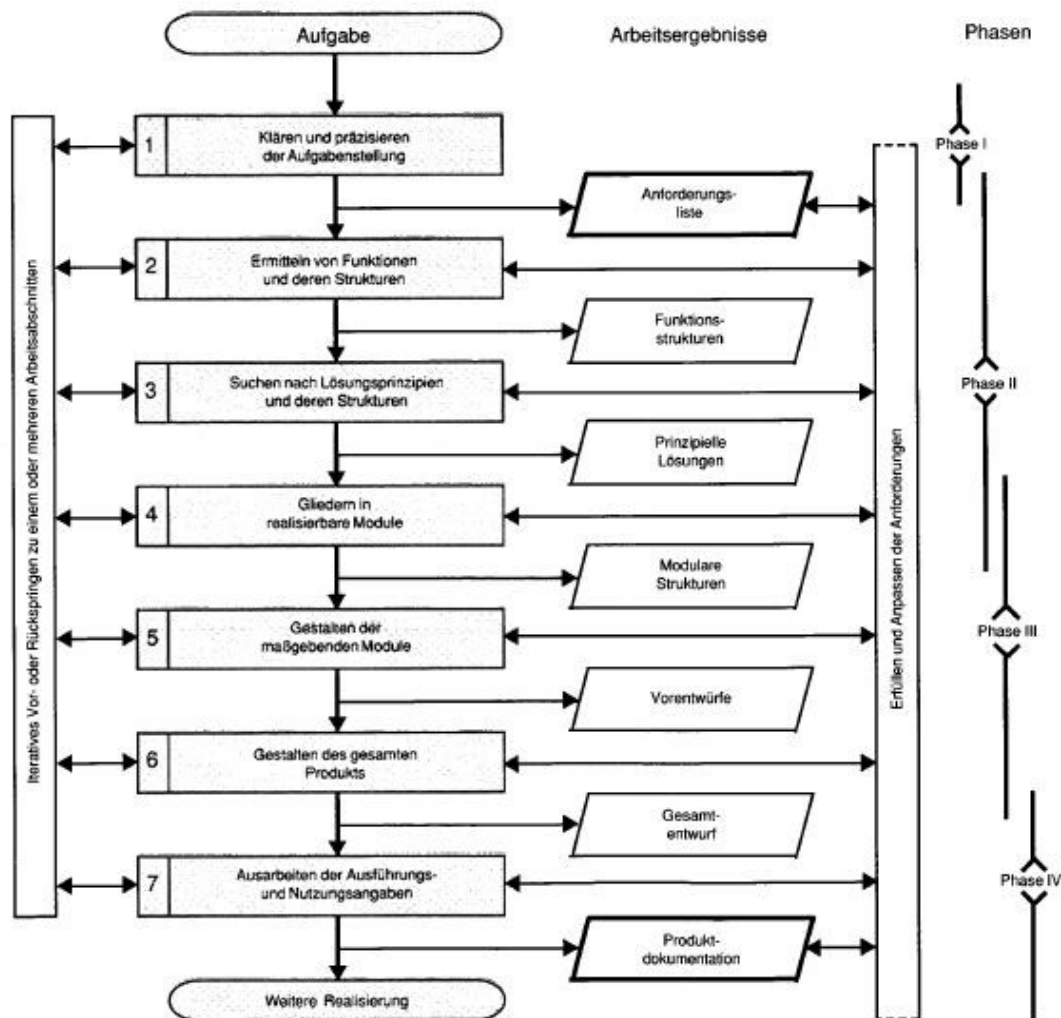


Abbildung 6-4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221, 1993)

Zusätzlich wurde das Konzept des Frontloadings in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses angewendet. Hierbei wurden gezielt Ressourcen eingesetzt, um bereits zu Beginn des Prozesses möglichst viel Wissen über das Produkt zu generieren. Dies geschah u. a. durch die Einbindung von Experten, deren Wissen und Erfahrungen maßgeblich zur Qualität des Entwicklungsprozesses beitragen (Eigner & Stelzer, 2009); (Pahl, et al., 2007).

Ein wesentlicher Aspekt dieses Projekts ist die besondere Sicherheitsproblematik im Umgang mit radioaktiv kontaminierten Materialien. Diese Sicherheitsanforderungen mussten bei den späteren Experimenten besonders berücksichtigt werden. Die hohe Sensibilität

dieses Themas machte eine sorgfältige Planung und ein durchdachtes Vorgehen unerlässlich, um die Sicherheit während des gesamten Projektverlaufs und im späteren praktischen Einsatz zu gewährleisten (Schuck, et al., 2015); (VDI 2221, 1993).

6.7.2 AP2: Problemanalyse

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets erfolgte eine detaillierte Analyse des vorhandenen Systems sowie der durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Auf dieser Grundlage wurden spezifische Anforderungsprofile für die verschiedenen Baugruppen und Bauteile erarbeitet. Diese Anforderungsprofile dienten als Basis für die Konzepterstellung zur Auslegung und Gestaltung des Werkzeugträgers, wobei die mechanischen Wirkungsmechanismen des Vibrationsverfahrens im Vordergrund standen.

Ein weiterer zentraler Aspekt dieses Arbeitspakets war die Analyse von Materialproben, um bedeutsame Erkenntnisse über Materialeigenschaften, Dicke und den Haftverbund der Ablagerungen in den Rohrleitungen zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden Materialproben entnommen und zur Analyse an die FH Aachen übergeben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Bericht „Radiochemische Untersuchungen der Ablagerungen in einem Rohr“ zusammengefasst. Es ist jedoch zu betonen, dass die chemische Zusammensetzung der Proben im Fokus der Analyse stand. Eine weitergehende Untersuchung der mechanischen Eigenschaften (wie Elastizität, Kerbschlagzähigkeit etc.) konnte aus mehreren Gründen nicht durchgeführt werden:

- Es mangelte an der erforderlichen technischen Ausrüstung, um mechanische Untersuchungen an den feinkörnigen Materialproben durchzuführen. Dies betrifft insbesondere hochpräzise Tests, die für eine genaue Bestimmung der Materialeigenschaften notwendig gewesen wären.
- Die Proben wiesen zum Teil eine deutlich oberhalb der Freigrenzen liegende radioaktive Strahlung auf. Die Handhabung dieser Proben stellte eine erhebliche Herausforderung dar, und mehrere Labore lehnten die Durchführung der notwendigen Untersuchungen aufgrund der damit verbundenen Risiken ab.

Um dennoch relevante Informationen für die weitere Entwicklung des Verfahrens zu gewinnen, wurden Ersatzablagerungen auf Zementbasis mit unterschiedlichen Härtegraden eingesetzt. Dies ermöglichte es, die wesentlichen Einflussfaktoren unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Die Variation der Technik sowie der Härtegrade der Ersatzablagerungen lieferte bedeutsame Erkenntnisse für die Optimierung des Dekontaminationsprozesses.

Die methodische Vorgehensweise bei der Analyse, insbesondere die Berücksichtigung alternativer Werkstoffe und die Anwendung virtueller Simulationen zur Ergänzung der

experimentellen Daten, ermöglichte eine fundierte Weiterentwicklung des Werkzeugträgers sowie des Gesamtverfahrens im Sinne eines modellbasierten, agilen Ansatzes. Die iterativen Anpassungen und der Einsatz von Ersatzmaterialien in den Simulationen trugen maßgeblich zur Validierung und Optimierung der Methodik bei (Schuck, et al., 2015); (Pahl, et al., 2007).

6.7.2.1 Identifizierung der Einflussfaktoren

Im Rahmen des Projekts wurde eine detaillierte Analyse der Einflussfaktoren durchgeführt, um eine fundierte Grundlage für die Entwicklung des neuen Dekontaminationsverfahrens zu schaffen. Zusätzlich zu den im Vorgängerprojekt erfassten Einflussfaktoren war es notwendig, das bisherige Werkzeug eingehend zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Eine radiochemische Analyse von Rohrproben aus der Ölförderung in Libyen (Scherer, 2013) lieferte zwar bedeutsame chemische Daten, ließ jedoch keine Rückschlüsse auf das mechanische Verhalten der Ablagerungen zu. Dies lag u. a. an der ungeeigneten Beschaffenheit der Proben, die durch unsachgemäße Handhabung während des Transports sowie unklare Witterungsbedingungen beeinträchtigt wurden.

Untersuchung der Rohrproben am Karlsruher Institut für Technologie – IAM

Um die fehlenden mechanischen Daten zu ergänzen, wurden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT-IAM) neue Rohrproben untersucht, die aus einem gasfördernden Betrieb in Deutschland stammten und den Anforderungen an die Beschaffenheit der Ablagerungen entsprachen (Schneider, et al., 2015). Diese Proben ermöglichten es, die zuvor erfassten Einflussfaktoren präziser zu untersuchen und in die Simulationen zu integrieren.

Folgende Arbeiten wurden an den Rohrproben durchgeführt:

- Aus drei Rohrproben wurden jeweils drei Kreisringe herausgeschnitten und optisch inspiziert.
- Eine der Rohrproben wurde mit Harz gefüllt, um die Neigung zu Ausbrüchen beim Schneiden zu kontrollieren.
- Metallographische Untersuchungen, Mikrohärtebestimmungen und optische Mikroskopie wurden an sieben Proben durchgeführt.
- Raster-Elektronenmikroskopische Untersuchungen und eine EDX-Elementanalyse wurden zur Bestimmung der Zusammensetzung der Ablagerungen durchgeführt.
- Die Vickers- und Martens-Härte sowie das Eindringmodul an den Proben wurden bestimmt, um das mechanische Verhalten zu charakterisieren.

Diese Analysen lieferten wertvolle Informationen zur Zusammensetzung und Struktur der Ablagerungen und zeigten, dass in einigen Bereichen starke Mischungen aus Korrosions- und Ablagerungsschichten auftraten. Dies führt zu einer erschwerten Ablösung der Ablagerungen, was den Prozess zeitintensiver macht und möglicherweise eine genauere Nachkontrolle erfordert.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen am KIT-IAM lieferten bedeutsame Erkenntnisse über das mechanische Verhalten der Ablagerungen. Besonders die metallurgischen Analysen zeigten, dass Korrosions- und Ablagerungsschichten oft eng miteinander verbunden sind, was die Effizienz des Ablöseprozesses beeinflusst. Zusätzlich wurden ortsabhängige Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Ablagerungen festgestellt, die Rückschlüsse auf die Belastung der Rohre während der Betriebszeit zulassen. Diese Ergebnisse flossen direkt in die Weiterentwicklung des Simulationsmodells ein und trugen wesentlich zur Optimierung des Dekontaminationsprozesses bei.

Weitere detaillierte Ergebnisse sowie zusätzliche Abbildungen und Analysen können im Anhang dieser Arbeit eingesehen werden, da der Umfang dieser Ergebnisse den Rahmen dieses Kapitels überschreiten würde.

6.7.2.2 Systemanalyse, Einsatzrandbedingungen und Aufbau des bestehenden Werkzeugträgers

In diesem Projekt wurde eine detaillierte Systemanalyse des bestehenden Werkzeugträgers durchgeführt, um seine Funktionsweise und den Aufbau zu verstehen. Diese Analyse war entscheidend für die Entwicklung des Simulationsmodells und die anschließende Konstruktion eines neuen Werkzeugträgers. Der Werkzeugträger, der in vorherigen Versuchen eingesetzt wurde, basierte auf einer modifizierten Rüttelflasche von Wacker Neuson. Durch die Integration einer flexiblen Welle und eines Gelenks war es möglich, eine zusätzliche Drehbewegung zu erzeugen, die die Abtragsleistung bei der Entfernung von Ablagerungen in Rohren erhöhte. Der bestehende Werkzeugträger bestand aus insgesamt elf Einzelteilen, die sorgfältig analysiert und dokumentiert wurden (siehe Abbildung 6-14). Diese Systemanalyse diente als Grundlage für die Optimierung der Konstruktion und die spätere Simulation.

Einsatzrandbedingungen spielten ebenfalls eine wesentliche Rolle bei der Problemanalyse. In den Versuchen wurde der Werkzeugträger genutzt, um Ablagerungen in Rohren zu entfernen. Das prinzipielle Funktionsschema des Verfahrens ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Diese Ablagerungen bestanden aus Zementstein, und der Abtragsprozess wurde durch den Einsatz eines Industriestaubsaugers zur Absaugung der abgetragenen Materialien unterstützt. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und un-

ter variierenden Bedingungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des Werkzeugträgers zu bewerten. Die gesammelten Daten halfen dabei, die relevanten Parameter für die Simulation festzulegen.

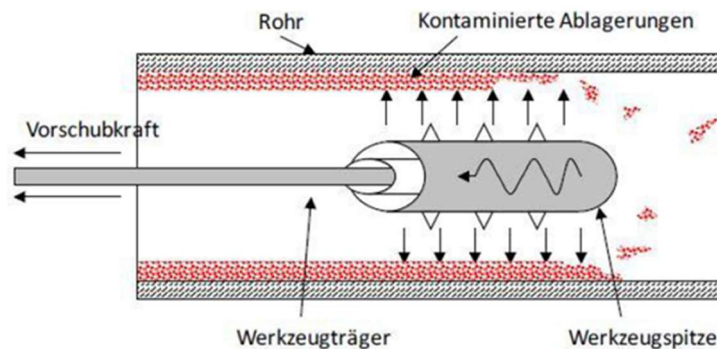


Abbildung 6-5: Funktionsschema des Verfahrens

Beim Aufbau des bestehenden Werkzeugträgers wurde besonders auf die Funktionalität und den modularen Aufbau geachtet. Die Rüttelflasche wurde durch einen Elektromotor angetrieben, der über eine flexible Welle mit dem Werkzeugträger verbunden war. Ein Gelenk ermöglichte zusätzliche Freiheitsgrade, die für eine höhere Effizienz beim Ablagern der Rohre sorgten. Die Analyse der verschiedenen Bauteile zeigte, dass durch gezielte Modifikationen am Aufbau des Werkzeugträgers eine signifikante Verbesserung der Abtragsleistung erzielt werden konnte. So wurden beispielsweise verschiedene Dichtungen und Lagerkonzepte getestet, um die mechanischen Belastungen zu verringern und die Lebensdauer des Werkzeugs zu verlängern. Eine Explosionszeichnung in im Anhang in Abbildung 7-6 zu finden.

Insgesamt stellte diese Analyse eine zentrale Grundlage für die Weiterentwicklung des Werkzeugs dar. Durch die Kombination von experimentellen Daten und Simulationen konnten sowohl mechanische als auch betriebstechnische Herausforderungen adressiert und Lösungen entwickelt werden, die in der späteren Projektphase implementiert wurden.

6.7.2.3 Bestimmung der Wertebereiche und Anforderungen

In Tabelle 7-3 (siehe Anhang) sind die relevantesten Wertebereiche der Parameter definiert, innerhalb derer der Prototyp des neuen Werkzeugträgers operieren sollte. Diese Parameter bilden die Grundlage für die weiteren Anforderungen, die in einem detaillierten Anforderungsprofil festgelegt wurden.

Das Anforderungsprofil für den neuen Werkzeugträger basiert auf den positiven Eigenschaften der Rüttelflasche H35S von Wacker Neuson. Da diese jedoch in einigen Aspekten, insbesondere bei der Rohrdekontamination, nicht ausreichte, wurden zusätzliche Anforderungen für die Neukonstruktion definiert. Bei den bisherigen Messungen zur

Abtragsleistung in Rohren vom Typ 2 7/8“ mit einem Innendurchmesser von 62 mm wurde festgestellt, dass der verbleibende Bauraum aufgrund von Ablagerungen auf etwa 55 mm reduziert war. Dieser Durchmesser durfte bei der Neukonstruktion nicht überschritten werden. Zudem sollte der Werkzeugträger nicht zu lang sein, um ein Verkanten in den Rohren zu vermeiden.

Ein weiteres Problem der bisherigen Konstruktion war die starke Erwärmung der Rüttelflasche während des Betriebs. Diese Überhitzung führte dazu, dass das Werkzeug nicht mehr angefasst werden konnte und das Material der flexiblen Welle sich verformte. Um Schäden zu vermeiden, musste das Werkzeug in kaltem Wasser gekühlt werden. Der neue Werkzeugträger sollte daher eine Überhitzung verhindern und die Betriebstemperatur unter 70 °C halten.

Ein zusätzliches Problem war das Lösen der Schraube, die das Werkzeug am Träger befestigt. Durch hohe Frequenzen konnte sich diese Schraube während des Betriebs lockern, was das Werkzeug unkontrolliert ablösen könnte und so eine Gefahr für das Personal und die Rohrleitungen darstellte. Dies sollte durch eine Verdrehsicherung im neuen Werkzeugträger verhindert werden.

Für die Fertigung des neuen Werkzeugträgers standen in der Werkstatt des Instituts nur begrenzte Möglichkeiten zur Verfügung, weshalb die Fertigung so ausgelegt wurde, dass externe Aufträge, wenn möglich, vermieden werden sollten. Die vollständige Anforderungsliste ist im Anhang Tabelle 7-4 zu finden. Sie beinhaltet Festanforderungen (F), die zwingend erfüllt werden mussten, sowie Wünsche (W), die nicht unbedingt notwendig waren, aber angestrebt wurden.

Die Unterteilung des Projekts in verschiedene Problembereiche und Baugruppen ermöglichte eine differenzierte Betrachtung und präzisere Zuordnung der jeweiligen Aufgabebereiche. Die Aufteilung erfolgte in die Bereiche Lagerungskonzept, Schmierkonzept, Kühlung, Messsensoren, Dichtung, Werkzeugaufnahme, Gehäuse sowie Schnittstellen. Basierend auf der Anforderungsliste konnten spezifische Anforderungen an die einzelnen Konzepte für Baugruppen und Bauteile abgeleitet werden.

Im Rahmen eines agilen, iterativen Entwicklungsprozesses wurden verschiedene Lösungsansätze entwickelt, um die Anforderungen und Wünsche zu erfüllen. Durch das agile Vorgehen konnten die einzelnen Konzepte kontinuierlich überprüft und weiterentwickelt werden. In regelmäßigen Sprints wurden die Ergebnisse der Simulation des Verhaltens des Werkzeugträgers evaluiert und notwendige Anpassungen vorgenommen. Auf diese Weise konnten die Bauteilabmessungen und Zielgrößen iterativ verbessert werden. Die endgültige Ausführung der erarbeiteten Konzepte wurde nach jeder Iteration basierend auf den aktuellen Simulationsergebnissen und der Optimierung der Komponenten entschieden. Dies ermöglichte eine flexible Anpassung der Entwicklung an neue Erkenntnisse und veränderte Anforderungen.

6.7.2.4 Mathematische Prozessbeschreibung

Die mathematische Problembeschreibung umfasste die Gebiete der Mehrkörpersimulation und Bruchmechanik, die gemeinsam betrachtet und später in ein Simulationsmodell integriert werden mussten. Im SimViDekont-Projekt spielte neben dem Stahl (für Rohr und Werkzeug) vor allem der Werkstoff der Ablagerungen eine zentrale Rolle, dessen Verhalten bisher wenig erforscht war. Lediglich der Brinell-Härtebereich, ermittelt im Vorprojekt, war bekannt. Da die Ablagerungen radioaktiv sind, konnten Proben nur unter strengen Auflagen entnommen und getestet werden, wobei diese Untersuchungen in Kooperation mit Unterauftragnehmern durchgeführt wurden.

Die Ermittlung der Durchbiegung des Werkzeugkopfes war zentral für das Projekt, jedoch konnte diese aufgrund der komplexen Form der Welle und ihrer Variabilität nicht analytisch gelöst werden. Die Lösung erfolgte über ein Simulationsmodell, wobei auch die Trägheitsmomente der Welle nur rechnerunterstützt berechnet werden konnten. Aus diesem Grund war die Nutzung einer Mehrkörpersystemsoftware für die Simulation unerlässlich.

6.7.3 AP3: Simulationsmodell

Um virtuelle Untersuchungen zum Verhalten des Werkzeugträgers durchzuführen, musste zunächst ein präzises virtuelles Modell entwickelt werden. Dieses Modell bildete die Grundlage für die simulationsgestützte Analyse und Optimierung. Dabei wurde die in dieser Arbeit entwickelte modellbasierte Methodik angewendet, die eine iterative Verfeinerung des Modells ermöglichte. Durch die Kombination der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten aus realen Versuchen konnten eine kontinuierliche Validierung und Verbesserung der Modellgüte gewährleistet werden.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen des realen Versuchsaufbaus war entscheidend, um Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Modells zu ziehen. Dieser iterative Abgleich der Daten, basierend auf der in der Arbeit entwickelten Methodik, erlaubte es, systematisch potenzielle Abweichungen zu identifizieren und das Modell anzupassen, sodass die daraus abgeleiteten Erkenntnisse belastbar und praxisnah waren (Pahl, et al., 2007); (Schuck, et al., 2015).

Die Anwendung dieser Methodik trug somit dazu bei, die Simulationen kontinuierlich zu verbessern und als effektives Werkzeug in der virtuellen Produktentwicklung zu etablieren.

6.7.3.1 Auswahl geeigneter CAD- und Simulations-Softwaresysteme

Im Rahmen des virtuellen und iterativen Entwicklungsprozesses wurde nach einer umfassenden Analyse verschiedener CAD-Systeme die Softwarelösung Siemens NX ausgewählt, da sie alle gestellten Anforderungen am besten erfüllte. Siemens NX bot die notwendige Flexibilität und Integration der Simulationstools, um den iterativen Entwicklungsprozess effizient zu unterstützen. Zusätzlich bestand bei Bedarf die Möglichkeit, auf alternative Systeme wie CATIA V5 und Creo Elements zurückzugreifen. Der Datenaustausch zwischen den Systemen erfolgte über neutrale Schnittstellen und standardisierte Datenformate, was eine nahtlose Integration und Weiterverarbeitung in verschiedenen Entwicklungsschritten ermöglichte.

Ein zentrales Ziel im Entwicklungsprozess war die Automatisierung des CAD/CAE-Modells. Dadurch sollten die verschiedenen Modellierungs- und Simulationsschritte effizienter gestaltet und Iterationen schneller durchgeführt werden können. Diese Automatisierung ermöglichte es, Parametervariationen und Designänderungen mit minimalem manuellem Aufwand direkt in die Modelle zu integrieren und somit den Entwicklungszyklus zu verkürzen.

Die in Siemens NX integrierten Simulationsmöglichkeiten erwiesen sich als ausreichend für die Dimensionierung der Baugruppen und die Durchführung von Mehrkörpersimulationen im Projekt SimViDekont. Dies war besonders für den iterativen Entwicklungsprozess von Bedeutung, da die Ergebnisse der Simulationen kontinuierlich mit den experimentellen Daten verglichen und zur Optimierung der Modelle herangezogen wurden.

Für die strukturmechanischen und nichtlinearen FEM-Berechnungen wurde das Programm Abaqus-CAE eingesetzt. Diese Software ermöglichte die Definition benutzerspezifischer Materialmodelle, was besonders im nichtelastischen Bereich von großer Bedeutung war. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Qualität der Netze, insbesondere in den Kontaktbereichen, war es notwendig, spezialisierte Nachbearbeitungsprogramme zu nutzen, um die Ergebnisse weiter zu optimieren.

6.7.3.2 Annahmen für die Teilsimulationsmodelle

Das Simulationsmodell musste problemorientiert in mehrere Teilsimulationsmodelle untergliedert werden. In Abbildung 6-6 ist das integrierte Simulationsmodell dargestellt. Bei der Modellbildung wurden die realen Prozesse idealisiert und nachgebildet, indem Grenzen und Vereinfachungen für die Teilmodelle festgelegt wurden. Es setzte sich im Wesentlichen aus Makro- und Mikrosimulationen zusammen. Diese Differenzierung führt zu unterschiedlichen Anforderungen der Simulationssoftware.

Im Teilgebiet der Makrosimulation wurden kinematische- und linear-elastische Eigenschaften der Baugruppe untersucht. Dies wurde im Rahmen von Mehrkörpersimulationen

und linearen FEM-Modellen durchgeführt. Mittels eines vorher durchgeführten Auswahlprozesses von Softwarelösungen konnte NX von Siemens PLM Software als geeignete Lösung ermittelt werden.

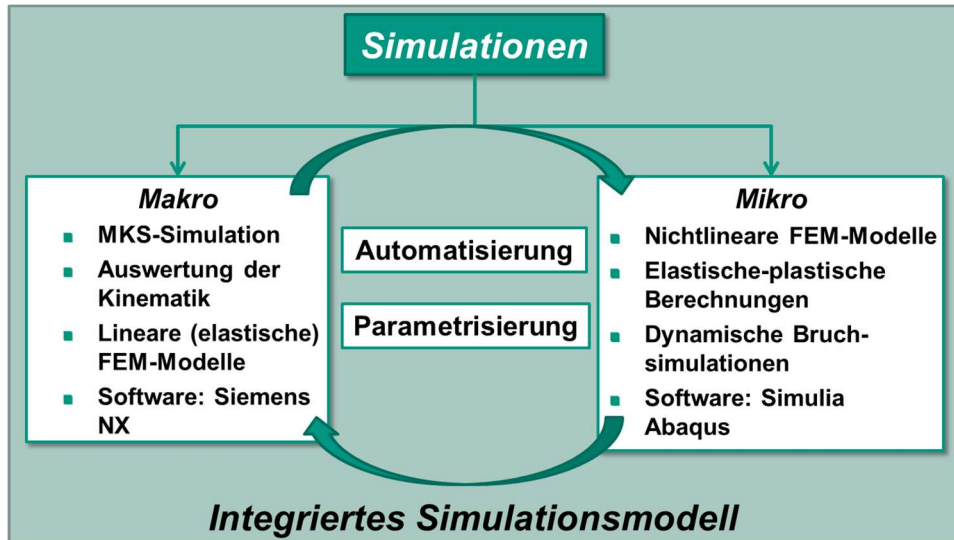


Abbildung 6-6: Integriertes Simulationsmodell

Der in Abbildung 6-6 dargestellte Bereich Makrosimulationen beinhaltet die Untersuchung weitaus komplexerer strukturmechanischer Vorgänge im Modell. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um nichtlineare elastisch-plastische Berechnungen, die im Rahmen von FEM-Analysen erfolgen sollten. Weiter mussten auch die strukturmechanischen Vorgänge der eigentlichen Ablagerungen betrachtet werden, was zu hohen Anforderungen an den FEM-Solver führte. Dieser sollte nichtlineare Berechnungen und eine gewisse Flexibilität im Bereich strukturmechanischer Modelle ermöglichen.

6.7.3.3 Virtueller Prototyp

Durch Unterstützung von Methoden und Werkzeugen im Rahmen des modelbasierten und iterativen Vorgehens war eine Möglichkeit gegeben, einen digitalen und später komplett virtuellen Prototypen (Digital Mock-Up) zu realisieren. Dies beinhaltet die Beschreibung, Modellierung, Simulation und Optimierung über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeuges. Die Prozesse unterliegen dabei aufgrund technischer Innovationen ständigen Veränderungen. Im Rahmen dieses Projekts wurde auf einen einfachen und bewährten Prozessablauf des VE zurückgegriffen, der am IMI entwickelt wurde (Ovtcharova J., 2005). Die einzelnen Schritte wurden im Rahmen dieses Projektes iterativ und modelbasiert durchlaufen. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts können die einzelnen Schritte nachvollzogen werden.

Aus dem Vorgängerprojekt ließen sich gestalterische und funktionelle Eigenschaften des Werkzeuges entnehmen, die allerdings keiner Untersuchung oder Validierung zugrunde

lagen. Das Wissen aus der vorhergehenden Analyse soll in die Neuentwicklung eines Prototyps eingebracht werden.

Digital Mock-Up (DMU)

Als Grundlage für die Simulationen dienten die in einem 3D-CAD System konstruierten Geometriemodelle einzelner Bauteile. Der parametrische Aufbau moderner CAD-Systeme ermöglichte eine wissensbasierte 3D Modellierung mit dem Ziel, durch verschiedene Modellierungstechniken wie beispielsweise Parametrik, Feature- oder Template-Erstellung das Konstruktionswissen und weitere Informationen der Baugruppe in das Modell einfließen zu lassen. Im weiteren Verlauf zur Entwicklung des DMU wurden folgende Schritte durchlaufen:

- Einsatzrandbedingungen präzisieren
- Aufbau des Gelenks
- Lagerungskonzepte
- Schmierkonzepte und Kühlung
- Integration der Messsensorik
- Dichtkonzepte der gesamten Baugruppe
- Analyse der Unwucht
- Werkzeugaufnahme
- Gehäuse und Schnittstellen
- Steuerung und Regelung
- Sensorik

Konzeptauswahl und Konstruktion des Werkzeugträgers

Aus den zuvor erarbeiteten Konzepten und Ideen wurden die geeignetsten Varianten ausgewählt, um den Werkzeugträger optimal an die definierten Anforderungen anzupassen. Der Auswahlprozess erfolgte nicht nur basierend auf Machbarkeit, sondern unterlag einem iterativen, simulativen Vorgehen. In regelmäßigen Zyklen wurden die Konzepte mithilfe von Simulationen getestet und optimiert, wobei jede Iteration wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten der Bauteile und des Gesamtsystems lieferte.

Die Simulationsergebnisse wurden kontinuierlich mit den Messdaten und der Systemanalyse abgeglichen, um potenzielle Schwachstellen frühzeitig zu identifizieren und Anpassungen vorzunehmen. Auf diese Weise konnten die Konzepte gezielt weiterentwickelt und verbessert werden, bevor sie in der Konstruktion der verschiedenen Bauteile umgesetzt wurden. Diese enge Verzahnung von Simulation, Analyse und Konstruktion erlaubte

es, die Effizienz des Entwicklungsprozesses zu steigern und gleichzeitig die Qualität des Endprodukts sicherzustellen.

Lagerungskonzept

Aufgrund des begrenzten Bauraums im Inneren des Werkzeugträgers wurde eine einfache, schwimmende Lagerung gewählt, da die axiale Position der Unwucht nicht kritisch ist und Axialbelastungen nur gering sind. Diese Lagerungsart berücksichtigt auch die zu erwartende Wärmeausdehnung.

Die Auswahl beschränkte sich auf Rillenkugellager, Zylinderrollenlager, Nadellager und Tonnenlager. Aufgrund der hohen Drehzahlen und des geringen Reibungswiderstands wurden Rillenkugellager bevorzugt. Um die Anforderungen an lange Lebensdauer und geringen Verschleiß zu erfüllen, wurden Hybrid-Rillenkugellager mit Keramikugeln eingesetzt. Diese weisen laut FAG im Vergleich zu herkömmlichen Lagern niedrigere Betriebstemperaturen und geringeren Verschleiß auf, besonders bei mangelhafter Schmierung. Die Lebensdauer steigt signifikant und es sind um mehr als 10 % höhere Drehzahlen möglich.

Auswahl der Systemgrößen

Basierend auf den Berechnungen gab es drei Möglichkeiten, die angestrebten Beschleunigungsamplituden von 884 m/s^2 am Werkzeug bei 150 Hz zu erreichen, vergleichbar mit dem Ausgangszustand bei 200 Hz (siehe Abbildung 6-7). Diese Möglichkeiten umfassten die Verlängerung der Unwucht, die Vergrößerung des Durchmessers oder eine Kombination aus beiden. Jede Änderung erforderte eine Anpassung des Gehäuses, das aus Aluminium bestand, was zu einer Beschleunigung von 600 m/s^2 führte, also einer Steigerung von 26 %.

Eine Verlängerung der Unwucht und des Gehäuses um 160 mm erhöhte die Beschleunigung auf circa 700 m/s^2 , was bei Berücksichtigung des Aluminiumgehäuses auf 880 m/s^2 anstieg. Eine Durchmessererhöhung von 4 mm führte zu einer Beschleunigung von 717 m/s^2 , was mit dem Aluminiumgehäuse auf 903 m/s^2 stieg. Die Kombination beider Maßnahmen ergab eine Beschleunigung von etwa 900 m/s^2 , allerdings mit einem Unsicherheitsfaktor. Daher wurde die Variante der reinen Durchmessererhöhung gewählt, da sie nicht nur die gewünschte Beschleunigung lieferte, sondern auch die Kühlung durch eine größere Oberfläche verbesserte.

Schmierkonzept, Kühlung und Dichtkonzept

Bei einer Fettschmierung wäre die Wärmeabfuhr nicht ausreichend, was zu einer Überhitzung führen könnte. Daher wird Öl als Schmierstoff verwendet, da es die Wärme besser ableitet. Der Werkzeugträger befindet sich bei der Dekontamination von Rohren in horizontaler Ausrichtung, wodurch das Öl mit dem Gehäuse in Kontakt kommt und die

Wärme nach außen abführt. Durch die ständige Beschleunigung und Rotation wird das Öl im Werkzeugträger optimal verteilt, was die Schmierung der Lager sicherstellt.

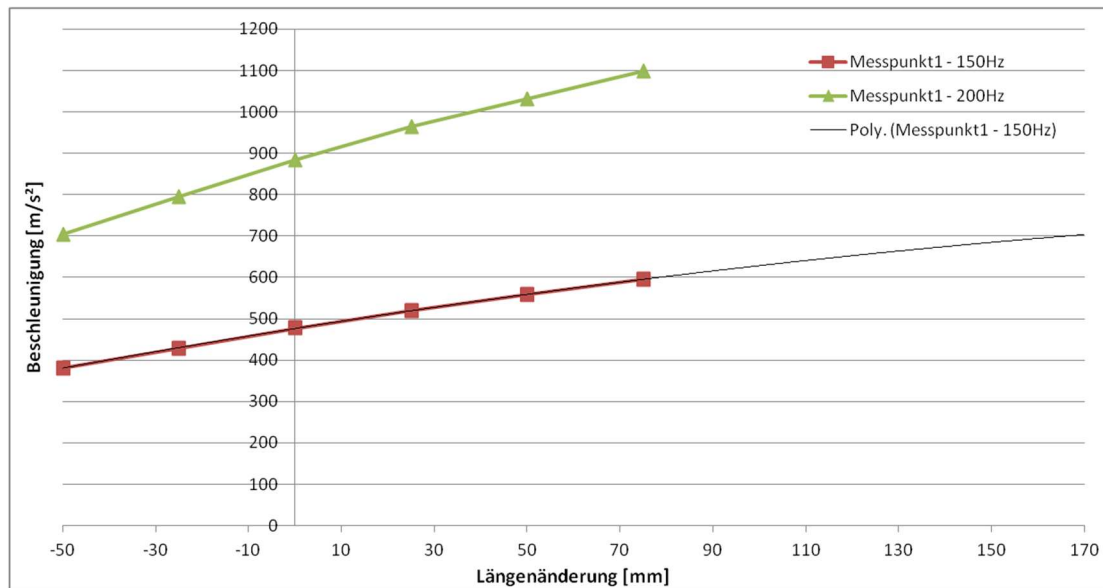


Abbildung 6-7: Beschleunigung über der gemeinsamen Längenänderung mit Trendlinie

Die Vergrößerung des Gehäusedurchmessers verbessert die Kühlung, da die größere Oberfläche die Wärme schneller abführt. Für die statische Dichtung wurden die Gewinde mit geringer Steigung ausgeführt, um die Gehäusestärke zu erhalten und Kerbwirkungen zu vermeiden. Auf O-Ringe wurde verzichtet, da alternative Dichtmethoden wie Dichtband oder Flüssigkleber mit geringem Aufwand einsetzbar sind. Bei der dynamischen Dichtung wird ein Radial-Wellendichtring der Form AS mit zusätzlicher Dichtlippe verwendet, da er für die hohe Umfangsgeschwindigkeit von 9,4 m/s bei 200 Hz besser geeignet ist als O-Ringe.

Gehäuse und Werkzeugaufnahme

Zur Sicherstellung einer effizienten Wärmeabfuhr wurde Aluminium als Gehäusematerial gewählt, da seine Wärmeleitfähigkeit mehr als viermal höher ist als die von Stahl. Dies trägt wesentlich zur verbesserten Ableitung der Wärme bei und unterstützt die Wärmeübertragung an die Umgebungsluft. Aluminium bietet einen optimalen Kompromiss zwischen Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Die Festigkeit von AlZn5,5MgCu ist vergleichbar mit unbehandeltem Stahl, während die Wärmeleitfähigkeit deutlich höher ist.

Zur Vermeidung des Aufdrehens wurde die Werkzeugaufnahme zusätzlich mit einer zentralen Schraube gesichert. Für Dauereinsätze mit einem langfristig montierten Werkzeug sollte zusätzlich ein demontierbarer Flüssigkleber wie Loctite verwendet werden, um eine zusätzliche Sicherung gegen das Lösen der Schrauben durch Vibrationen und Stöße zu gewährleisten.

Lagerauslegung

Die Lagerauslegung lässt sich in zwei Hauptbereiche unterteilen: Lebensdauerberechnung und Passungsauswahl.

Für die Lebensdauerberechnung wurde die Belastung in y-Richtung mit einer Kraft von $F_y = 2078 \text{ N}$ ermittelt. Unter Berücksichtigung von Stoßbelastungen und Vibrationen ergab sich ein Betriebsfaktor $f = 3$, was eine radiale Belastung von $F_{r1} = 6230 \text{ N}$ zur Folge hatte. Um die Belastung auf die Lager zu verteilen, wurden zwei Rillenkugellager verwendet, wodurch sich die Belastung auf $F_r = 1560 \text{ N}$ pro Lager reduzierte. Die resultierende Belastung P wurde mit 873 N berechnet. Die verwendeten Rillenkugellager vom Typ 6001 haben eine kritische Tragzahl von 5400 N , was eine Lebensdauer von $L_{10} = 23,7 \times 10^6$ bei einer Frequenz von 150 Hz ergibt. Dies entspricht einer Betriebszeit von etwa 440 Stunden . Mit der Verwendung von Hybridlagern könnte die Lebensdauer noch weiter erhöht werden. Zudem verlängert ein Betrieb bei niedrigeren Frequenzen, beispielsweise bei 125 Hz , die Lebensdauer auf über 1500 Stunden .

Bei der Passungsauswahl wurde eine lose Passung für den Innenring mit einer Toleranz von $h6$ gewählt, um eine einfache Montage zu ermöglichen. Der Außenring, der eine Umfangslast erfährt, wurde mit einer festen Übermaßpassung (Toleranz $N7$) im Gehäuse versehen, um der höheren Wärmeausdehnung des Aluminiumgehäuses gerecht zu werden.

Konstruktion der Einzelteile des Werkzeugträgers

Die Konstruktion der Einzelteile des Werkzeugträgers erfolgte nach Auswahl der besten Konzepte und unter Berücksichtigung ihrer Anforderungen. In den folgenden Abschnitten werden die zentralen Bauteile erläutert, wobei das iterative Vorgehen bei der Entwicklung eine wesentliche Rolle spielte. In Kombination mit realen Prototypen wurden mehrere Schleifen durchlaufen, um die Modelle ständig zu verfeinern und an die Anforderungen anzupassen.

Die Unwucht hat einen Außendurchmesser von 28 mm und eine Länge von 282 mm , was sie 14 mm länger macht als die der Rüttelflasche. Sie besteht aus dem legierten Vergütungsstahl $42\text{CrMo}4$, der eine Streckgrenze von 750 N/mm^2 bietet und für hohe Belastungen geeignet ist. Die Masse der Unwucht beträgt 691 g mit einer Exzentrizität von $3,39 \text{ mm}$ (im Vergleich zu $2,84 \text{ mm}$ bei der Rüttelflasche). Die Konstruktionszeichnung der Unwucht ist in Abbildung 6-8 dargestellt, während die 3D-Ansicht im Anhang zu sehen ist. Im Rahmen des iterativen Vorgehens wurden verschiedene Dimensionen und Materialien getestet, um das optimale Design zu gewährleisten. Alle Maße in technischen Zeichnungen sind, sofern nicht anders angegeben, in Millimetern angegeben.

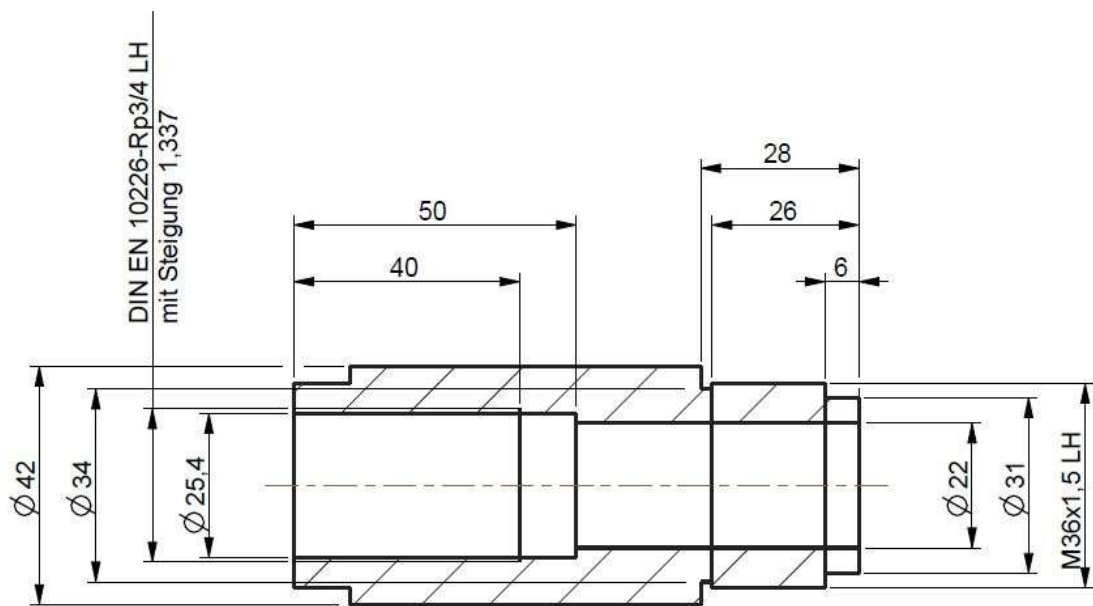


Abbildung 6-10: Konstruktionszeichnung des Adapters – Schnittansicht

Die Verschlusskappe, die das Werkzeug befestigt und den Werkzeugträger verschließt, besteht aus unlegiertem Vergütungsstahl C45E. Sie trägt zur Erhöhung der Werkzeugmasse bei und verbessert dadurch den Abtrag der Ablagerungen. Ihre Konstruktion ist in Abbildung 6-11 zu sehen und die fertige Kappe im Anhang. Die CAD-Daten zeigen ein Gewicht von 242 g. Die Anpassungen der Verschlusskappe wurden basierend auf Rückmeldungen aus den Prototypentests vorgenommen, um die Stabilität und Handhabbarkeit zu verbessern.

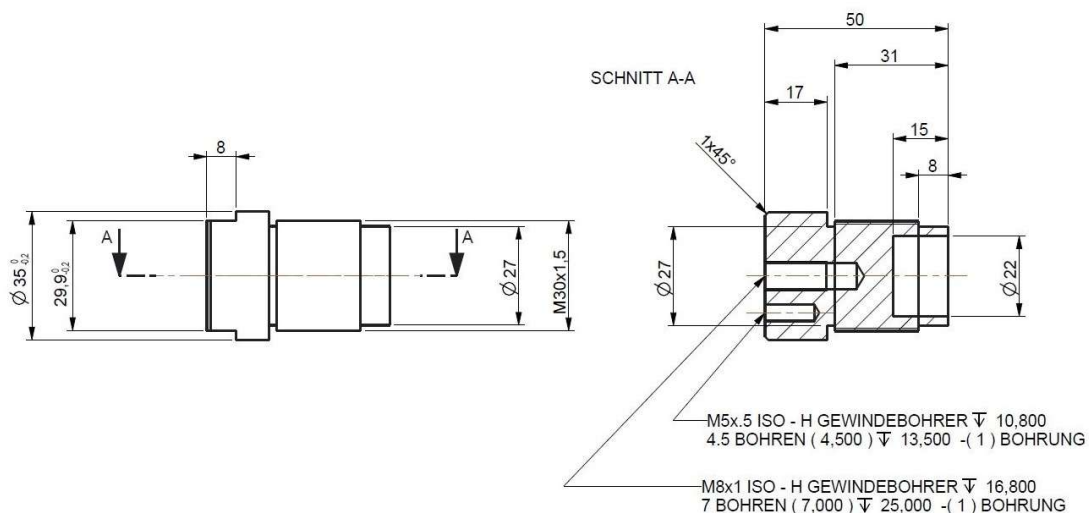


Abbildung 6-11: Konstruktionszeichnung der Verschlusskappe

Der Wellenadapter ist ein zentraler Bestandteil, der die flexible Welle aufnimmt. Er ist aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4 gefertigt, um den Belastungen gerecht zu werden. Die Konstruktionszeichnung ist in Abbildung 6-12 dargestellt und das fertige Teil ist im Anhang zu sehen. Auch hier wurden iterative Anpassungen vorgenommen, um den Adapter an die mechanischen Anforderungen anzupassen, die während der Testläufe identifiziert wurden.

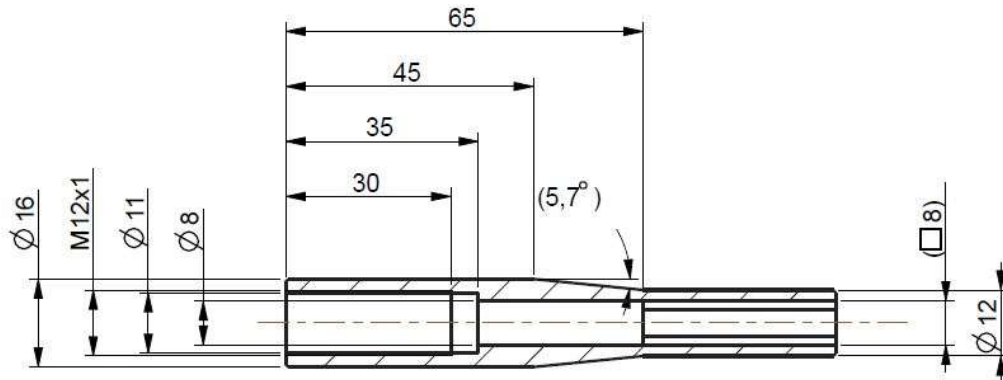


Abbildung 6-12: Konstruktionszeichnung des Wellenadapters – Schnittansicht

Es wurden Rillenkugellager vom Typ 6001 und 6002 verwendet, die von FAG bezogen wurden. Die Wellendichtringe dienen als Dichtung und verhindern das Eindringen von Schmutzpartikeln in den Werkzeugträger. Änderungen an der Dichtung wurden ebenfalls im Rahmen des iterativen Prozesses getestet und optimiert, um eine höhere Lebensdauer der Bauteile zu gewährleisten.

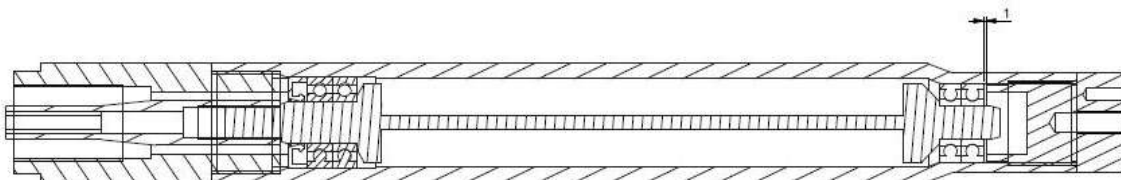


Abbildung 6-13: Zusammenbau des Werkzeugträgers im Schnitt

Der Zusammenbau (siehe Abbildung 6-13) erfolgte durch die Montage der Unwucht mit den vormontierten Lagereinheiten. Der komplette Werkzeugträger ist im Anhang dargestellt, während die Explosionszeichnung in Abbildung 6-14 zu sehen ist. Der Zusammenbau wurde wiederholt optimiert, um eine schnelle und fehlerfreie Montage im Rahmen des Prototypenbaus zu ermöglichen. Dabei spielten die Ergebnisse der Simulationen eine entscheidende Rolle für das iterative Vorgehen.

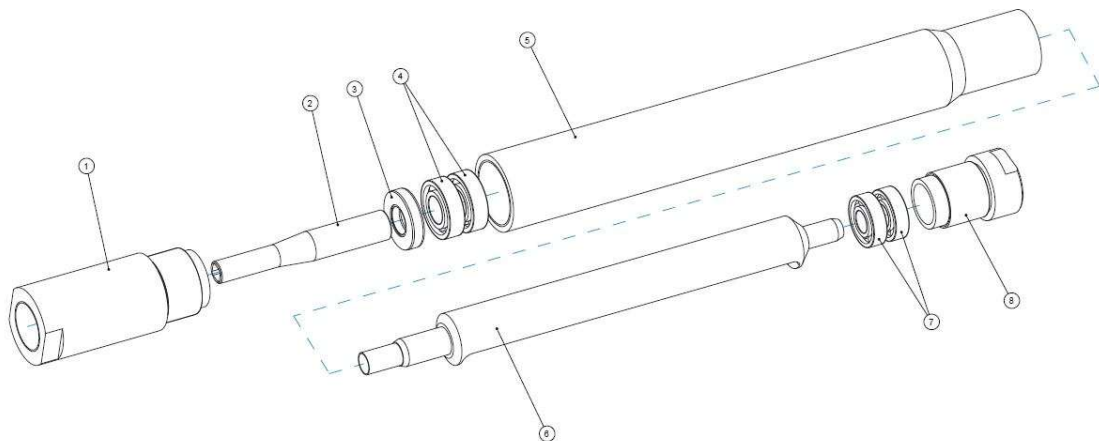


Abbildung 6-14: Explosionszeichnung des neu konstruierten Werkzeugträgers

Im Vergleich zum Vorgängerprojekt wurde eine neue halbautomatische Vorschubvorrichtung entwickelt, die das Werkzeug mit Hydraulik ins Rohr einführt und eine Rohrlänge von bis zu 5 m dekontaminieren kann (siehe Anhang). Das iterative Testen dieser Vorrichtung war essenziell, um eine stabile und effiziente Führung des Werkzeugs zu gewährleisten.

Es wurden unterschiedliche Konzepte für die Werkzeuggeometrie entwickelt, wobei sich eine einfache und kostengünstige Variante durchgesetzt hat. Auch hier wurde das Design in verschiedenen Iterationen angepasst, um die besten Ergebnisse bei der Rohrdekontamination zu erzielen.

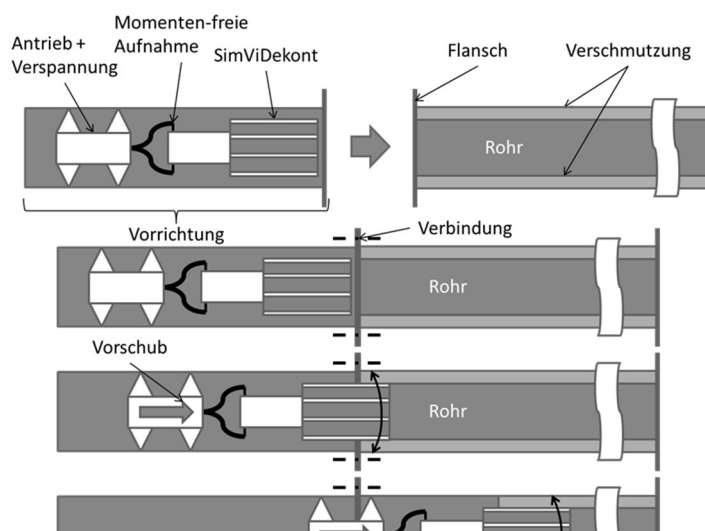


Abbildung 6-15: Konzept der Vorschubvorrichtung

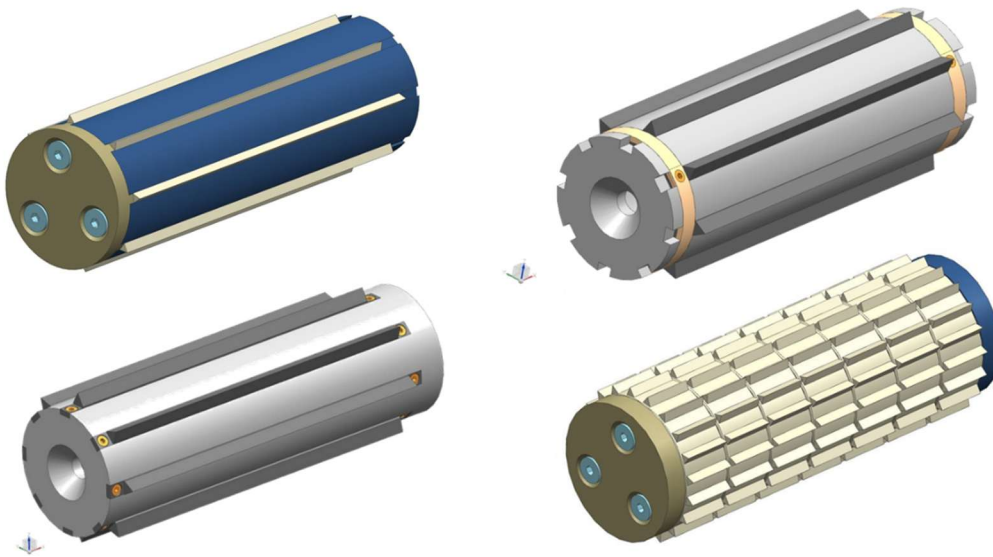


Abbildung 6-16: Unterschiedliche Konzepte der Werkzeuggeometrien

6.7.3.4 Entwicklung der Teilsimulationsmodelle

Zur virtuellen Untersuchung des Werkzeugträgers wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell aufgebaut, das den realen Versuchsaufbau abbildet. Noch nicht vorhandene Modell-daten wurden dabei neu erstellt und bereits vorhandene CAD-Daten überarbeitet. Dieser Schritt war notwendig, um das CAD-Modell auf die Simulation vorzubereiten. Ein zentraler Aspekt der Modellvorbereitung war die Vereinfachung der Konstruktion, wobei Details wie Fasen, kleine Bohrungen und Rundungen entfernt wurden, die für die Berechnung nicht relevant waren, aber die Rechenzeit erhöhten. Dabei wurde darauf geachtet, die Massenverteilung möglichst nicht zu verändern. Tabelle 6-2 zeigt die gemessenen und im CAD nachgebildeten Massen, wobei die Abweichungen der Massen der Bauteile im CAD ebenfalls bestimmt wurden.

	Masse [g]		Abweichung [%]
	real gemessen	nachgebildet	
Verschlusskappe	178	192	7,9
Gehäuse	861	869	0,9
Adapter	474	497	4,9
Wälzlager	21	20	-6,0
Wellenadapter	58	67	15,5
Unwucht	445	443	-0,4
Wellendichtring	6	0	-100,0
Vibrationskörper gesamt	2112	2147	1,7

Tabelle 6-2: Vergleich der Massen

Kleinere Elemente wie Wellendichtringe und Schrauben wurden aufgrund ihrer geringen Masse im Gesamtsystem in der Simulation vernachlässigt. Das Simulationsmodell wurde iterativ entwickelt, wobei jede Version auf den Ergebnissen vorheriger Simulationen und realer Messungen basierte. Diese schrittweise Verfeinerung des Modells ermöglichte es, das Verhalten des Systems kontinuierlich genauer abzubilden und anzupassen. In mehreren Iterationen wurden die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des realen Systems realitätsnah in das Simulationsmodell integriert.

Der Aufbau des Simulationsmodells begann mit der Erstellung einer neuen Baugruppe, wobei der Wellenstutzen als erstes Bauteil eingebaut wurde. Der Ursprung des Teilekoordinatensystems wurde auf den Ursprung der Baugruppe platziert, wobei zwischen beiden Koordinatenursprüngen Federn für jeden Freiheitsgrad definiert wurden. Diese Art der Definition ermöglichte es, die feste Einspannung des Versuchsaufbaus zu simulieren. Die Federn bildeten die Steifigkeit der flexiblen Welle sowie deren Einspannung ab und konnten die Bewegungen des Simulationsaufbaus beeinflussen. Ein Querschnitt der Baugruppe ist in Abbildung 6-17 dargestellt.

Auf dem Wellenstutzen wurde das Gelenk angebracht, das in der Simulation jedoch gesperrt wurde. Der Adapter des Innenvibrators sowie das Gehäuse mit den Lagern wurden ebenfalls mittels starrer Verbindungen in das Modell integriert. Die Längsachse der Unwucht wurde auf der Längsachse des Gehäuses fixiert, wobei sie einen Drehfreiheitsgrad um die eigene Längsachse erhielt. Die Position wurde analog zum Versuchsaufbau festgelegt.

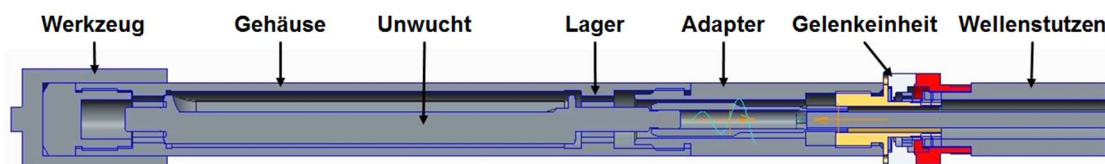


Abbildung 6-17: Simulationsmodell im Schnitt mit Bauteilbezeichnungen

Als Antrieb für die Unwucht wurden Servomotoren definiert, deren konstante Umdrehungsgeschwindigkeit so gewählt wurde, dass sich die gewünschten Frequenzen von 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz und 200 Hz ergaben. Die konstante Umdrehungsgeschwindigkeit wurde in der Einheit $^{\circ}/s$ definiert. Der im Versuchsaufbau angebrachte Sensor wurde in der Simulation vernachlässigt, da seine geringe Masse im Vergleich zum Gesamtgewicht vernachlässigbar war.



Abbildung 6-18: Komplettes Simulationsmodell in 3D

Das Simulationsmodell, wie in Abbildung 6-18 dargestellt, wurde unter Berücksichtigung der Gravitation erstellt, die in negativer x-Richtung wirkt. Der Analysetyp war eine dynamische Mehrkörpersimulation. Die Messpunkte der Simulation wurden als Punkte auf der Oberfläche des Werkzeugträgers definiert. Die Beschleunigungen wurden in diesen Punkten – wie in der Messung – nur in der Koordinatenrichtung senkrecht zur Oberfläche des Werkzeugträgers aufgezeichnet, wodurch die Ergebnisse der Simulation mit der Messung vergleichbar waren.

6.7.3.5 Berechnung und Simulation

Für die Simulation physikalischer Phänomene mussten mehrdimensionale Rand- und Anfangswertaufgaben gelöst werden, die durch Systeme von Integral- und Differenzialgleichungen beschrieben werden. Zur numerischen Lösung dieser Gleichungen hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) als bewährtes Verfahren zur Untersuchung von Strukturen unter statischer und dynamischer Belastung etabliert. Das Verhalten des Werkzeugs, bestehend aus mehreren beweglichen Bauteilen, wird durch Mehrkörpersimulation (MKS) analysiert. Die abgebildeten Bewegungsabläufe liefern die dynamischen Belastungen, die später für Festigkeitsanalysen und den Materialabtrag verwendet werden.

Ein Mehrkörpersimulationsmodell wurde aufgebaut, das dem realen Versuchsaufbau nachempfunden ist. Wie in Abbildung 6-18 gezeigt, wurden neue Modelldaten erstellt und vorhandene CAD-Daten überarbeitet. Dabei wurden unnötige Konstruktionsdetails wie Fasen, kleine Bohrungen und Rundungen entfernt, um die Rechenzeit zu optimieren, ohne die Massenverteilung zu verändern. Elemente wie Wellendichtringe und Schrauben wurden aufgrund ihres geringen Einflusses vernachlässigt.

Die Mikrosimulationen konzentrierten sich auf das komplexe mechanische Verhalten und den Abtrag der Ablagerungen. Abbildung 6-19 zeigt das FEM-Modell, das für bruchmechanische Untersuchungen in Abaqus-CAE verwendet wurde. Es lässt sich dynamisch

erweitern und anpassen, z. B. mit verschiedenen Materialmodellen. Der Abtrag der Ablagerungen wurde über einzelne Werkzeugschläge mit variierenden Beschleunigungsamplituden gemessen, die aus Experimenten und MKS stammen. Diese Daten wurden später für Näherungsrechnungen genutzt, um den Volumenverlust zu kalkulieren, sobald sich das System eingeschwungen hatte.

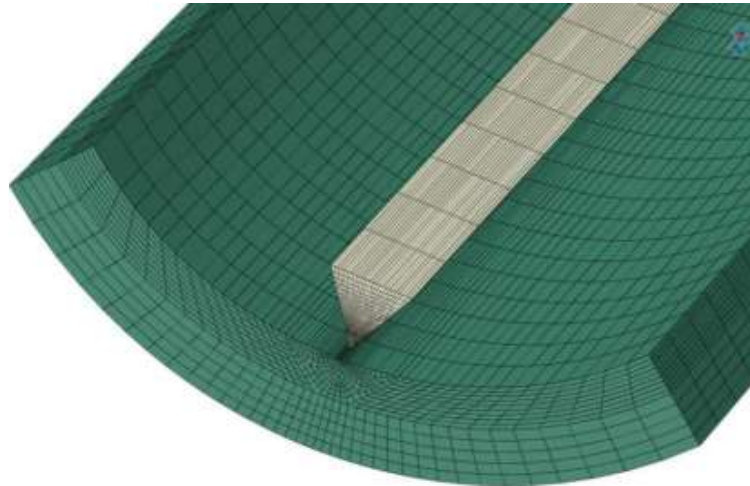


Abbildung 6-19: FEM Modell für bruchmechanische Untersuchungen

Die radiochemische und mechanische Analyse der Ablagerungen ergab, dass diese keinen wesentlichen Einfluss auf die Betriebsfestigkeit der Baugruppe haben. Vorläufig wurden idealisierte Annahmen für die FEM-Berechnungen getroffen. Frühere Untersuchungen (Schneider, et al., 2015) zeigten ein ähnliches Verhalten wie Zement, sodass Parameter für das Drucker-Prager-Modell in die Simulation integriert wurden. Die Gültigkeit des Modells blieb trotz geänderter Parameter erhalten.

6.7.3.6 Dimensionierung und Auslegung

Auf Basis der Geometrie der erzeugten Bauteile wurde die Festigkeit der kritischen Bauteile, insbesondere des Gehäuses und der Unwucht, in NX mithilfe von FEM-Analysen untersucht. Diese Simulation diente dazu, eine grobe Einschätzung zu geben, ob die Bauteile den Belastungen standhalten. Es wurden statische Untersuchungen durchgeführt, bei denen die dynamischen Kräfte in statische Belastungen umgerechnet wurden. Gewinde wurden bei der Vernetzung vernachlässigt, um die Berechnungszeit zu verkürzen. Die grafischen Auswertungen finden sich im Anhang dieser Arbeit und werden an dieser Stelle zusammengefasst.

Die Unwucht wurde an den Lagersitzen fest eingespannt. Diese Annahme ist eine Vereinfachung, da sie nur zu minimalen Zeitpunkten in der Realität auftritt, wenn der Werkzeugträger an die Rohrwand schlägt. Bei einer Frequenz von 220 Hz ergibt sich eine Kraft von 4700 N. Diese Kraft greift am Massenmittelpunkt der Unwucht an. Das Material der Unwucht ist Stahl und die Simulation zeigt eine maximale Spannung von 655

MPa, die nahe der festen Einspannung auftritt. Da die Streckgrenze des verwendeten Stahls 42CrMo4 bei 750 MPa liegt, ist die Belastung unproblematisch.

Die maximale Verschiebung der Unwucht beträgt 0,39 mm (Anhang siehe Abbildung 7-16) und der Abstand zur Gehäuseinnenwand bleibt bei mindestens 1,5 mm, sodass kein Schleifen zu befürchten ist. Ohne den Steg zur Stabilisierung verdoppelt sich die Verschiebung auf 0,81 mm (Anhang siehe Abbildung 7-17), was zu Problemen führen könnte. Der Steg verleiht der Unwucht daher zusätzliche Stabilität.

Das Gehäuse besteht aus Aluminium und wird bei der FEM-Analyse am Gewinde M36 fest eingespannt. Die Untersuchung simuliert die Aufschlagskraft des Werkzeugs auf die Rohrrinnenwand, wobei eine Kraft von 4700 N angenommen wurde, basierend auf vorherigen Messungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale Spannung im relevanten Bereich des Gehäuses 200 MPa beträgt. Da das Material AlZn5, 5MgCu eine Dehngrenze von über 485 MPa aufweist, ist das Material für den Einsatz geeignet.

6.7.3.7 Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen

Um das Simulationsmodell mit dem realen Aufbau zu vergleichen, wurden die Schwingungsamplituden als Messgröße herangezogen. Diese Amplituden bieten eine gute Vergleichsgrundlage, um sinusförmige Schwingungen zu bewerten. Um sicherzustellen, dass keine überlagerten Schwingungen vorliegen, wurde eine FFT-Analyse durchgeführt. Da die Amplituden nicht zuverlässig im Bildbereich abgelesen werden konnten, wurde der Vergleich im Zeitbereich vorgenommen. Der Maximalwert der Messung wurde nicht verwendet, da Amplituden Schwankungen unterliegen und Ausreißer auftreten können. Stattdessen wurde der Durchschnittswert der Amplituden als Vergleichswert genutzt.

Das Simulationsmodell wurde iterativ angepasst, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Die Federsteifigkeiten wurden anfänglich geschätzt, wobei 100.000 N/mm für translatorische Federn und 10.000 mmN/° für rotatorische Federn festgelegt wurden. Das Ziel war es, bei verschiedenen Frequenzen und mit oder ohne Werkzeug die Messwerte so genau wie möglich zu ermitteln. Eine zu hohe Steifigkeit führte zu ungewünschten Verschiebungen, während zu niedrige Steifigkeiten unrealistische Modellzustände zur Folge hatten.

Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigte die Güte des Simulationsmodells, wobei die Ergebnisse mit und ohne Werkzeug getrennt betrachtet wurden.

200 Hz					
Messpunkt	Messung	Simulation	Abweichung	Berechnung	Abweichung
[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[m/s ²]	[%]
0	769	797	3,6		
100	595	620	4,2	650	9,2
200	452	443	-2,0		

150 Hz					
Messpunkt	Messung	Simulation	Abweichung	Berechnung	Abweichung
[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[m/s ²]	[%]
0	405	448	10,6		
100	324	349	7,7	365	12,7
200	270	249	-7,8		

100 Hz					
Messpunkt	Messung	Simulation	Abweichung	Berechnung	Abweichung
[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[m/s ²]	[%]
0	194	215	10,8		
100	171	167	-2,3	163	-4,7
200	136	120	-11,8		

Tabelle 6-3: Vergleich der Beschleunigungen bei Messung, Simulation und Berechnung: Werkzeugträger mit Werkzeug

In Tabelle 6-3 sind die Amplituden der Beschleunigungen bei verschiedenen Frequenzen und Messpunkten dargestellt. Abweichungen von weniger als 5 % wurden als sehr gute Ergebnisse gewertet, Abweichungen zwischen 5 % und 10 % als gut und Abweichungen über 10 % als auffällig. Bei drei Messpunkten lag die Abweichung über 10 %, jedoch nur geringfügig (10,6 %, 10,8 % und 11,8 %). Auffällig ist, dass bei höheren Frequenzen die Simulationsergebnisse besser ausfielen. Dies könnte daran liegen, dass bei höheren Frequenzen die Bewegungen des Gelenks im realen Aufbau weniger ausgeprägt sind, während diese in der Simulation nicht abgebildet wurden. Die analytisch berechneten Amplituden zeigten ebenfalls gute Ergebnisse mit einer maximalen Abweichung von 12,7 %.

Ohne Werkzeug zeigte die Simulation in Tabelle 6-4 eine einzige Abweichung von über 10 % (10,6 % bei 200 Hz). Dies liegt vermutlich an der fehlenden Masse des Werkzeugs, wodurch die Massenträgheit geringer ist. Vor allem nahe dem Gelenk gab es größere Abweichungen, die bei höheren Frequenzen stärker ausgeprägt waren. Die Amplituden der Simulation fielen dabei insgesamt zu hoch aus, was auf eine systematische Abweichung des Simulationsmodells hindeutet.

200 Hz					
Messpunkt	Messung	Simulation	Abweichung	Berechnung	Abweichung
[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[m/s ²]	[%]
0	1242	1252	0,8		
100	989,6	974	-1,6	796	-19,6
200	630	697	10,6		

150 Hz					
Messpunkt	Messung	Simulation	Abweichung	Berechnung	Abweichung
[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[m/s ²]	[%]
0	653	677	3,7		
100	523	527	0,8	448	-14,3
200	342	376	9,9		

100 Hz					
Messpunkt	Messung	Simulation	Abweichung	Berechnung	Abweichung
[mm]	[m/s ²]	[m/s ²]	[%]	[m/s ²]	[%]
0	297,7	312	4,8		
100	233	243	4,3	199	-14,6
200	164	174	6,1		

Tabelle 6-4: Vergleich der Beschleunigungen bei Messung, Simulation und Berechnung: Werkzeugträger ohne Werkzeug

Die analytischen Berechnungen ohne Werkzeug wichen etwa um 15 % von den Messergebnissen ab. Diese Berechnungen lieferten jedoch nur Ergebnisse für einen spezifischen Punkt auf dem Werkzeugträger, da bei der analytischen Berechnung die Massenverteilung der Bauteile nicht berücksichtigt wurde.

6.7.4 AP4: Nutzergerechte Schnittstellen

Ein zentraler Aspekt moderner Entwicklungsprojekte ist die Gestaltung nutzergerechter Schnittstellen. Sie spielen eine entscheidende Rolle für die Akzeptanz und Effizienz der entwickelten Systeme, da sie die Interaktion zwischen Nutzern und Technologie maßgeblich beeinflussen. Ziel dieses Arbeitspakets war es, die spezifischen Anforderungen der Nutzer frühzeitig zu identifizieren und diese konsequent in die Gestaltung der Schnittstellen einfließen zu lassen. Durch iterative Entwicklungsprozesse und die Einbindung von Nutzerfeedback wurde sichergestellt, dass die Schnittstellen nicht nur funktional, sondern auch intuitiv und benutzerfreundlich sind. Dabei standen insbesondere die ergonomische Gestaltung, die Minimierung von Barrieren und die Optimierung der Interaktionsprozesse im Fokus.

6.7.4.1 Parametrisierung der Teilsimulationsmodelle

Die Parametrisierung der Teilsimulationsmodelle begann bereits mit der ersten Version der Geometrie und wurde kontinuierlich parallel zur Entwicklung des gesamten Simulationsmodells vorangetrieben. Dieser iterative Prozess ermöglichte es, die Modelle laufend zu verfeinern und an neue Erkenntnisse sowie Anforderungen anzupassen, was entscheidend für einen flexiblen und agilen Entwicklungsablauf war. Die Anpassung der Geometriemodelle erfolgte in CATIA V5 und Siemens NX 8, was durch die nahtlose Integration der Simulationstools in die CAD-Systeme effizient ermöglicht wurde. Der modellbasierte Ansatz erlaubte es, die unterschiedlichen Bauteile und ihre Wechselwirkungen in Echtzeit zu analysieren und schnell anzupassen, was eine signifikante Reduzierung der Entwicklungszeit zur Folge hatte. In Abbildung 6-20 ist das parametrisierte CAD-Modell in CATIA dargestellt.

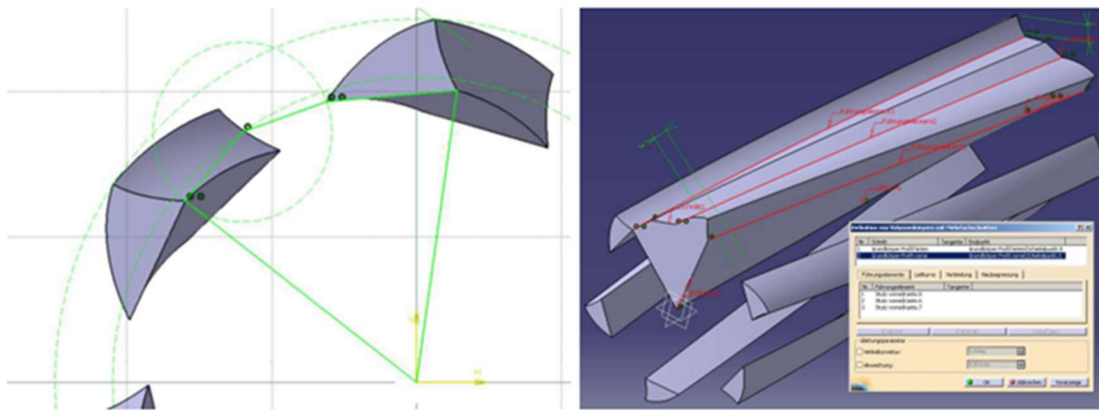


Abbildung 6-20: Erzeugung des parametrisierten CAD-Modells

Durch die Parametrisierung konnten Veränderungen an den Teilsystemen leicht vorgenommen und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem sofort simuliert werden. Dies war besonders wertvoll in einer Phase, in der das Design noch nicht finalisiert war und zahlreiche Änderungen erforderlich waren, um sowohl die funktionalen als auch die sicherheitstechnischen Anforderungen zu erfüllen. Eine kontinuierliche Anpassung und Verbesserung des Designs ist ein zentraler Bestandteil eines agilen Entwicklungsprozesses. Iterative Zyklen ermöglichen eine schrittweise Weiterentwicklung und Verfeinerung von Modellen, wodurch sowohl die Genauigkeit als auch die Effizienz des Prozesses kontinuierlich gesteigert werden.

Ein weiteres zentrales Merkmal dieses Ansatzes war die Einbindung verschiedener Einflussfaktoren und Parameter, die in den frühen Phasen der Entwicklung erhoben wurden. Durch die iterative Anpassung des Simulationsmodells konnten Fehler frühzeitig entdeckt und behoben werden, was letztendlich dazu beitrug, die Entwicklungszeit zu verkürzen und die Qualität des Endprodukts zu verbessern. Der Ansatz ermöglichte auch die

Anpassung an wechselnde Anforderungen, die sich im Verlauf des Projekts ergaben. Durch den parametrisierten Aufbau der Simulationsmodelle konnten verschiedene Szenarien und Randbedingungen durch einfache Änderungen in den Eingabeparametern simuliert und evaluiert werden, ohne dass das Modell von Grund auf neu aufgebaut werden musste.

Die Flexibilität dieses Ansatzes zeigte sich insbesondere in der Möglichkeit, bei Bedarf zwischen verschiedenen Software-Tools zu wechseln. Während Siemens NX 8 aufgrund seiner leistungsstarken Simulationsfähigkeiten primär zum Einsatz kam, ermöglichte die Verwendung von CATIA V5 eine effiziente Bearbeitung komplexer Geometriemodelle. Durch diese duale Herangehensweise konnte sichergestellt werden, dass sowohl die geometrischen als auch die strukturellen Anforderungen an das System vollständig berücksichtigt wurden.

Die Bedeutung des modellbasierten und iterativen Ansatzes für den Entwicklungsprozess wird durch die kontinuierliche Verbesserung der Modelle und die Möglichkeit deutlich, verschiedene Designvarianten frühzeitig und kostengünstig zu testen (Eigner, et al., 2014). Dies führte nicht nur zu einer besseren Produktqualität, sondern trug auch dazu bei, Risiken zu minimieren, die im späteren Verlauf des Projekts hätten auftreten können. Indem die Simulation in jede Phase der Produktentwicklung integriert wurde, konnten physische Prototypen reduziert und stattdessen virtuelle Tests genutzt werden, was die Gesamtentwicklung effizienter und flexibler gestaltete.

Dieser iterative Ansatz war ein Schlüsselement des SimViDekont-Projekts und ermöglichte die schrittweise Verbesserung der Dekontaminationsmethoden, indem die mechanischen und strukturellen Eigenschaften der Bauteile laufend überprüft und optimiert wurden. Die Fähigkeit, neue Erkenntnisse sofort in die Simulationsmodelle einfließen zu lassen, führte zu einer erheblichen Verkürzung der Entwicklungszyklen und half, eine durchgängige Optimierung der Bauteile zu gewährleisten.

6.7.4.2 Automatische Generierung von Simulationsmodellen

Ein zentraler Bestandteil des modellbasierten, iterativen Entwicklungsprozesses war die Automatisierung der Simulationsmodelle. Dieser Schritt diente dazu, den gesamten Entwicklungsablauf nicht nur zu beschleunigen, sondern auch eine höhere Flexibilität und Effizienz zu gewährleisten. Die automatisierte Generierung der Simulationsmodelle ermöglichte es, dass Veränderungen in der Geometrie oder den Parametern ohne manuelles Eingreifen sofort in das Simulationsmodell übertragen werden konnten. Dies wurde durch ein Framework realisiert, das das neutrale Datenformat STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) nutzt.

Durch die Verwendung des STEP-Formats konnte die Abhängigkeit von einem bestimmten CAD-System wie etwa Siemens NX oder CATIA minimiert werden. Diese Interoperabilität war von entscheidender Bedeutung, um den Entwicklungsprozess nachhaltig und flexibel zu gestalten. Das Framework war in der Lage, Änderungen an der CAD-Geometrie zu erkennen und diese automatisiert in das Simulationsmodell zu überführen. Somit entfiel der manuelle Prozess der Übertragung von Daten, der in herkömmlichen Entwicklungsprozessen häufig zeitaufwändig und fehleranfällig ist.

Die Möglichkeit, das Framework durch einfache Anpassungen auf jedes gängige CAD-System zu übertragen, machte es zu einem zentralen Werkzeug für die zukünftige Entwicklung im Kontext von SimViDekont. Durch diese Flexibilität konnten nicht nur die bestehenden Anforderungen an das Projekt erfüllt, sondern auch zukünftige Erweiterungen oder Anpassungen der Simulationsmethodik leichter integriert werden.

Die Funktionsweise des Frameworks wurde anhand mehrerer Praxisbeispiele validiert. In diesen Tests zeigte sich die Fähigkeit des Systems, Veränderungen in den Geometriemodellen automatisch zu erkennen und anzupassen. In der Praxis bedeutete dies, dass eine Vielzahl von Geometrievarianten innerhalb kürzester Zeit untersucht werden konnte. Dies war insbesondere in frühen Phasen der Produktentwicklung von Vorteil, da unterschiedliche Designansätze oder Bauteilvarianten schnell und effizient getestet werden konnten. Dank des automatisierten Frameworks konnten Iterationen durchgeführt werden, ohne dass jeder Schritt manuell angepasst werden musste – ein erheblicher Vorteil im Vergleich zu traditionellen Entwicklungsprozessen.

Die Parameter der CAD-Modelle wurden in Siemens NX erstellt und im Anschluss durch das CAE-System Abaqus weiterverarbeitet. Dabei wurden nicht nur die Geometriemodelle automatisiert angepasst, sondern auch die zugehörigen Simulationsmodelle. Dies bedeutete, dass nach jeder Modifikation im CAD-System das Simulationsmodell aktualisiert und die Berechnungen durchgeführt werden konnten. Die manuelle Eingabe von Daten oder Anpassungen in den Simulationsmodellen entfiel weitgehend. Einzig die Auswertung der Simulationsergebnisse musste noch manuell erfolgen, wobei zukünftige Erweiterungen des Systems auch hier eine vollständige Automatisierung denkbar erscheinen ließen.

Durch diese Integration von CAD und CAE in einem automatisierten Workflow konnte eine erhebliche Zeitersparnis erzielt werden. Insbesondere bei komplexen Bauteilen, wie sie im Projekt SimViDekont zum Einsatz kamen, wäre eine manuelle Anpassung der Simulationsmodelle nach jeder Geometrieänderung äußerst zeitaufwändig gewesen. Das automatisierte Framework erlaubte es stattdessen, innerhalb kurzer Zeit verschiedene Geometrien zu berechnen und zu vergleichen, was die Grundlage für eine datenbasierte Ent-

scheidungsfindung schuf. Die iterative Verbesserung des Simulationsmodells erfolgte dabei in kürzeren Zyklen, was die Entwicklung insgesamt beschleunigte und den Ressourceneinsatz effizienter gestaltete.

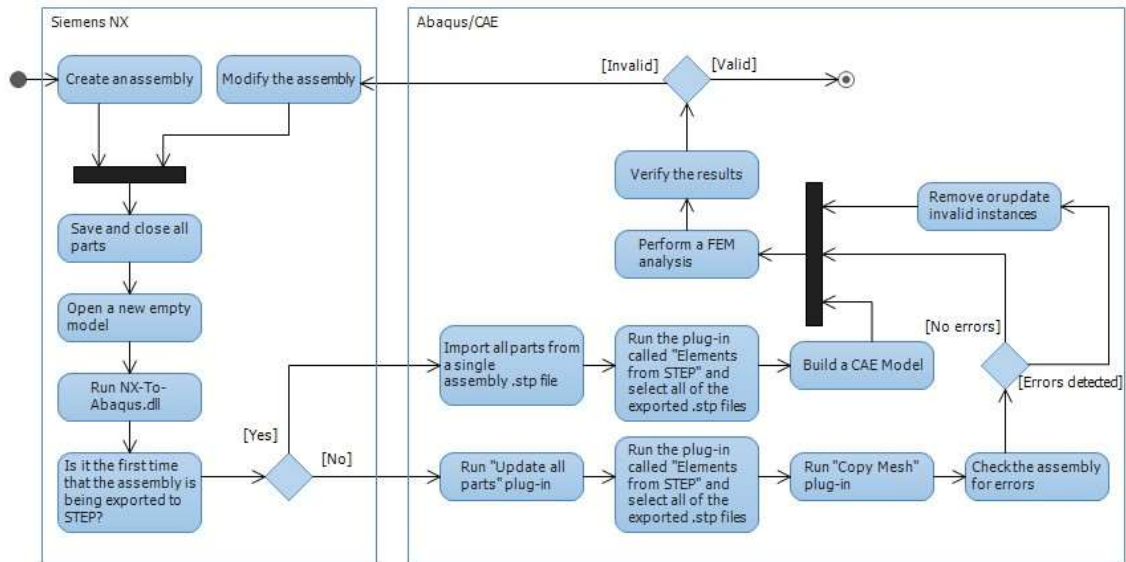


Abbildung 6-21: Aktivitätsdiagramm der automatisierten Berechnung/Geometrierstellung

In Abbildung 6-21 ist das Aktivitätsdiagramm der automatisierten Berechnung und Geometrierstellung dargestellt. Es zeigt den iterativen Prozess, bei dem Änderungen in den CAD-Modellen erkannt, an das Simulationsmodell weitergeleitet und schließlich die Berechnungen durchgeführt werden. Durch die hohe Flexibilität des Systems konnte eine große Anzahl an Geometrievarianten getestet werden, was entscheidend zur Optimierung des Werkzeugträgers im SimViDekont-Projekt beitrug.

Dieser Ansatz des modellbasierten und automatisierten Workflows stellt einen signifikanten Vorteil im Vergleich zu traditionellen Entwicklungsprozessen dar, da er eine schnelle Anpassung und Prüfung von Modellen ermöglicht. Er reduziert nicht nur den Zeitaufwand für wiederholte manuelle Arbeiten, sondern verbessert auch die Genauigkeit und Qualität der Simulationsergebnisse, was zu einer schnelleren und effizienteren Entwicklung führte.

6.7.4.3 Multimodale Darstellung des Simulationsverfahrens in Virtual Reality

Im Rahmen dieser Arbeit stellt die „anwendungsgerechte multimodale Darstellung des Simulationsverfahrens in der Virtual Reality“ einen wesentlichen Beitrag zur Integration von industriellen Anwendern, insbesondere der Sat Kerntechnik GmbH, dar. Diese VR-Lösung ermöglicht es den Anwendern, den wissenschaftlichen Fortschritt des Projekts nachzuvollziehen und gleichzeitig eigene praktische Erfahrungen und Anforderungen in

den Entwicklungsprozess einzubringen. Damit wird eine Verbindung zwischen Forschung und industrieller Anwendung geschaffen, die für die spätere Implementierung der entwickelten Technologie entscheidend ist. In Abbildung 6-22 ist schematisch die technische Umsetzung des PolyVR-Frameworks dargestellt. Dieses Framework wurde im Rahmen des Forschungsprojektes um bedeutende Features bzw. Funktionsumfänge erweitert.

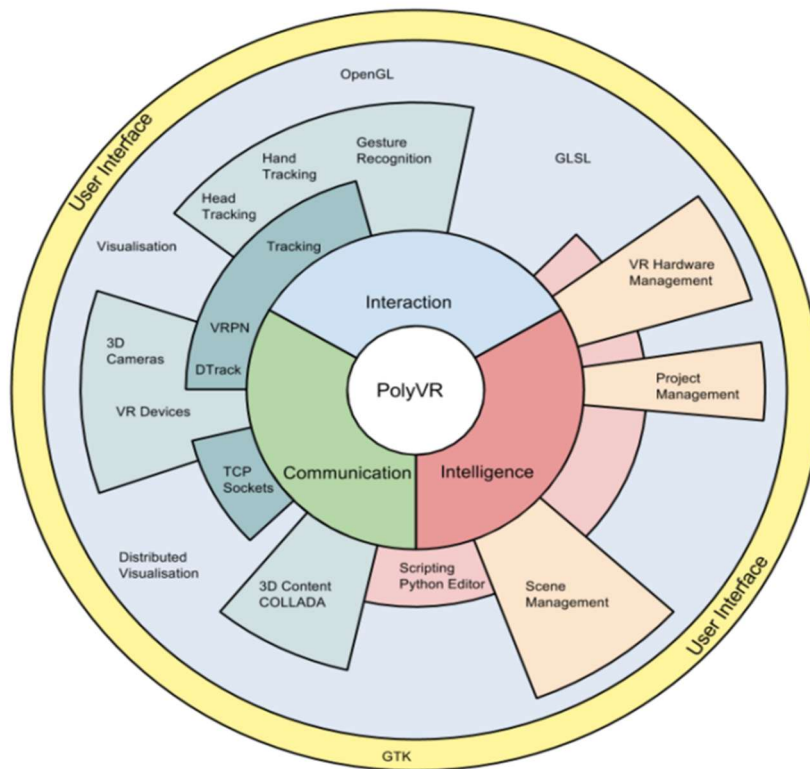


Abbildung 6-22: PolyVR Framework

Die eingesetzte Virtual-Reality-Software „PolyVR“ wurde speziell für die Entwicklung skalierbarer und schnell generierbarer VR-Systemlösungen entwickelt und im Rahmen des Projekts weiter angepasst. PolyVR, das am IMI entwickelt wurde, erleichtert den Import und die Integration unterschiedlichster Datenformate, darunter 3D-Inhalte wie Numerik-, Netz-, Volumen- und CAD-Daten. Darüber hinaus ermöglicht es die Einbindung von Animationen, Ton und physikalischen Echtzeitsimulationen in die VR-Umgebung. Dies unterstützt die immersive Darstellung der simulierten Prozesse und bietet eine intuitive Schnittstelle zur Validierung der entwickelten Methodik.

Ein entscheidender Vorteil der VR-Darstellung besteht darin, dass sie nicht nur IT-Experten, sondern auch Endnutzern aus weniger technischen Bereichen den Zugang zu komplexen Informationen erleichtert. Dies ist besonders relevant für die Gewährleistung von

Arbeitssicherheit und Prozessoptimierung. Die Nutzer können in der virtuellen Umgebung das Verhalten der Werkzeuge und die richtige Anwendung des Verfahrens erlernen, was zu einer effizienteren und sichereren Durchführung der Dekontaminationsprozesse führt.

Die Integration der Endnutzer in den Validierungsprozess trägt erheblich zur Optimierung der entwickelten Lösungen bei. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Entwicklung eines interaktiven VR-Modells, das die akustische Darstellung von Radioaktivität ermöglicht. Solche Anwendungen bieten nicht nur technisches Verständnis, sondern auch eine intuitive Erfassung komplexer Prozesse für Personen, die nicht regelmäßig in einem wissenschaftlichen oder IT-nahen Umfeld arbeiten.

Durch die VR-Visualisierung wird somit der gesamte Entwicklungsprozess transparenter und zugänglicher, was zur Erhöhung der Akzeptanz und Effizienz der entwickelten Lösungen in der industriellen Anwendung beiträgt.

Virtueller Versuchsstand

Im Rahmen dieser Arbeit spielt der virtuelle Versuchsstand eine zentrale Rolle in der Überprüfung und Optimierung der entwickelten Werkzeuge sowie des gesamten Dekontaminationsprozesses. Die vorangegangenen FEM- und MKS-Simulationen lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Festigkeit und das Betriebsverhalten der Komponenten. Für eine vollständige Validierung der Methodik war es jedoch notwendig, eine virtuelle Testumgebung zu schaffen. Dies bot nicht nur eine Möglichkeit zur Simulation des realen Verhaltens, sondern auch zur Interaktion mit dem System, ohne die physische und oft riskante Realität eines radioaktiven Umfelds zu betreten.

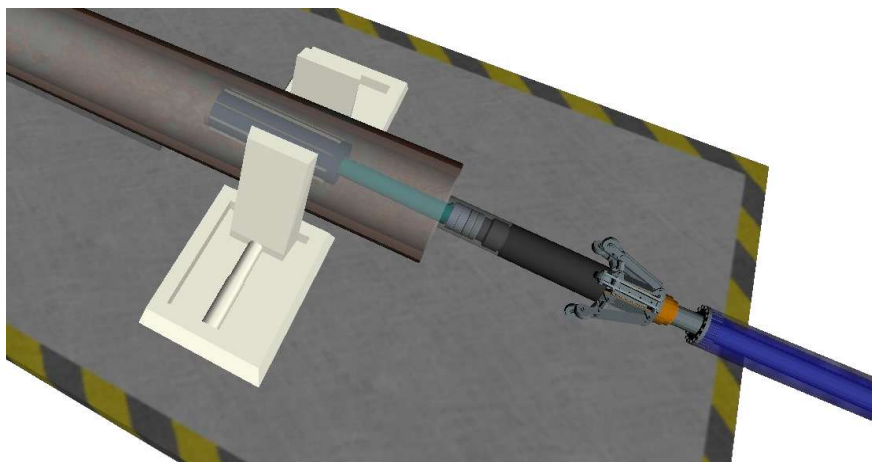


Abbildung 6-23: Virtueller Versuchsstand des Prototyps

Abbildung 6-23 zeigt den virtuellen Versuchsstand, der aus einer stabilen Konstruktion besteht, die das Rohr, das Werkzeug sowie die Vorschubvorrichtung und deren Stabilisierungskonstruktion umfasst. Diese virtuelle Umgebung bildet das physische Setup der

Dekontaminationsprozesse ab und ermöglicht es, die hohen mechanischen Belastungen, die durch die Werkzeugeinheit und das eingespannte Werkstück entstehen, realitätsgetreu nachzubilden. Ein bedeutender Vorteil dieses virtuellen Modells ist die Möglichkeit, die Haptik des Verfahrens zu testen und so die Praktikabilität der Werkzeugeinheit unter realen Bedingungen zu bewerten. Das Ziel der Vorschubvorrichtung ist es, eine ergonomische Handhabung zu gewährleisten, da das manuelle Bedienen eines solch schweren Werkzeugs langfristig ineffizient und kräftezehrend wäre.

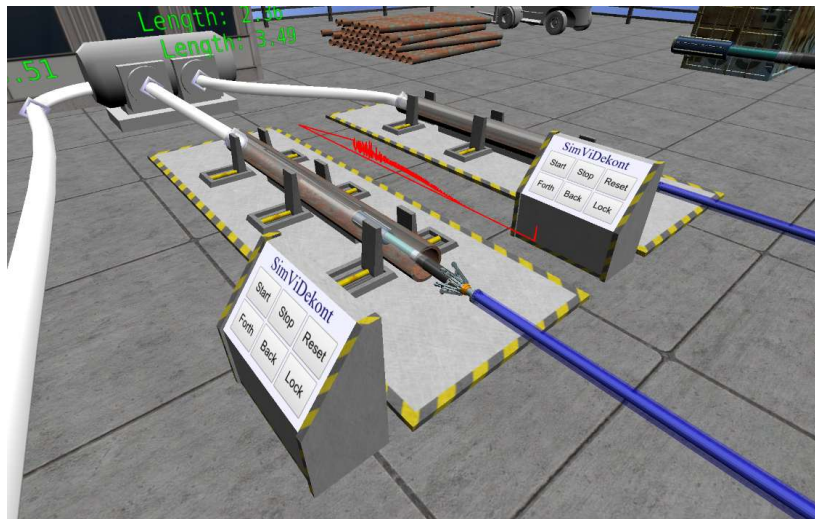


Abbildung 6-24: Aufbau einer virtuellen Testumgebung und Darstellung einer MKS-Berechnung mit Amplitudenverlauf (rot)

Darüber hinaus erlauben der Einsatz der PolyVR-Software und die Visualisierung in der CAVE des LESC eine immersive Darstellung der Dekontaminationsprozesse, wie in Abbildung 6-24 dargestellt. Diese virtuelle Umgebung bietet eine vollständig interaktive, dynamische und realitätsnahe Darstellung der Arbeitsschritte, was den Endanwendern die Möglichkeit gibt, den gesamten Prozess zu erleben, ohne den physischen Gefahren ausgesetzt zu sein. Besonders wertvoll ist die Darstellung des Abtragverhaltens der Ablagerungen im Rohr, das in Zeitlupe beobachtet und analysiert werden kann. Zusätzlich bieten farbcodierte Metainformationen – wie die Verteilung der Radioaktivität – eine anschauliche Visualisierung, die es erlaubt, kritische Bereiche schnell zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Die Möglichkeit, die Ergonomie der Lösung zu überprüfen sowie die Baugruppe interaktiv zu betrachten und anzupassen, erlaubt eine praxisnahe und detaillierte Bewertung der Werkzeuge und der Prozessgestaltung. Dies ist insbesondere für die industrielle Anwendung von Bedeutung, da es die Einführung einer Haptikausgabe ermöglicht, durch die physische Bewegungsabläufe und Belastungen simuliert werden können. Solche Funktionalitäten sind für die Endanwender, insbesondere die Sat Kerntechnik GmbH, von hoher

Relevanz, da sie durch diese Simulationen ihre Prozesseffizienz steigern und die Arbeitssicherheit erhöhen können.

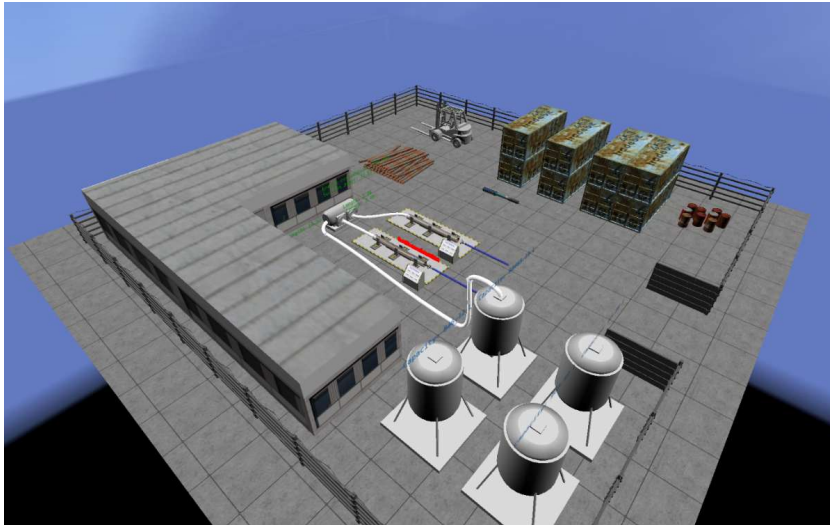


Abbildung 6-25: Aufbau der virtuellen Gesamtanlage, inkl. Prozessdarstellung

Wie in Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26 zu sehen ist, wurde nach dem offiziellen Projektende der virtuelle Versuchsstand noch weiterentwickelt, um eine interaktive Prozessdarstellung zu integrieren. Dadurch kann der gesamte Dekontaminationsprozess flexibel angepasst werden. Diese Flexibilität im Prozessdesign, die durch das modular aufgebaute Framework ermöglicht wird, ist besonders wertvoll, da zukünftige Anpassungen an veränderte Einsatzbedingungen oder neue technologische Entwicklungen schnell und kosteneffizient durchgeführt werden können. Der iterative und modellbasierte Ansatz dieser Arbeit wird durch den virtuellen Versuchsstand optimal unterstützt, indem er eine schnelle, effiziente sowie risikoarme Validierung und Optimierung der entwickelten Werkzeuge und Prozesse erlaubt.

6.7.5 AP5: Validierung

Die Validierung stellt einen zentralen Schritt im Entwicklungsprozess dar, um die Funktionalität und Effizienz des entwickelten Systems zu bestätigen. In diesem Abschnitt wird der Prozess der Validierung für das im Projekt entwickelte Dekontaminationsverfahren detailliert beschrieben. Die Validierung umfasst mehrere Dimensionen: Zum einen wird die Funktion des virtuellen Simulationsmodells überprüft, indem die Ergebnisse mit realen Messwerten verglichen werden. Zum anderen erfolgt die Validierung des entwickelten Werkzeugs und des Dekontaminationsprozesses unter realen Bedingungen. Ziel der Validierung ist es, sicherzustellen, dass das entwickelte System den definierten Anforderungen und Spezifikationen entspricht und unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen zuverlässig arbeitet.

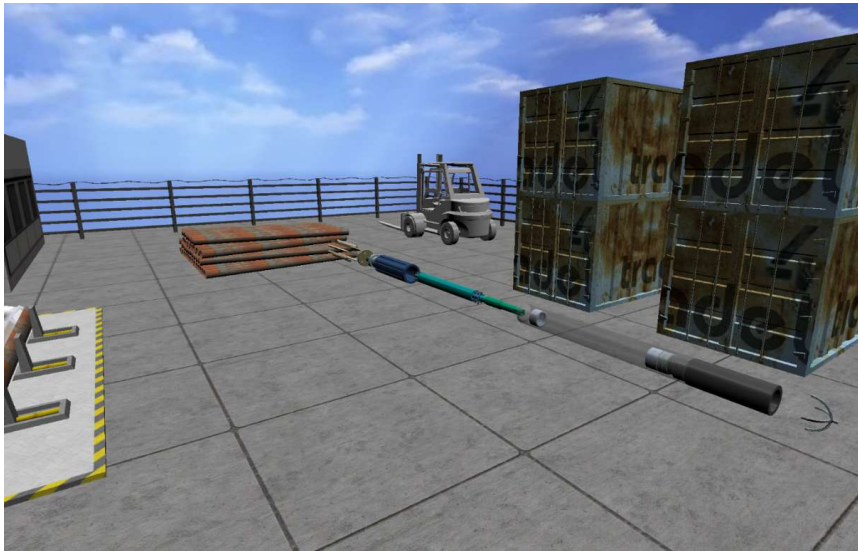


Abbildung 6-26: Interaktive Betrachtung des Werkzeugs bzw. der Baugruppe

Ein wesentlicher Bestandteil der Validierung ist der Abgleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten, die während der Testphase erhoben wurden. In dieser Phase wurde eine enge Wechselwirkung zwischen der Modellierung und den realen Tests angestrebt, um das Simulationsmodell schrittweise zu verbessern und zu verfeinern. Hierbei spielten die zuvor durchgeführten FEM- und MKS-Analysen eine entscheidende Rolle, da diese die Grundlage für die Abschätzung der Belastungen und der Leistungsfähigkeit des Systems bildeten.

Neben der technischen Validierung des Werkzeugs und des Dekontaminationsprozesses steht auch die Überprüfung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik im Fokus. Die erarbeitete Methodik, die auf einem modellbasierten, iterativen Entwicklungsansatz basiert, wird im Validierungsprozess ebenfalls kritisch evaluiert. Das Ziel ist es, nicht nur das Endprodukt, sondern auch den gesamten Entwicklungsprozess zu überprüfen und sicherzustellen, dass die verwendeten Simulations- und Optimierungstechniken praxistauglich sind und eine effiziente Entwicklungsarbeit unterstützen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Validierung des Vorgehensmodells fließen in die abschließende Beurteilung der Methodik ein und tragen dazu bei, zukünftige Entwicklungsprojekte weiter zu verbessern.

Darüber hinaus wird in diesem Abschnitt erläutert, wie das entwickelte Werkzeug und der gesamte Dekontaminationsprozess unter realen Einsatzbedingungen getestet wurden. Die Tests fanden in einem kontrollierten Umfeld statt, das die realen Betriebsbedingungen möglichst genau nachbildete. Unterschiedliche Parameter und Einsatzszenarien wurden berücksichtigt, um die Grenzen des Systems zu evaluieren und Optimierungspotenzial zu identifizieren.

Abschließend wird im Rahmen der Validierung überprüft, inwieweit das entwickelte System den Anforderungen in Bezug auf Arbeitssicherheit, Effizienz und Umweltverträglichkeit gerecht wird. Diese Aspekte sind von großer Bedeutung, da das entwickelte System nicht nur technisch einwandfrei funktionieren, sondern auch den strengen gesetzlichen Vorgaben für den Einsatz in radioaktiv kontaminierten Bereichen entsprechen muss. Die Validierung liefert somit den endgültigen Nachweis über die Praxistauglichkeit des entwickelten Verfahrens sowie der erarbeiteten Methodik und bildet die Grundlage für deren mögliche industrielle Anwendung.

6.7.5.1 Validierung des virtuellen Simulationsverfahrens

Damit weitere Untersuchungen mit dem Simulationsmodell möglich sind, musste dieses vorvalidiert werden. Die Vorvalidierung diente dazu, das Simulationsmodell auf seine Genauigkeit zu überprüfen und die Ergebnisse mit den realen Messungen abzugleichen.

Vorvalidierung

Die Abweichungen bei der Simulation ohne Werkzeug fielen insgesamt geringer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Werkzeugmasse einen signifikanten Einfluss auf die Bewegungen im Gelenk hat. Durch das zusätzliche Gewicht des Werkzeugs wird die Dynamik verändert, was zu größeren Abweichungen zwischen der Simulation und den Messungen führte.

Federbezeichnungen	Ausrichtung der Federn	Federsteifigkeiten
k1	x-Achse	1000000 N/mm
k2	y-Achse	500000 N/mm
k3	z-Achse	500000 N/mm
k4	um x-Achse	100000 Nmm/deg
k5	um y-Achse	5000 Nmm/deg
k6	um z-Achse	5000 Nmm/deg

Tabelle 6-5: Federsteifigkeiten der Einspannung im Simulationsmodell

Die in Abbildung 6-27 dargestellten Ergebnisse wurden mit den in Tabelle 6-5 aufgeführten Federsteifigkeiten erreicht. Diese Federsteifigkeiten können für zukünftige Simulationen als Ausgangspunkt genutzt werden, etwa für eigene Konstruktionen von Werkzeugträgern oder für digitale Versuchsaufbauten. Es ist jedoch erforderlich, diese Werte als Richtwerte zu betrachten, da sie je nach Konstruktions- und Simulationsmodell angepasst werden müssen.

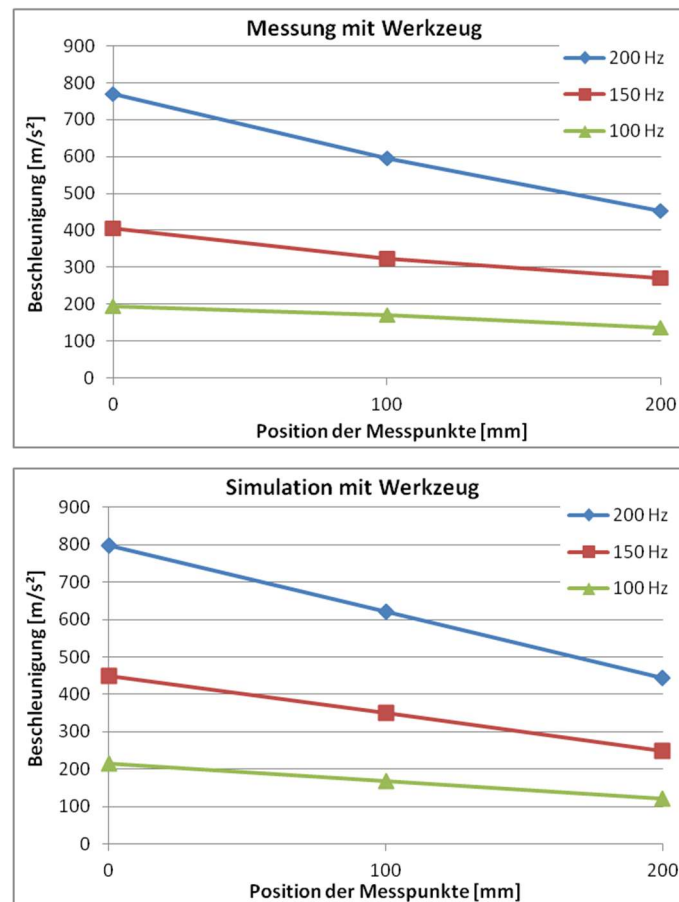


Abbildung 6-27: Beschleunigungsverteilung bei Messung und Simulation: mit Werkzeug

Die Verteilung der Beschleunigung über die Länge des Werkzeugträgers gibt Aufschluss darüber, ob die gewählte Anzahl an Messpunkten für die Validierung ausreichend war. In Abbildung 6-27 ist oben die gemessene Beschleunigungsverteilung des Werkzeugträgers mit angebrachtem Werkzeug dargestellt, während unten die entsprechende Verteilung in der Simulation zu sehen ist. Beide Schaubilder weisen eine lineare Verteilung der Beschleunigung auf, was darauf hindeutet, dass die Simulation das reale Verhalten des Systems gut abbildet.

In Abbildung 6-28 ist oben die Beschleunigungsverteilung des Werkzeugträgers ohne Werkzeug, basierend auf den Messungen, zu sehen. Das entsprechende Schaubild der Simulation befindet sich unten. Während die Simulation eine klare lineare Verteilung aufweist, ist bei der Messung eine leichte Abweichung vom linearen Verlauf zu erkennen. Diese Abweichung könnte durch unvorhergesehene Einflüsse während der Messung wie beispielsweise durch die Eigenbewegungen des Systems bedingt sein.

Insgesamt zeigt sich sowohl bei den Messungen als auch bei den Simulationen eine nahezu lineare Beschleunigungsverteilung über die Länge des Werkzeugträgers. Dies bestätigt, dass die gewählte Anzahl an Messpunkten für eine zuverlässige Validierung des Simulationsmodells ausreichend war.

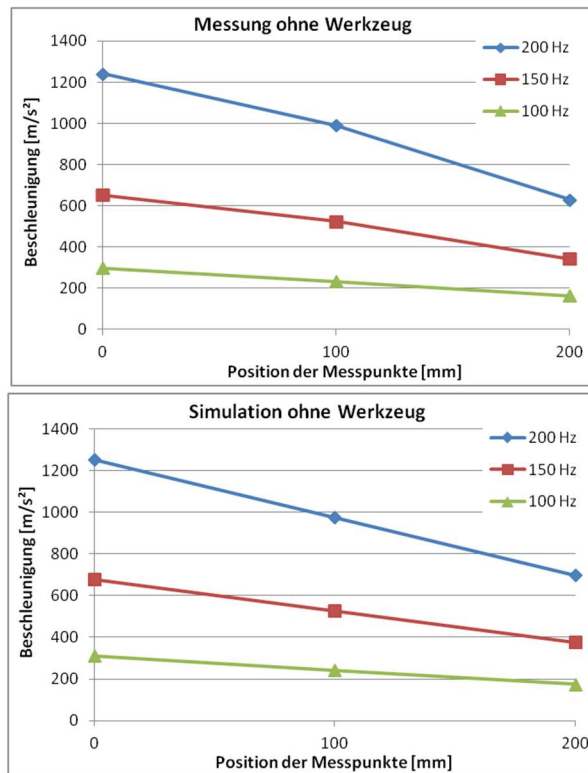


Abbildung 6-28: Beschleunigungsverteilung bei Messung und Simulation: ohne Werkzeug

Untersuchung von Einflüssen bestimmter Systemgrößen

Nachdem das Simulationsmodell im Rahmen der Möglichkeiten optimiert und vorvalidiert wurde, konnten darauf aufbauend weiterführende Simulationen durchgeführt und das gesamte Modell validiert werden. Ein zentrales Thema der Untersuchung war die Analyse der Auswirkungen einer Variation bestimmter Systemgrößen. Dabei lag der Fokus insbesondere auf den Änderungen an den Bauteilen Gehäuse, Unwucht und Werkzeug. Die Masse der Bauteile sowie deren Massenverteilung spielten eine entscheidende Rolle für die entstehenden Beschleunigungen am Werkzeugträger. Eine Erhöhung der Unwuchtmasse oder ihrer Exzentrizität führt zu einer Erhöhung der Beschleunigung, während eine Erhöhung der übrigen Masse des Werkzeugträgers die Beschleunigung verringert.

Den größten Einfluss auf die Masse der jeweiligen Bauteile haben Durchmesser, Länge und Dichte. Der Durchmesser beeinflusst zudem die Exzentrizität der Unwuchtmasse,

was wiederum die Beschleunigung direkt beeinflusst. In der ersten Betrachtung wurden Änderungen in Länge, Durchmesser und Dichte von Unwucht und Gehäuse unabhängig voneinander untersucht, um die Auswirkungen einzelner Änderungen klar zu erkennen. Da Länge und Durchmesser jedoch stark voneinander abhängig sind, wurde auch die kombinierte Änderung beider Größen untersucht. Hierbei wurden bei der Unwucht und dem Gehäuse jeweils dieselben Längen- und Durchmesseränderungen vorgenommen.

Um repräsentative Beschleunigungswerte zu ermitteln, die für den späteren Einsatz relevant sind, wurden die Messpunkte auf das Werkzeug gelegt. Die Beschleunigungswerte am Werkzeug sind ausschlaggebend für den Abtragprozess. Da die Beschleunigungsverteilung über die Länge des Werkzeugträgers weitgehend linear ist, war es ausreichend, nur einen Messpunkt zu verwenden. Messpunkt 1 befindet sich auf der halben Länge des Werkzeugs, wie in Abbildung 6-29 dargestellt.

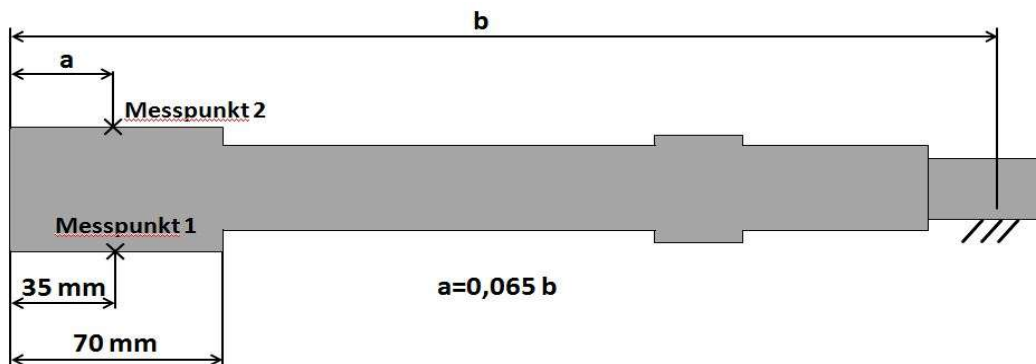


Abbildung 6-29: Position der Messpunkte 1 und 2

Wie bei den vorangegangenen Simulationen wurden auch hier die radialen Beschleunigungsanteile gemessen. Um die Auswirkungen der Gehäuselängenänderung auf den Messpunkt zu berücksichtigen, wurde Messpunkt 2 prozentual zur Länge des Gesamtaufbaus definiert, wie in Abbildung 6-29 gezeigt. Der Faktor 0,065 stellt das Verhältnis dar, das zwischen den Punkten a und b bei Messpunkt 1 liegt. Dadurch bleiben die Messpunkte bei unveränderter Länge an derselben Stelle. Obwohl die Messpunkte aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 6-29 auf unterschiedlichen Seiten des Werkzeugs dargestellt sind, liegen sie im Simulationsmodell in derselben, zur Längsachse parallelen Ebene. Somit konnte die Beschleunigungsverteilung entlang der Versuchsanordnung berücksichtigt werden. Die Simulation zeigte jedoch, dass der Unterschied zwischen den Messpunkten minimal ist, weshalb im Folgenden nur die Messergebnisse von Messpunkt 1 beschrieben werden.

	Messung 1	Messung 2	Original	Messung 3	Messung 4	Messung 5
Länge:	-50 mm	-25 mm	±0 mm	25 mm	+50 mm	+75 mm
Durchmesser:	-4 mm	-2 mm	±0 mm	2 mm	+4 mm	+6 mm

Tabelle 6-6: Längen- und Durchmesseränderung bei der Untersuchung

Die Simulationen wurden bei unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt, um den Einfluss der Erregerfrequenz auf die Änderungen der Bauteilgrößen zu analysieren. Dabei wurden der Durchmesser und die Länge systematisch verändert. Diese Änderungen sind in Tabelle 6-6 festgelegt. Die Anzahl der Messungen stellt einen Kompromiss zwischen der Anzahl der Messungen und der Größe der Änderungen dar. Bei der Variation der Dichte war keine systematische Änderung möglich, da die Dichte materialabhängig ist. Daher wurden Materialien untersucht, die für die Fertigung infrage kommen. Ziel der Untersuchung war es, eine fundierte Grundlage für die Anpassung der Geometrie und Masse der Bauteile zu erhalten, um die Anforderungen an den Werkzeugträger optimal zu erfüllen.

Einfluss der Unwucht

Die Unwucht ist das zentrale Bauteil für die Funktion des Werkzeugträgers, da die Beschleunigung des gesamten Systems direkt von der Masse und deren Verteilung abhängt. Bei der Änderung des Durchmessers der Unwucht bleibt die Grundgeometrie des Querschnitts erhalten. Der Halbkreis, der die Hauptform der Unwucht darstellt, bleibt unverändert, während nur der Durchmesser variiert. Die Breite des Stegs bleibt ebenfalls unverändert.

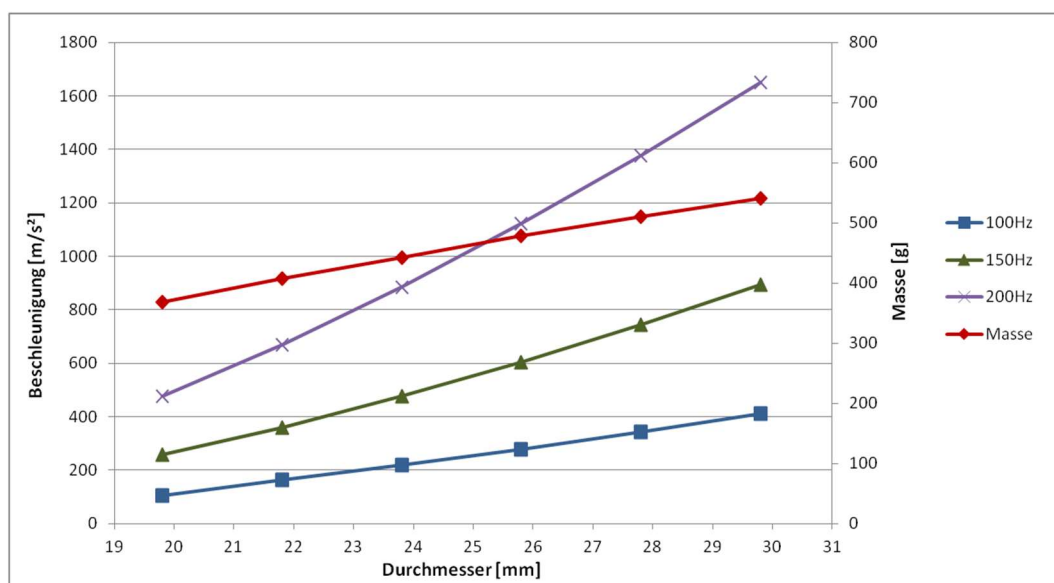


Abbildung 6-30: Beschleunigung und Masse über dem Unwuchtdurchmesser

Abbildung 6-30 zeigt die Änderungen der Masse und der Beschleunigung bei den Frequenzen 100 Hz, 150 Hz und 200 Hz in Abhängigkeit vom Unwuchtdurchmesser. Der Originaldurchmesser beträgt 23,8 mm.

Die Masse der Unwucht (in Abbildung 6-30 rot dargestellt) steigt linear mit dem Durchmesser, während die Beschleunigungswerte quadratisch ansteigen. Dies ist vorteilhaft für das Ziel einer höheren Beschleunigung, da die Masse prozentual weniger erhöht werden muss, um eine größere Beschleunigung zu erzielen. Eine Erhöhung des Durchmessers um 4 mm, was einem Anstieg von 17 % im Vergleich zum Originaldurchmesser entspricht, führt zu einem Massezuwachs von 15 % und einer Beschleunigungssteigerung von 56 %. Dieser überproportionale Anstieg der Beschleunigung ist bei allen Frequenzen gleich. Der quadratische Anstieg der Beschleunigung erklärt sich durch die zusätzliche Zunahme der Exzentrizität der Unwuchtmasse, wie in Abbildung 6-31 zu sehen. Die Exzentrizität der Unwuchtmasse steigt linear mit dem Durchmesser, was in Kombination mit der Massenzunahme den quadratischen Anstieg der Beschleunigung verursacht. Bei einer Durchmessererhöhung um 4 mm steigt die Exzentrizität um 38 %, und die Multiplikation von Masse- und Exzentrizitätszunahme ergibt eine Steigerung der Beschleunigung um etwa 59 %.

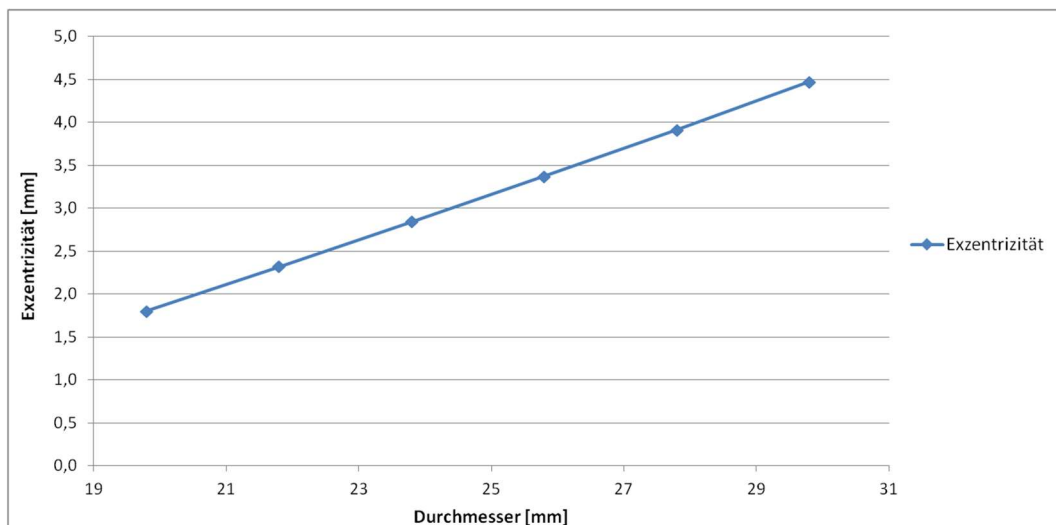


Abbildung 6-31: Exzentrizität der Unwucht über dem Unwuchtdurchmesser

Die Auswirkungen von Änderungen der Unwuchtlänge sind in Abbildung 6-32 dargestellt. Zur Reduzierung des Simulationsaufwands wurden die Analysen nur bei der Frequenz von 200 Hz durchgeführt, da aus vorherigen Versuchen bekannt war, dass die prozentualen Veränderungen bei verschiedenen Frequenzen gleich ausfallen. Bei der Änderung der Unwuchtlänge blieben die Geometrien der Lagersitze unverändert, lediglich der Mittelteil, der die eigentliche Unwucht bildet, wurde verlängert, ohne die Querschnittsgeometrie zu verändern.

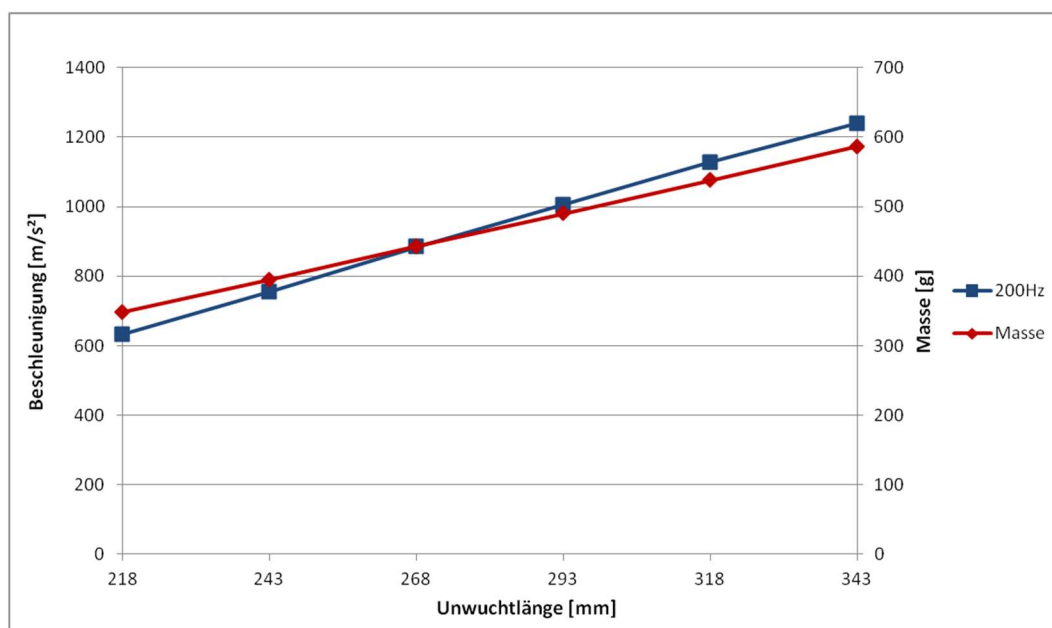


Abbildung 6-32: Beschleunigung und Masse über der Unwuchtlänge

Die Masse der Unwucht nimmt mit zunehmender Länge etwas langsamer zu als die resultierende Beschleunigung. Dies liegt daran, dass nur die nicht rotationssymmetrischen Anteile der Unwucht, die zur Erzeugung der Beschleunigung beitragen, verlängert wurden.

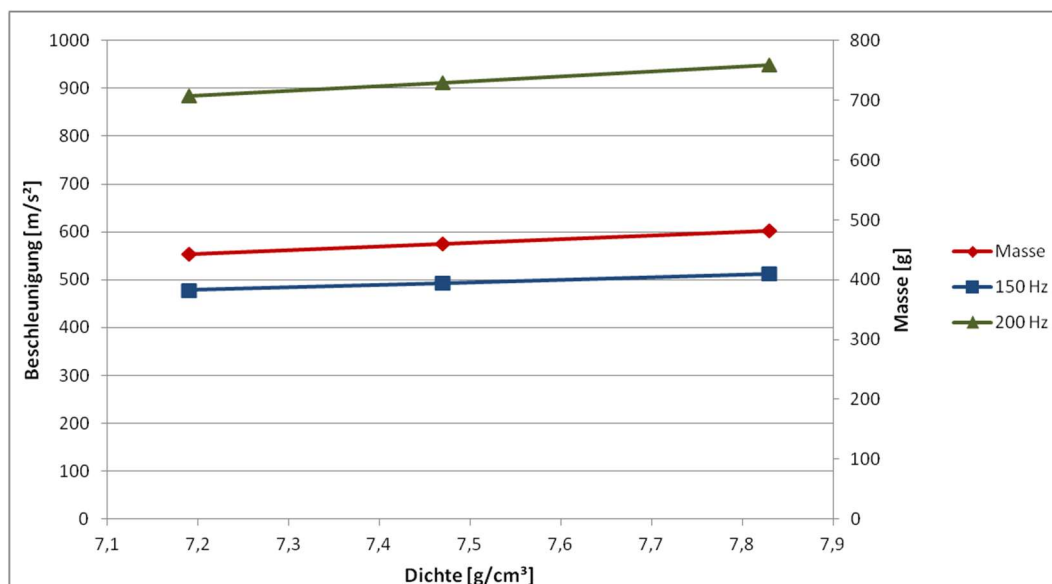


Abbildung 6-33: Beschleunigung und Masse über der Dichte der Unwucht

Bei der Änderung der Dichte des Unwuchtmaterials, wie in Abbildung 6-33 dargestellt, führt eine zunehmende Dichte zu einem linearen Anstieg der Masse sowie der Beschleunigung im gleichen Verhältnis. Für eine möglichst hohe Beschleunigung sollte daher ein Material mit hoher Dichte gewählt werden.

Einfluss des Gehäuses

Die Gehäuseform ist eng an die Gestaltung der Unwucht gekoppelt. Wie bereits festgestellt, zählt die Gehäusemasse zu den Teilen, die die Beschleunigung des Gesamtsystems mindern. Abbildung 6-34 zeigt die simulierten Beschleunigungsamplituden bei verschiedenen Frequenzen im Verhältnis zur Masse, basierend auf dem Durchmesser des Gehäuses. Der ursprüngliche Gehäusedurchmesser beträgt 35 mm. Bei einer Änderung des Außendurchmessers wird der Innendurchmesser entsprechend angepasst, sodass die Wandstärke konstant bleibt. Die geometrische Form über die Länge des Gehäuses bleibt unverändert.

Wie erwartet, nimmt die Beschleunigung bei zunehmender Masse ab, wobei alle Kurven eine lineare Steigung aufweisen. Eine Erhöhung der Masse um 12 % führt beispielsweise zu einer Verringerung der Beschleunigung um 4 %, wie dies bei einer Durchmessererhöhung um 4 mm vom Ausgangszustand aus zu beobachten ist.

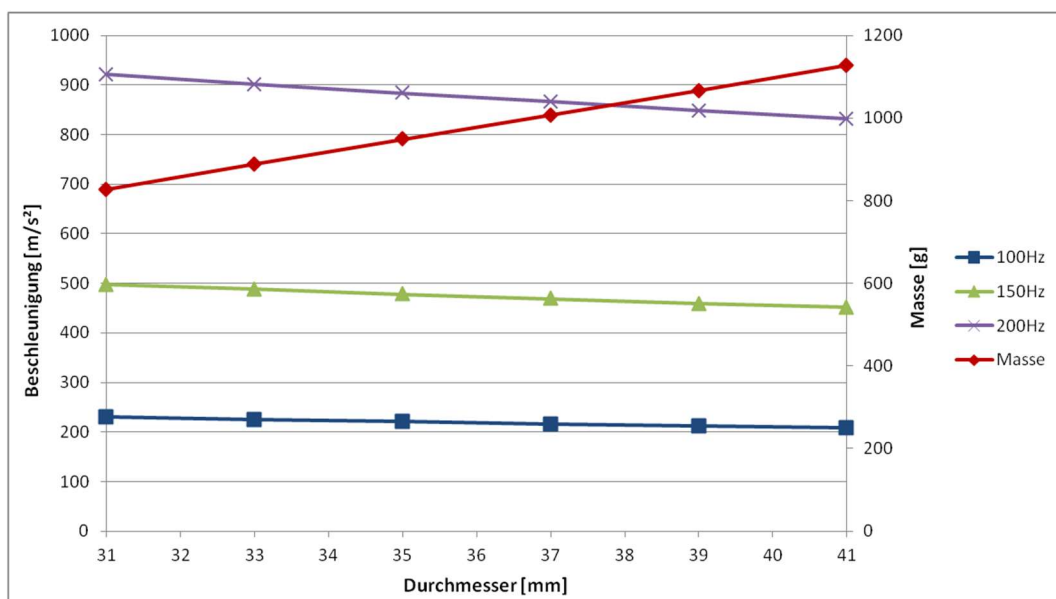


Abbildung 6-34: Beschleunigung und Masse über dem Gehäusedurchmesser

Weiterhin zeigt Abbildung 6-35 die Ergebnisse der Simulation bei einer Frequenz von 200 Hz in Bezug auf die Gehäuselänge. Hierbei wurde auf zusätzliche Frequenzen verzichtet, da festgestellt wurde, dass die Änderungsrate konsistent bleibt. In diesem Dia-

gramm werden die Beschleunigungsamplituden sowohl in Messpunkt 1 als auch in Messpunkt 2 gemessen. Der Vergleich zwischen den beiden Messpunkten zeigt minimale Abweichungen. Die prozentuale Definition des Messpunkts 2 bringt somit keinen signifikanten Vorteil im Vergleich zu Messpunkt 1.

Auch bei einer Änderung der Gehäuselänge ist ein linearer Verlauf sowohl der Masse als auch der Beschleunigungswerte zu erkennen. Während die Masse mit zunehmender Länge steigt, nimmt die Beschleunigung ab. Eine Verlängerung des Gehäuses um 50 mm führt zu einer Massezunahme von 17 %, während die Beschleunigung um 9 % sinkt. Diese Beobachtungen sind mit dem entwickelten Modell konsistent, da das Gehäuse lediglich einen Teil der zur Beschleunigung nicht beitragenden Masse darstellt, wodurch sich Massenänderungen weniger stark auf die Beschleunigung auswirken.

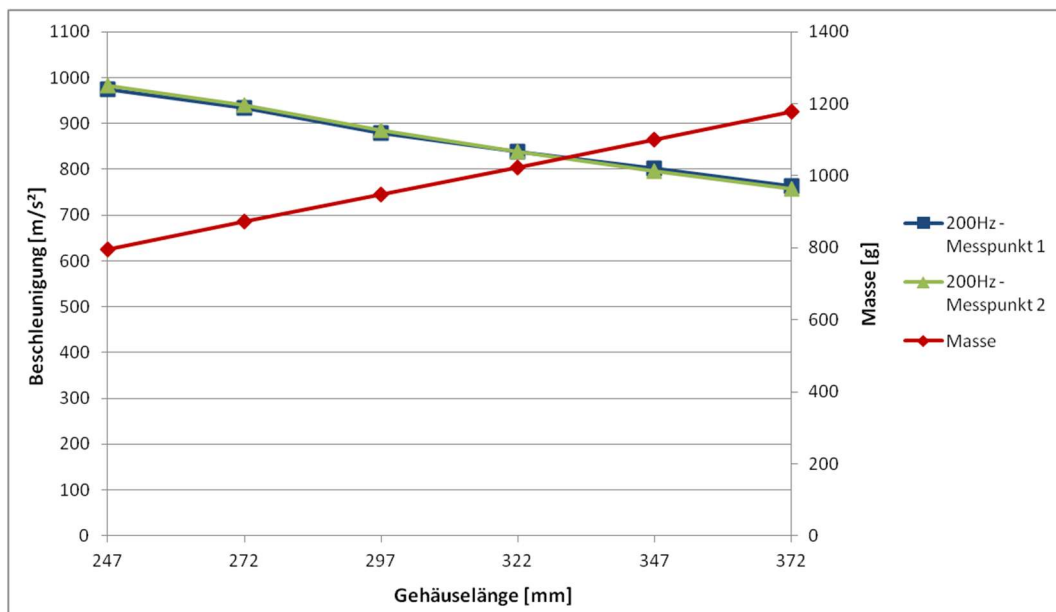


Abbildung 6-35: Beschleunigung und Masse über der Gehäuselänge

Die Veränderung der Dichte des Gehäusematerials spielt eine besondere Rolle, insbesondere bei der Optimierung der Kühlung. Abbildung 6-36 zeigt den Verlauf von Masse und Beschleunigungen in Messpunkt 1 bei 150 Hz und 200 Hz in Abhängigkeit von der Dichte. Die untersuchten Materialien umfassen zwei Aluminiumlegierungen, Gusseisen und Stahl. Die Kurvenverläufe für Masse und Beschleunigung in Abhängigkeit von der Dichte sind linear. Mit zunehmender Dichte steigt die Masse stärker an, als die Beschleunigung abnimmt.

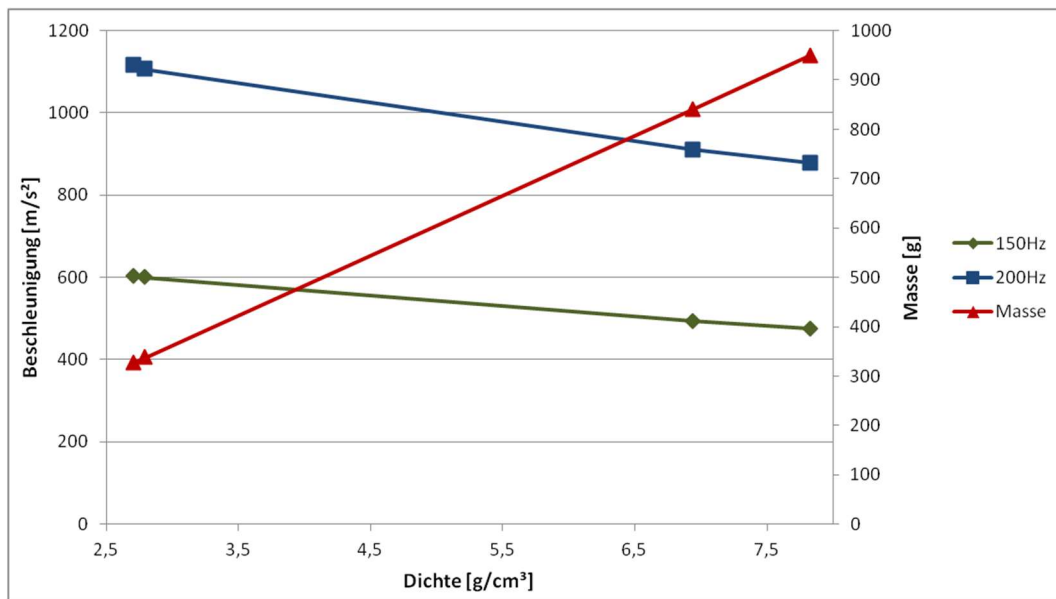


Abbildung 6-36: Beschleunigung und Masse über der Dichte des Gehäuses

Gemeinsame Einflüsse der Unwucht und des Gehäuses

Der Einfluss der gleichzeitigen Veränderung des Unwucht- und Gehäusedurchmessers wird untersucht, da beide Bauteile bei der Konstruktion voneinander abhängig sind. Eine Vergrößerung des Durchmessers der Unwucht erfordert automatisch eine Vergrößerung des Gehäusedurchmessers. Ziel dieser Untersuchung ist es, herauszufinden, ob die kombinierten Änderungen dieselben Ergebnisse liefern wie die Summe der einzelnen Untersuchungen.

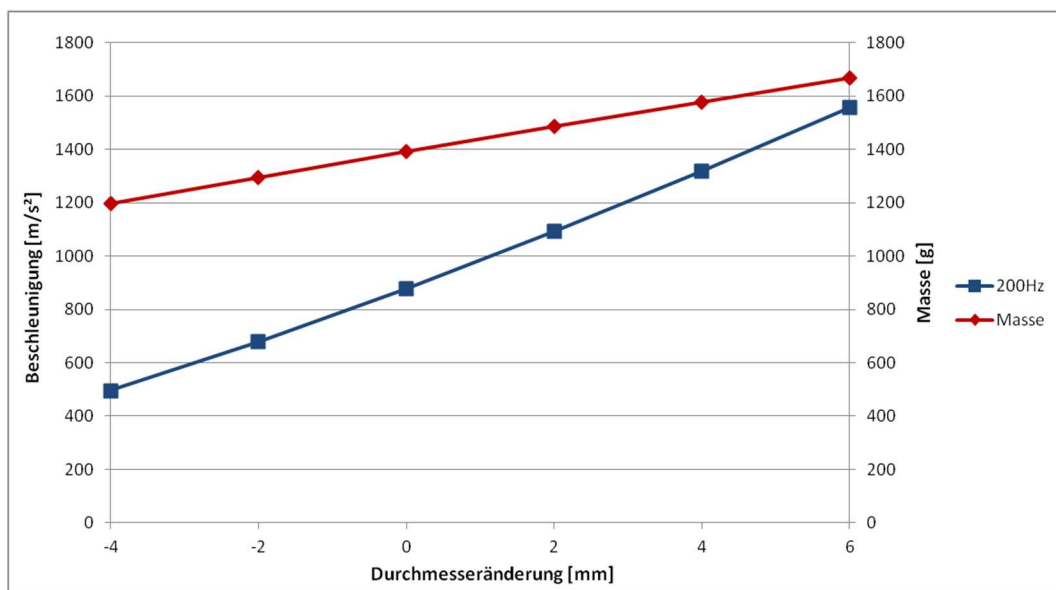


Abbildung 6-37: Beschleunigung und Masse über der gemeinsamen Durchmesseränderung

Um die Bauteile besser vergleichen zu können, sind in den entsprechenden Diagrammen die Veränderungen des Durchmessers beziehungsweise der Länge der Bauteile auf der x-Achse dargestellt. Die Angaben beziehen sich jeweils auf die Originalabmessung des Bauteils. In Abbildung 6-37 sind die Beschleunigung und die kombinierte Masse der beiden Bauteile bei veränderndem Durchmesser aufgetragen. Der Verlauf der Kurven erscheint auf den ersten Blick linear, doch bei näherer Betrachtung zeigt sich ein quadratischer Verlauf der Beschleunigung. Der Anstieg der Beschleunigung ist deutlich größer als der der Masse. Eine Erhöhung des Durchmessers um 4 mm vom Ausgangszustand führt zu einer kombinierten Massezunahme von 13,4 %, während die Beschleunigung um 50,1 % ansteigt.

Es zeigt sich, dass die Beschleunigung bei der kombinierten Änderung des Durchmessers nicht direkt aus der Summe der Einzeluntersuchungen abgeleitet werden kann. Die Abweichung ist zwar gering, aber dennoch vorhanden. Bei der getrennten Untersuchung der Erhöhung des Durchmessers um jeweils 4 mm ergibt sich eine Erhöhung der Beschleunigung um 52 %. In der kombinierten Untersuchung beträgt der Anstieg jedoch nur 50,1 %. Diese Abweichung lässt sich dadurch erklären, dass die geänderten Massen sich bei der gemeinsamen Untersuchung direkt beeinflussen, während dies bei den getrennten Untersuchungen nicht der Fall ist.

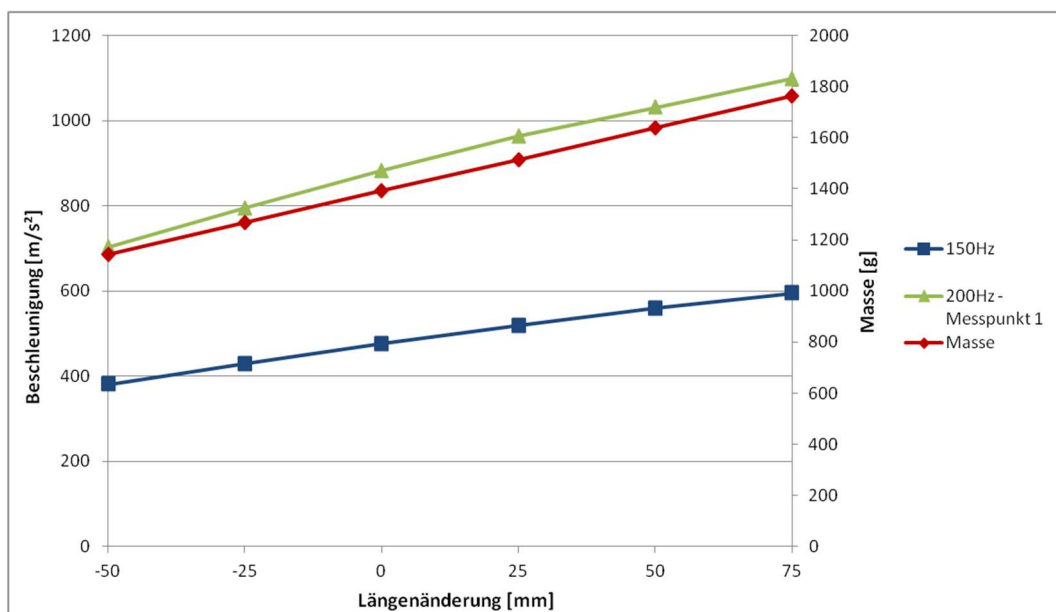


Abbildung 6-38: Beschleunigung und Masse über der gemeinsamen Längenänderung

In Abbildung 6-38 sind die Beschleunigungsamplituden zusammen mit der kombinierten Masse der beiden Bauteile über der gemeinsamen Längenänderung von Unwucht und Gehäuse aufgetragen. Die Masse steigt linear mit der Längenänderung, während die Beschleunigungen bei 150 Hz und 200 Hz einen leicht degressiven Verlauf zeigen. Die Steigungen im betrachteten Bereich sind jedoch sehr ähnlich. Bei einer Verlängerung um 50

mm erhöht sich die Masse um 17,7 %, die Beschleunigung bei 150 Hz um 17,2 % und bei 200 Hz um 18,6 %.

Einfluss des Werkzeugdurchmessers

Auch der Einfluss des Werkzeugs auf die Beschleunigung und Masse des Aufbaus wird untersucht. Hierbei wird der Durchmesser des Werkzeugs variiert, um herauszufinden, ob der Aufbau auch in größeren Rohren verwendet werden kann. Eine einfache Möglichkeit wäre, nur den Werkzeugdurchmesser zu vergrößern und die übrigen Komponenten unverändert zu lassen. Diese Lösung ist jedoch nur praktikabel, wenn die Beschleunigungswerte nicht zu stark abnehmen und dennoch ausreichend hoch sind, um die Rohre effektiv zu dekontaminieren.

In Abbildung 6-39 sind die durchschnittliche Amplitude der Beschleunigung am Messpunkt 1 sowie die Masse des Werkzeugs über dem Durchmesser des Werkzeugs dargestellt. Der ursprüngliche Durchmesser des Werkzeugs beträgt 49 mm. Es zeigt sich, dass die Masse des Werkzeugs linear ansteigt, während die Beschleunigung linear abnimmt. Eine Erhöhung des Werkzeugdurchmessers um 4 mm führt zu einer 30 % höheren Masse, jedoch nur zu einer 10 % geringeren Beschleunigung. Diese moderate Abnahme der Beschleunigung deutet darauf hin, dass eine Vergrößerung des Werkzeugdurchmessers eine praktikable Lösung sein könnte, solange die Abnahme der Beschleunigung innerhalb akzeptabler Grenzen bleibt.

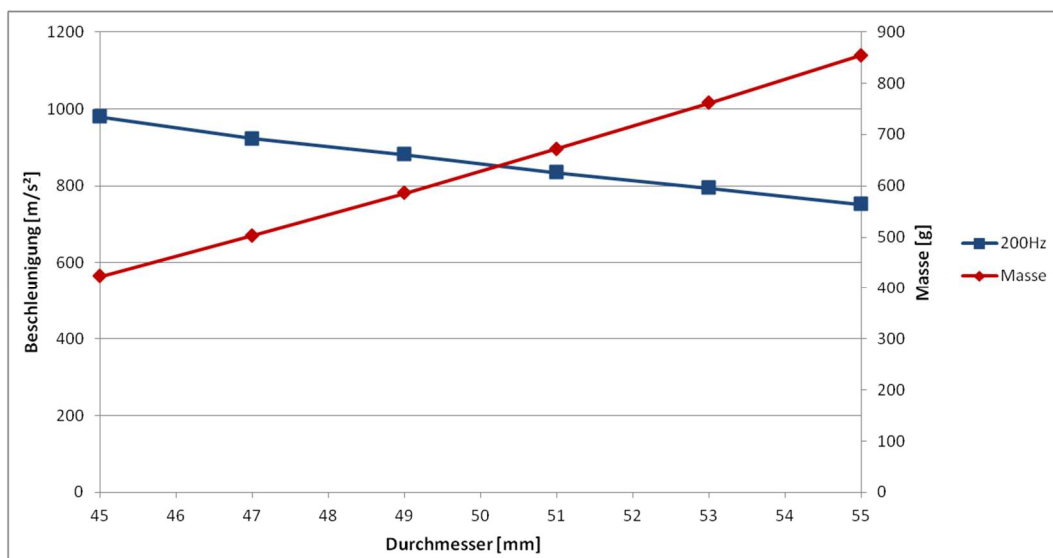


Abbildung 6-39: Beschleunigung und Masse über dem Durchmesser des Werkzeugs

Ein weiterer bedeutender Aspekt ist die theoretisch verfügbare Kraft, die durch die Beschleunigung auf das Werkzeug ausgeübt wird. Diese Kraft ist entscheidend für die Stärke der Schläge, die bei der Dekontamination der Rohre auf die Ablagerungen einwirken. Sie

kann durch die Masse des Werkzeugs und die Beschleunigung berechnet werden. In Abbildung 6-40 ist die theoretische Kraft zusammen mit der Masse des Werkzeugs über den Werkzeugdurchmesser aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Kraft mit zunehmendem Werkzeugdurchmesser eine leicht degressive Kurve aufweist. Das bedeutet, dass der Zuwachs an Kraft mit steigendem Werkzeugdurchmesser weniger effizient wird, was berücksichtigt werden muss, wenn das Werkzeug für größere Rohrdurchmesser ausgelegt wird.

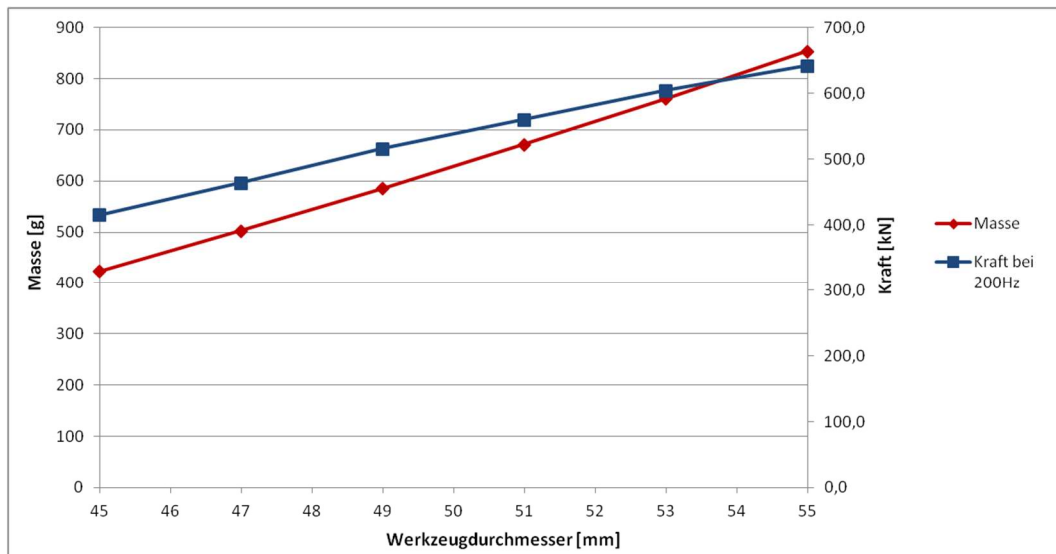


Abbildung 6-40: Theoretische Kraft und Masse des Werkzeugs über dem Durchmesser

6.7.5.2 Qualifizierung des Dekontaminationsverfahrens

Die Qualifizierung des Dekontaminationsverfahrens im Rahmen des Projekts stellt einen entscheidenden Schritt zur Überprüfung der Praxistauglichkeit dar. Dabei wurde das optimierte Verfahren, das im Laufe der Entwicklung kontinuierlich verbessert und angepasst wurde, unter realen Einsatzbedingungen getestet. Die Durchführung dieser Qualifizierungsversuche ermöglichte es, die im Labor und in den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse in einer praktischen Umgebung zu validieren und die theoretischen Annahmen zu überprüfen.

Anwendung der Methodik

Wie in Kapitel 5 dieser Arbeit beschrieben, basierte die Entwicklung des Dekontaminationsverfahrens auf einem modellbasierten hybriden Ansatz, der sowohl virtuelle Simulationen als auch praktische Tests beinhaltete. Mithilfe dieser Methodik war es möglich, frühzeitig in der Entwicklungsphase erste Rückschlüsse auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu ziehen. Im Zuge der Qualifizierungsversuche wurde diese Methodik weiter angewandt, um gezielt Parameter zu variieren und die Auswirkungen auf das Abtragverhalten zu untersuchen.

Durch die Anwendung des hybriden Vorgehensmodells konnten die Simulationsergebnisse direkt in die physikalischen Versuche integriert werden. Dies war insbesondere deshalb von Bedeutung, weil während der Dekontaminationsprozesse in der Praxis eine Vielzahl von Einflussfaktoren wie Materialbeschaffenheit, Rohrgeometrie und Umweltbedingungen berücksichtigt werden müssen. Die in den Simulationen getesteten Parameter wie die Vibrationseinstellungen des Werkzeugs, die Beschaffenheit der Ablagerungen und die Geometrie des Werkzeugs bildeten die Grundlage für die praktische Validierung. Hierbei wurden unterschiedliche Rohrtypen und Ablagerungsszenarien getestet, um die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Verfahrens zu gewährleisten.

Integration virtueller und praktischer Versuche

Im Verlauf der praktischen Tests wurde deutlich, dass die Simulationen die Abläufe und Belastungen im Rohr realitätsnah abbildeten. Insbesondere das in Abschnitt 6.7.3 beschriebene Modell zur Vorhersage des Abtragsverhaltens hat sich als nützlich erwiesen. Durch die Parametrisierung der Simulationsmodelle konnten die Werkzeuge vorab optimal auf die unterschiedlichen Anwendungsfälle ausgelegt werden, sodass die Anzahl der notwendigen Testläufe minimiert und die Strahlenbelastung der Mitarbeiter reduziert wurde.

Ein zentraler Aspekt der Qualifizierung war die Überprüfung der Belastungsgrenzen des Werkzeugs, insbesondere im Hinblick auf die Dauerbelastung und die durch die Vibrationen entstehenden mechanischen Beanspruchungen. Die Simulationen hatten bereits gezeigt, dass die maximale Belastung des Werkzeugs in bestimmten Frequenzbereichen kritisch werden könnte. Durch die praktischen Versuche konnte dies jedoch genauer überprüft und in die abschließende Auslegung des Werkzeugs integriert werden. Die Flexibilität des in Abschnitt 6.7.3 entwickelten Modells ermöglichte es, diese Grenzbereiche gezielt zu untersuchen und Anpassungen am Design des Werkzeugs vorzunehmen, um eine langfristige Belastbarkeit sicherzustellen.

Ergebnisse der Qualifizierungsversuche

Die Ergebnisse der praktischen Tests bestätigten die in den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse weitgehend. Das Dekontaminationsverfahren konnte die geforderten Abtragsraten in den meisten Szenarien erreichen und erwies sich als zuverlässig. Insbesondere in hochgradig kontaminierten Rohren, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften und Ablagerungen als besonders anspruchsvoll galten, zeigte das Verfahren eine hohe Effizienz. Das hybride Vorgehen aus virtueller Simulation und praktischen Tests ermöglichte es, die Anzahl der notwendigen physischen Versuche deutlich zu reduzieren und gleichzeitig präzise Aussagen über das Verhalten des Systems in unterschiedlichen Umgebungen zu treffen.

Insgesamt wurde deutlich, dass die im Simulationsmodell getroffenen Annahmen, insbesondere bezüglich der Materialparameter der Ablagerungen und der Vibrationseinstellungen, sehr gut mit den realen Bedingungen übereinstimmten. Diese Übereinstimmung konnte die Relevanz der in Abschnitt 6.7.3 entwickelten Methodik untermauern, da sie als Grundlage für die erfolgreiche Qualifizierung des Dekontaminationsverfahrens diente.

Fazit der Qualifizierung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik maßgeblich zur erfolgreichen Qualifizierung des Dekontaminationsverfahrens beigetragen hat. Durch die enge Verzahnung von Simulation und Praxis konnte ein iterativer Entwicklungsprozess etabliert werden, der es ermöglichte, sowohl die technischen Anforderungen als auch die Sicherheitsstandards zu erfüllen. Die Ergebnisse der Qualifizierungsversuche bestätigen, dass das entwickelte Verfahren effizient und zuverlässig unter den getesteten Bedingungen arbeitet und somit für den realen Einsatz in der Rohrdekontamination geeignet ist.

Die Weiterentwicklung des Simulationsmodells, das während der Qualifizierungsphase ständig aktualisiert und verfeinert wurde, bietet darüber hinaus die Möglichkeit, das Verfahren künftig auf andere Anwendungsbereiche zu übertragen und weiter zu optimieren. Dies zeigt, dass die in dieser Arbeit entwickelte Methodik nicht nur für die aktuelle Anwendung von Bedeutung ist, sondern auch eine Grundlage für zukünftige Entwicklungen und Erweiterungen im Bereich der Rohrdekontamination darstellt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit lag der Fokus auf der Entwicklung und Anwendung eines hybriden modellbasierten Vorgehensmodells im Kontext der virtuellen Produktentwicklung. Angesichts der stetig zunehmenden Komplexität moderner Produkte, insbesondere in interdisziplinären Entwicklungsprozessen, war es das Ziel, eine Methodik zu entwickeln, die sowohl agile als auch konventionelle Ansätze integriert. Im Mittelpunkt der Arbeit stand die Schaffung eines Rahmens, der es erlaubt, iterative, flexible und gleichzeitig methodisch fundierte Entwicklungsprozesse zu gestalten.

In Kapitel 5 wurde das hybride Vorgehensmodell umfassend beschrieben, bei dem agile Methoden mit der modellbasierten und virtuellen Produktentwicklung verknüpft werden. Die Anwendung dieser Methodik zeigte, dass sie nicht nur zur Beschleunigung von Entwicklungsprozessen beiträgt, sondern auch die Qualität der Ergebnisse verbessert. Die iterative Vorgehensweise in Kombination mit realen Prototypen ermöglichte es, frühzeitig und fortlaufend Feedback zu sammeln, was zu einer signifikanten Reduktion von Fehlern und notwendigen Korrekturen führte. Das hybrid-modellbasierte Vorgehen erwies sich als besonders nützlich in der Handhabung komplexer Projekte, die multidisziplinäre Zusammenarbeit und häufige Änderungen der Anforderungen erfordern.

Methoden und Ergebnisse

Ein zentraler Beitrag dieser Arbeit war die Kombination von virtuellen Simulationsmethoden und physischen Prototypen, die eine iterative Optimierung ermöglichte. Dank der virtuellen Werkzeuge, wie sie in SimViDekont eingesetzt wurden, konnten zahlreiche Geometrievarianten und Belastungsszenarien durch Simulationen getestet werden, bevor physische Prototypen erstellt wurden. Durch die Parametrisierung der Teilsimulationsmodelle und die Automatisierung der Modellgenerierung (Abschnitt 6.7.3.2 und 6.7.4.2) konnten neue Designs effizient erstellt und validiert werden. Dies verkürzte nicht nur die Entwicklungszeit, sondern senkte auch die Kosten durch die Reduktion von physischen Prototypen.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle wurden in der Praxis durch reale Testumgebungen ergänzt, wodurch sich die Simulationsergebnisse validieren ließen. Durch diese hybride Methode war es möglich, das Beste aus beiden Welten – reale und virtuelle Tests – zu kombinieren und so die Entwicklung iterativ voranzutreiben. Dies gewährleistete eine systematische Analyse der Auswirkungen verschiedener Systemgrößen wie beispielsweise der Unwuchtmasse und Gehäusegeometrie auf die Schwingungseigenschaften und die Leistungsfähigkeit des Werkzeugs.

Die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik hat gezeigt, dass durch die Kombination von agilen und konventionellen Ansätzen eine hohe Flexibilität in der Produktentwicklung erreicht werden kann. Insbesondere der iterative Charakter des Prozesses ermöglichte es, Anpassungen und Verbesserungen in verschiedenen Phasen der Entwicklung durchzuführen, ohne den Gesamtprozess zu verlangsamen.

Kritische Reflexion der Ergebnisse

Trotz der erfolgreichen Validierung und der positiven Ergebnisse gibt es Aspekte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht umfassend untersucht werden konnten. Ein wesentlicher Punkt ist die Limitierung der Methodik in hochgradig kreativen Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Zwar bietet das hybride Vorgehen eine gute Grundlage für strukturelle Prozesse, jedoch ist die Anwendung in frühen Innovationsphasen, in denen weniger strukturierte Kreativmethoden benötigt werden, noch ausbaufähig. Hier wäre eine weitergehende Forschung erforderlich, um zu prüfen, wie kreative Prozesse stärker in die Methodik integriert werden können.

Ein weiteres Gebiet, das nur teilweise behandelt werden konnte, ist die Skalierbarkeit der Methodik auf große Entwicklungsprojekte. Während die Methodik in kleinen bis mittelgroßen Projekten wie SimViDekont erfolgreich war, bleibt die Frage offen, wie sie sich in großen Projekten mit mehreren Hundert Beteiligten umsetzen lässt. Die Komplexität der Abstimmungsprozesse könnte hier möglicherweise zu einem Hindernis werden. Weitere Untersuchungen wären notwendig, um hier geeignete Maßnahmen zur Skalierung zu entwickeln.

Auch datenschutzrechtliche und sicherheitsrelevante Aspekte wurden im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande behandelt. Angesichts der zunehmenden Digitalisierung und der Verarbeitung großer Datenmengen während der Produktentwicklung wird dies jedoch in Zukunft ein immer relevanteres Thema werden. Hier sollte in Zukunft ein stärkerer Fokus auf die Entwicklung von Konzepten für den Schutz sensibler Entwicklungsdaten gelegt werden, insbesondere im Zusammenhang mit der Nutzung von cloudbasierten Entwicklungsumgebungen.

Zukünftige Forschung und Entwicklung

Für die Weiterentwicklung der Methodik ergeben sich aus den genannten Limitationen mehrere Forschungsfelder. Ein zentraler Punkt ist die Verbesserung der Integration agiler Methoden in stark regulierte Umgebungen. Hier könnte insbesondere die Kombination mit formalen, normierten Vorgehensmodellen, wie sie in sicherheitskritischen Branchen üblich sind, weiter optimiert werden. Eine genaue Untersuchung dieser Verknüpfungen könnte wertvolle Erkenntnisse liefern, wie agile und konventionelle Vorgehensweisen noch stärker kombiniert werden können, ohne an Sicherheit oder Zuverlässigkeit zu verlieren.

Ein weiteres Forschungsgebiet liegt in der Erweiterung der Methodik um datenbasierte Entscheidungsfindungsprozesse. Insbesondere der Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Machine-Learning bietet Potenzial, die Effizienz von Entscheidungsprozessen weiter zu steigern. Hier könnte eine stärkere Verknüpfung mit IoT-Daten und deren Analyse zu einer verbesserten vorausschauenden Planung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen führen.

Schließlich bietet auch der Bereich Virtual und Augmented Reality zahlreiche Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung der Methodik. Durch die Verknüpfung von realen und virtuellen Prototypen können Entwicklungsprozesse weiter beschleunigt und die Kommunikation zwischen den verschiedenen Disziplinen verbessert werden. Erste Ansätze in dieser Richtung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt, jedoch besteht hier noch großes Potenzial für weitergehende Forschung und die praktische Anwendung in der Industrie.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in dieser Arbeit entwickelte Methodik eine vielversprechende Grundlage für die zukünftige Produktentwicklung bietet. Die Kombination von agilen Methoden mit modellbasierten Ansätzen ermöglicht es, die Herausforderungen der modernen, interdisziplinären Produktentwicklung erfolgreich zu meistern. Gleichzeitig bieten die identifizierten Forschungspotenziale zahlreiche Ansätze für die Weiterentwicklung der Methodik und deren Anpassung an zukünftige technologische und organisatorische Veränderungen.

Literaturverzeichnis

- (DIN), D. I. f. N. e., 2004. *Arbeits- und Produktionssysteme*. s.l.:s.n.
- (DIN), D. I. f. N. e., 2009. *DIN 69901-5:2009-01. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. s.l.:Beuth Verlag.
- (DIN), D. I. f. N. e., 2009. *DIN 69901-5:2009-01. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. Berlin: s.n.
- (DIN), D. I. f. N. e., 2015. *DIN EN ISO 9000. Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. s.l.:Beuth Verlag.
- Abramovici , M., Neubach, M., Fathi, M. & Holland , A., 2008. PLM-basiertes Integrationskonzept für die Rückführung von Produktnutzungs informationen in die Produktentwicklung. *wt Werkstattstechnik online*, pp. 561–567.
- Ahlemann, F. T. F. & V. K., 2006. *Integration von IT-Systemen*. s.l.:Springer-Verlag.
- Alisch, K., Arentzen, U. & Winter, E., 2013. *Gabler Wirtschaftslexikon*. s.l.:Springer-Verlag.
- Alisch, K., Winter, E. & Arentzen, U., 2013. *Gabler Wirtschaftslexikon*. 16 Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Allwein, F., 2010. *Wissensmanagement und Innovation*. s.l.:s.n.
- Ambler, S. W., 2002. *Agile Modeling: Effective Practices for Extreme Programming and the Unified Process*. s.l.:John Wiley & Sons.
- Ambos, F., Gese, C. & Aminy, A., 2012. *Neue Verfahrenstechnik zur Dekontamination und Probenahme in Rohrleitungen mittels Vibrationstechnik : Schlussbericht zum Forschungsvorhaben*. s.l.:Sat. Kerntechnik GmbH.
- Anderl, R. & Liese, H., 2003. Knowledge-based and agent-supported modeling in the field of parametric 3D-CAD-systems.
- Anderson, D. J., 2010. *Kanban: Successful Evolutionary Change for Your Technology Business*. s.l.:Blue Hole Press.
- Baez-Lopez, D., Guerrero-Castro, F. E. & Cervantes-Villagómez, O. D., 2012. *Advanced Circuit Simulation Using Multisim Workbench*. Springer-Verlag Hrsg. s.l.:s.n.
- Becker, J., 2012. *Prozessmanagement*. s.l.:Springer-Verlag.
- Beck, K., 2004. *Extreme Programming Explained: Embrace Change (2nd ed.)*. s.l.:Addison-Wesley.
- Beck, K. B. M. v. B. A. e. a., 2001. *Manifesto for Agile Software Development*. [Online] Available at: <https://agilemanifesto.org/>
- Behrends, S., 2010. *Wissen und Wissensmanagement*. s.l.:BIS-Verlag der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

- Beierle, C. & Kern-Isberner, G., 2008. *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. s.l.:Springer-Verlag.
- Bell, J., 2009. *Doing Your Research Project: A Guide for First-Time Researchers*. s.l.:McGraw-Hill Education.
- Bernstein, H., 2023. *Elektronik und Mechanik: Multisim™ und EAGLE. 5. Auflage*. Wiesbaden: Springer-Vieweg.
- Bishop, C. M., 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning*. s.l.:Springer-Verlag.
- Boehm, B. & T. R., 2006. *Balancing Agility and Discipline*. s.l.:s.n.
- Bogner, W. C. & Bansal, P., 2007. Knowledge Management as the Basis of Sustained High Performance. *Journal of Management Studies*, pp. 44(1), 165–188.
- Borowski, E., 2011. *Agiles Vorgehensmodell zum Management komplexer Produktionsanläufe mechatronischer Produkte in Unternehmen mit mittelständischen Strukturen*. s.l.:Fortschritt-Berichte VDI : Reihe 16, Technik und Wirtschaft ; 200.
- Borowski, E. & Henning, K., 2013. Agile Prozessgestaltung und Erfolgsfaktoren im Produktionsanlauf als komplexer Prozess. In: *Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2011/2012* . s.l.:Springer-Verlag, pp. (pp.27–40).
- Bortz, J. & Döring, N., 2006. *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. s.l.:Springer-Verlag.
- Brandt-Pook, H. & Kollmeier, R., 2020. *Softwareentwicklung kompakt und verständlich: Wie Softwaresysteme entstehen*. s.l.:Springer Vieweg.
- Browning, T. & Eppinger, S., 2005. *Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development*. s.l.:IEEE Transactions.
- Brugger-Gebhardt, S., 2016. *Die DIN EN ISO 9001:2015 verstehen: Der umfassende und praxisnahe Leitfaden zur neuen Norm*. s.l.:Beuth Verlag.
- Buitelaar, P. & Cimiano, P., 2008. *Ontology Learning and Population: Bridging the Gap between Text and Knowledge*. s.l.:Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Vol. 167, IOS Press. ISBN: 978-1-58603-818-2.
- Bullinger, H.-J., 1986. *Systematische Montageplanung : Handbuch für d. Praxis*. s.l.:Hanser-Verlag.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007. *Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs (Bericht I)*. Bonn: s.n.
- Bundesministerium für Wirtschaft, 2017. *Jahreswirtschaftsbericht 2017*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft.
- Cervone, H. F., 2011. *Understanding agile project management methods using Scrum*. s.l.:s.n.

- Chakrabarti, A., Shea, K., Lohan, D. J. & Cagan, J., 2020. Generative Design: Reframing the Role of the Designer in Early-Stage Design Process. *Journal of Mechanical Design – ASME Digital Collection*.
- Chaudhuri, S. & Dayal, U., 1998. *An Overview of Data Warehousing and OLAP Technology*. s.l.:ACM.
- Chua, C. K., Leong, K. F. & Lim, C. S., 2010. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. s.l.:World Scientific Publishing.
- Coallier, F., 2007. *Standards, Agility and Engineering*. s.l.:IEEE Xplore.
- Cockburn, A., 2007. *Agile Software Development: The Cooperative Game (2nd ed.)*. s.l.:Addison-Wesley Professional.
- Cohn, M., 2004. *User Stories Applied: For Agile Software Development*. s.l.:Addison-Wesley Professional.
- Cohn, M., 2010. *Succeeding with Agile: Software Development Using Scrum*. s.l.:Addison-Wesley.
- Cooper, R. G., 1990. Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products. In: s.l.:Business Horizons, pp. 44–54.
- Cooper, R. G., 2008. Perspective: The Stage-Gate® Idea-to-Launch Process—Update, What's New, and NexGen Systems. 25(3). *Journal of Product Innovation Management*, pp. 213–232.
- Czichos, H., 2015. *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*. 3 Hrsg. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
- Dangelmaier, W., Kösters, C. & Kress, S., 2002. Wissensbasiertes Änderungsmanagement für Kennzahlensysteme im Strategischen Controlling. *Controller Magazin 4/2002*, pp. 388–395.
- Davenport, T. H. & Prusak, L., 1998. *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. Harvard Business School Press. s.l.:s.n.
- Deming, W. E., 1986. *Out of the Crisis*. s.l.:MIT Press.
- DGHH, 2002. *Wissensmanagement in Unternehmen*. s.l.:s.n.
- Dikert, K., Paasivaara, M. & Lassenius, C., 2016. Challenges and success factors for large-scale agile transformations: A systematic literature review. *Journal of Systems and Software*, pp. 119, 87–108.
- Dudenredaktion, 2004. *Duden: die deutsche Rechtschreibung*. s.l.:Dudenredaktion.
- Eccles, R. G. & Johnson, T. H., 1988. *The Transfer Pricing Problem: A Theory for Practice*. s.l.:Lexington Books.
- Eckstein, J., 2009. *Agile Softwareentwicklung mit verteilten Teams*. s.l.:dpunkt.verlag.
- Eckstein, J., 2013. *Agile Softwareentwicklung mit Scrum, XP und Kanban: Grundlagen und Best Practices für den agilen Wandel (3. Auflage)*. s.l.:dpunkt.verlag.
- Ehrlenspiel, K., 2009. *Integrierte Produktentwicklung*. s.l.:Hanser Verlag.

- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A. & Lindemann, U., 2007. *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produkterstellung*. s.l.:Springer-Verlag.
- Eigner, M., Gilz, T. & Zafirov, R., 2012. *Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development*. Dubrovnik/Kroatien, 12th International Design Conference, p. 1667–1676.
- Eigner, M., Roubanov, D. & Zafirov, R., 2014. *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Eigner, M. & Stelzer, R., 2001. *Produktdatenmanagement-Systeme: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. s.l.:Springer-Verlag.
- Eigner, M. & Stelzer, R., 2009. *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2 Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Estefan, J. A., 2008. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. *INCOSE MBSE Initiative, INCOSE*.
- Farkisch, K., 2011. *Data-Warehouse-Systeme kompakt*. s.l.:Springer-Verlag.
- Ford, D. & Ryan, C., 1981. *Taking technology to market*. s.l.:Harvard Business Review.
- Forsberg, K. & Mooz, H., 1991. The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle. *Engineering Management Journal*, pp. 3(3), 36–43.
- Forschungskuratorium Maschinenbau. überarbeitete Ausgabe, 2012. *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*, s.l.: VDMA-Verlag, ISBN 978-3-8163-0605-4.
- Fujimoto, R. M., 2015. *Parallel and Distributed Simulation Systems*. s.l.:Wiley-Interscience.
- Fumio, H., Masayoshi, T. & Toshio, F., 1996. Mechatronics-" What Is It, Why, and How?". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Issue 1, pp. 1–4.
- Gausemeier, J. et al., 2018. *Innovationen für die Märkte von morgen: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. München: Hanser Verlag.
- Gausemeier, J. & Feldmann, K., 2006. *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. s.l.:Carl Hanser Verlag..
- Gausemeier, J. et al., 2016. *Strategische Produktplanung – Adaptierbare Methoden, Prozesse und IT-Werkzeuge für die Planung der Marktleistungen von morgen*. s.l.:Heinz Nixdorf Insitut.
- Gelermann, R., Schulz, H. & Küppers, C., 2003. *"Mengenaufkommen an NORM-Rückständen für das deutsche Entsorgungskonzept."* Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesamtes für Strahlenschutz (SR 2416), Bonn: Bundesamt für Strahlenschutz, Bonn.

- Gelermann, R., Schulz, H. & Küppers, C., 2006. *Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs. Abschlussbericht (StSch 4416)*. Nordhausen: Bundesamt für Strahlenschutz.
- Gero, J. S. & Kannengiesser, U., 2004. The Situated Function-Behaviour-Structure Framework. *Design Studies*, pp. 25(4), 373–391.
- Gilb, T., 1988. *Principles of Software Engineering Management*. s.l.:Addison-Wesley.
- Gloger, B., 2016. *Scrum: Produkte zuverlässig und schnell entwickeln*. s.l.:Hanser-Verlag.
- Goll, J. & Hommel, D., 2015. *Mit Scrum zum gewünschten System*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A., 2016. *Deep Learning*. s.l.:MIT Press.
- Griffin, A. & Hauser, J. R., 1993. The Voice of the Customer. *Marketing Science*, pp. 12(1), 1–27.
- Gronau, N., 2009. *Wissen prozessorientiert managen. Methode und Werkzeuge für die Nutzung des Wettbewerbsfaktors Wissen in Unternehmen*. München: Oldenbourg Verlag.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. & Palaniswami, M., 2013. *Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions*. s.l.:Future Generation Computer Systems.
- Gunes, M. H., Peter, S., Givargis, T. & Vahid, F., 2014. A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, pp. 8(12), 4242–4268.
- Günther, H.-O. & Tempelmeier, H., 2005. *Produktion und Logistik*. s.l.:s.n.
- Hansen, M. T., Nohria, N. & Tierney, T., 1999. *What's Your Strategy for Managing Knowledge*. s.l.:s.n.
- Hehenberger, P., 2011. *Computerunterstützte Fertigung: Eine kompakte Einführung*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Heisig, P. & Ortmann, G., 2005. *Integration von Wissensmanagement in Geschäftsprozesse: Methode und Werkzeuge*. s.l.:Springer-Verlag.
- Hellingrath, B. & Kuhn, A., 2002. *Supply Chain Management: Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*. s.l.:Springer-Verlag.
- Highsmith, J., 2009. *Agile Project Management: Creating Innovative Products*. s.l.:Addison-Wesley.
- Hirzel, M., 2005. *Prozessmanagement in der Praxis: Wertschöpfungsketten planen, optimieren und erfolgreich steuern*. s.l.:Gabler.
- Hofer-Alfeis, J. & van der Spek, R., 2003. *The Knowledge Strategy Process*. In: Holsapple, C.W. (Ed.), *Handbook on Knowledge Management*. s.l.:Springer-Verlag.

- Höhn, R. & Rausch, A., 2008. *Das V-Modell XT: Grundlagen, Methodik und Anwendungen*. s.l.:Springer-Verlag.
- Hummel, O., 2011. *Aufwandsschätzungen in der Software- und Systementwicklung kompakt*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Jørgensen, M., 2004. *A review of studies on expert estimation of software development effort*. s.l.:s.n.
- Jørgensen, M., 2013. *The influence of selection bias on effort overruns in software development*. s.l.:s.n.
- Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J., 2013. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Frankfurt/Main: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. s.l.:Forschungsunion.
- Kampffmeyer, U., 2006. *Enterprise Content Management (ECM) – Dokumenten-, Content- und Workflow-Management*. s.l.:Project Consult.
- Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R. & Khan, S., 2012. *Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges*. s.l., IEEE.
- Kirchner, E., 2020. *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. s.l.:Springer-Vieweg.
- Knaster, R. & Leffingwell, D., 2018. *SAFe 4.5 Distilled: Applying the Scaled Agile Framework for Lean Enterprises*. s.l.:Addison-Wesley Professional.
- Kohl, H. & Orth, R., 2011. *Praxisleitfaden Wissensmanagement: Erfolgsfaktoren und Umsetzung*. s.l.: Fraunhofer Verlag.
- Komus, A., 2013. Agile Methoden in der Praxis — Studie zur Anwendung und Zufriedenheit.. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik: Vol. 50, No. 2. Springer. PISSN: 2198-2775*, pp. 84–91.
- Kornmeier, M., 2012. *Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten*. s.l.:Physica-Verlag.
- Kossiakoff, A., Sweet, W. N., Seymour, S. J. & Biemer, S. M., 2011. *Systems Engineering Principles and Practice*. s.l.:Wiley.
- Kotter, J. P., 1996. *Leading Change*. *Harvard Business Review Press*. s.l.:s.n.
- Krause, F.-H., Franke, H.-J. & Gausemeier, J., 2006. *Innovationspotenziale in der Produktentwicklung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Krogh, G. v., Ichijo, K. & Nonaka, I., 2000. *Enabling Knowledge Creation: How to Unlock the Mystery of Tacit Knowledge and Release the Power of Innovation*. s.l.:Oxford University Press.
- Krogh, G. v. & Köhne, M., 1998. Der Wissenstransfer in Unternehmen: Phasen des Wissenstransfers und wichtige Einflussfaktoren.. In: *In Die Unternehmung, Vol. 52*. s.l.:Verlag Paul Haupt, pp. 235–252.
- Kruchten, P., 2004. *The Rational Unified Process: An Introduction (3rd ed.)*. s.l.:Addison-Wesley.

- Kühnl, C., 2010. Software gibt den Takt vor. *Megaphon. Eng. 2*, pp. 24–25.
- Lange, S., 2015. *Komplexität im Projektmanagement: Methoden und Fallbeispiele für erfolgreiche Projekte*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lanza, G., Fleischer, J. & Schulze, V., 2012. Life cycle performance in manufacturing = Life Cycle Performance in der Produktionstechnik: Ausgewählte Ansätze zur Steigerung von Zuverlässigkeit und Effizienz. *wt Werkstattstechnik online*, p. 513–517.
- Larman, C. & Vodde, B., 2013. *Scaling Lean & Agile Development: Thinking and Organizational Tools for Large-Scale Scrum*. s.l.:Addison-Wesley.
- Larman, C. & Vodde, B., 2016. *Large-Scale Scrum: More with LeSS*. s.l.:Addison-Wesley Professional.
- Lee, E. A. & Seshia, S. A., 2017. *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. s.l.:MIT Press.
- Lee, I. & Lee, K., 2015. *The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises*. s.l.:Business Horizons.
- Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H. A., 2015. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, pp. 3, 18–23.
- Leffingwell, D., 2019. *SAFe 5.0 Distilled: Achieving Business Agility with the Scaled Agile Framework*. s.l.:Addison-Wesley.
- Leffingwell, D., 2021. *Scaled Agile Framework for Lean Enterprises*. s.l.:Scaled Agile, Inc..
- Lehner, F., 2023. *Wissensmanagement: Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung. 7. überarbeitete und erweiterte Auflage*. s.l.:Carl Hanser Verlag.
- Levitt, T., 1965. *Exploit the Product Life Cycle*. s.l.:Harvard Business Review.
- Lindemann, U., 2014. *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. s.l.:Springer-Verlag.
- Lipnack, J. & Stamps, J., 2000. *Virtual Teams: People Working Across Boundaries with Technology*. New York: John Wiley & Sons.
- Mahalik, ., 2003. *Mechatronics: Principles, Concepts and Applications*. s.l.:Tata McGraw-Hill Education.
- Martin, J., 1991. *Rapid Application Development*. s.l.:Macmillan.
- Meier, A. & Kaufmann, M., 2019. *SQL & NoSQL Databases*. s.l.:Springer-Vieweg.
- Meier, M. & Weller, I., 2010. Wissensmanagement und unternehmensinterner Wissenstransfer. *Diskussionsbeiträge, No. 2010/16. Freie Universität Berlin, School of Business & Economics*.
- Mertins, K., Heisig, P. & Vorbeck, J., 2001. *Knowledge Management: Concepts and Best Practices*. s.l.:Springer-Verlag.
- Moehrle, M. & Isenmann, R., 2005. *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. s.l.:Springer-Verlag.

- Monostori, L. et al., 2016. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, pp. 65(2), 621-641.
- Nerretter, W., 2006. *Grundlagen der Elektrotechnik*. s.l.:Hanser Verlag.
- Niemann, J., 2020. Life Cycle Management – Das Paradigma der ganzheitlichen Produktlebenslaufbetrachtung. In: *Handbuch Unternehmensorganisation*. s.l.:Springer-Verlag, p. 1–15.
- Nonaka, I. & Takeuchi, H., 1995. *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. s.l.:s.n.
- North, K., Brandner, A. & Steininger, T., 2016. *Wissensmanagement für Qualitätsmanager: Erfüllung der Anforderungen nach ISO 9001:2015*. s.l.:Springer Gabler.
- Offergelt, F., Hofreiter, S. & Steiner, T., 2024. *Wissensmanagement in modernen Organisationen*. s.l.:Springer-Verlag.
- Ortmann, G., Sydow, J. & Türk, K., 2000. *Theorien der Organisation: Die Rückkehr der Gesellschaft*. s.l.:Westdeutscher Verlag.
- Ovtcharova J., 2005. *Virtual Engineering - Herausforderung und Chance*. Magdeburg, 7. Magdeburger Maschinenbautage, Tagungsband.
- Ovtcharova, J. et al., 2015. Innovation braucht Resourceful Humans: Aufbruch in eine neue Arbeitskultur durch Virtual Engineering. In: *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. s.l.:Springer Vieweg.
- Ovtcharova, J., Weigt, M. & Seidel, M., 2005. *Virtual Engineering - Handlungsbedarf und Lösungsansätze zur Prozess- und Systemintegration*. Magdeburg, s.n.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H., 2007. *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Palmer, S. R. & Felsing, J. M., 2002. *A Practical Guide to Feature-Driven Development*. s.l.:Prentice Hall.
- Pfeifer, T., Schmitt, R. & Voigt, T., 2005. Managing change: quality-oriented design of strategic change processes. *The TQM Magazine*, Issue Vol. 17 No. 4, pp. 297-308.
- Pircher, R., 2014. *Wissensmanagement, Wissenstransfer, Wissensnetzwerke: Konzepte, Methoden, Erfahrungen*. s.l.:Springer Gabler.
- Plathottam, S. J., Rzonca, A., Lakhnori, R. & Iloeje, C. O., 2023. A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, Vol. 5(3).
- Pohl, K. & Rupp, C., 2015. *Basiswissen Requirements Engineering: Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering – Foundation Level*. s.l.:dpunkt.verlag.
- Polanyi, M., 1966. *The Tacit Dimension*. s.l.:Routledge & Kegan Paul.
- Poppendieck, M. & Poppendieck, T., 2003. *Lean Software Development: An Agile Toolkit for Software Development Managers*. s.l.:Addison-Wesley.

- Preußig, J., 2024. *Agiles Projektmanagement: Scrum, Use Cases, Task Boards & Co.* 3. Auflage. s.l.:Haufe-Lexware..
- Pries, K. H. & Quigley, J. M., 2011. *Scrum Project Management.* s.l.:s.n.
- Probst, G., Raub, S. & Romhardt, K., 2010. *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen.* s.l.:Gabler Verlag.
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L. & Stankovic, J., 2010. Cyber-physical systems: the next computing revolution. *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*, pp. 731-736.
- REFA, 1990. *Methodenlehre der Betriebsorganisation.* München: Carl-Hanser-Verlag.
- Reichelt, A., 2004. *Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM – Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände“.* s.l.:Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Rigby, D. K., Sutherland, J. & Takeuchi, H., 2016. *Embracing Agile.* s.l.:Harvard Business Review.
- Rogers, E. M., 2003. *Diffusion of Innovations.* s.l.:Free Press.
- Royce, W. W., 1970. Managing the Development of Large Software Systems. *Proceedings of IEEE WESCON*, pp. 1-9.
- Russell, S. & Norvig, P., 2016. *Artificial Intelligence: A Modern Approach.* s.l.:Pearson.
- Satyanarayanan, M., 2017. The Emergence of Edge Computing. *IEEE Computer*, pp. 50(1), 30-39.
- Scherer, U., 2013. *Radiochemische Untersuchungen der Ablagerungen in einem Rohr,* Aachen: FH Aachen.
- Schindler, M., 2002. *Wissensmanagement in der Projektabwicklung: Grundlagen, Determinanten und Gestaltungskonzepte eines ganzheitlichen Projektwissensmanagements.* s.l.:Gabler Verlag.
- Schneider, H.-C. et al., 2015. *Aufbau eines Simulationsmodells zur Qualifizierung des neuen Vibrationsverfahrens für Dekontamination von Rohrleitungen - Mechanische und mikrostrukturelle Untersuchungen an radioaktiven Proben,* Karlsruhe: IAM-WBM Fusionsmateriallabor.
- Schneider, S., 2015. *Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess am Beispiel der Motorenproduktion. (Schriftenreihe Industrial Engineering).* s.l.:Apprimus Verlag.
- Schneider, S. et al., 2012. *Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess: Softwareentwicklung als Lösungshilfe für permanente Anpassungsbedarfe in der Prozessplanung.* s.l.: 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik/Entwicklungsmethodik.
- Schömann, S. O., 2012. *Produktentwicklung in der Automobilindustrie: Managementkonzepte vor dem Hintergrund gewandelter Herausforderungen.* Wiesbaden: Gabler Verlag.

- Schuba, C., Elsässer, G., Eickelmann, M. & Deuse, J., 2013. Investitionsermittlung für hochflexible Verbundfertigungssysteme in frühen Phasen der Produktentstehung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, pp. 108(6), 421–425.
- Schuck, H., Haj Stifi, A., Ovtcharova, J. & Gentes, S., 2015. Methoden des Virtual Engineering für den Qualifizierungsprozess eines neuartigen Dekontaminationsverfahrens von Rohrleitungen. *KONTEC 2015 – 12. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“*.
- Schwaber, K., 1997. Scrum Development Process.. *Sutherland, J., & Casanave, C. (Hrsg.), Proceedings of the 10th Annual ACM Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications (OOPSLA'97) Workshop on Business Object Design and Implementation*.
- Schwaber, K. & Beedle, M., 2002. *Agile Software Development with Scrum*. s.l.:Prentice Hall.
- Schwaber, K. & Sutherland, J., 2017. *The Scrum Guide*. *Scrum.org*. [Online] Available at: <https://www.scrum.org/resources/scrum-guide>
- Seidel, M., 2005. *Methodische produktplanung*. s.l.:Universitätsverlag, Karlsruhe.
- Sendler, U., 2013. *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Shin, M., 2000. A Framework for Evaluating Economics of Knowledge Management Systems. *Information & Management*, pp. 39(2), 85–96.
- Shi, W. et al., 2016. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*.
- Shi, Y., Wan, J., Yan, H. & Suo, H., 2011. A survey of cyber-physical systems. *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 1–6.
- Shum, S. B., 1994. Argumentation-based Design Rationale: What Use at What Cost?. *International Journal of Human-Computer Studies*, pp. 40(4), 603–652.
- Snowden, D. J. & Boone, M. E., 2007. *A Leader's Framework for Decision Making*. s.l.:Harvard Business Review.
- Sommerville, I., 2011. *Software Engineering. 9th ed.* s.l.:Addison-Wesley.
- Staab, S. (.), 2004. *Handbook on Ontologies*. s.l.:Springer-Verlag.
- Stacey, R. D., 1996. *Strategic Management and Organisational Dynamics*. s.l.:Pitman.
- Stapleton, J., 1997. *DSDM: The Method in Practice*. s.l.:Addison-Wesley.
- Stark, R., 2022. *Virtual Product Creation in Industry: The Difficult Transformation from IT Enabler Technology to Core Engineering Competence*. Springer-Verlag Hrsg. Berlin: s.n.
- Statistisches Bundesamt, 2017. *Statistisches Jahrbuch 2017*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

- Thomke, S. & Fujimoto, T., 2000. The Effect of “Front-Loading” Problem-Solving on Product Development Performance. *Journal of Product Innovation Management*, pp. 17(2), 128–142.
- Thrun, S., Burgard, W. & Fox, D., 2005. *Probabilistic Robotics*. s.l.:MIT Press.
- Ulrich, K. T. & Eppinger, S. D., 2015. *Product Design and Development (6th ed.)*. s.l.:McGraw-Hill.
- Vajna, S., Clement, S., Jordan, A. & Bercsey, T., 2009. *The Autogenetic Design Theory: An Approach to Self-Designing Engineering Systems*. s.l.:Springer-Verlag.
- Vajna, S. et al., 2018. *CAX für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung*. 3. Auflage.. s.l.:Springer-Verlag.
- VDI 2206, 2004. VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. In: V. P. u. Prozessgestaltung, Hrsg. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. s.l.:s.n.
- VDI 2221, 1993. *VDI 2221*. s.l.:s.n.
- Voigt, K.-I., 2005. Der Innovationsprozess. In: *Industrielles Management*. s.l.:Springer-Verlag.
- von Hippel, E., 2005. *Democratizing Innovation*. s.l.:MIT Press.
- Wake, B., 2003. *INVEST in Good Stories, and SMART Tasks*. [Online] Available at: www.xp123.com
- Warth, C. P., 2012. *Wissenstransferprozesse in der Automobilindustrie*. s.l.:Springer-Verlag.
- Weilkiens, T., 2012. *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design*. s.l.:dpunkt.verlag.
- Werth, D., 2008. *Modellierung unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*. s.l.:BoD – Books on Demand.
- Westkämper, E., 2006. *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Westkämper, E., 2016. *Strategien der Produktion*. s.l.:Springer-Verlag.
- Zhang, Q., Yang, L. T., Chen, Z. & Li, P., 2018. *A survey on deep learning for big data*. s.l.:Information Fusion.

Anhang



Abbildung 7-1: Rohr 1 mit den untersuchten Bereichen (rot)

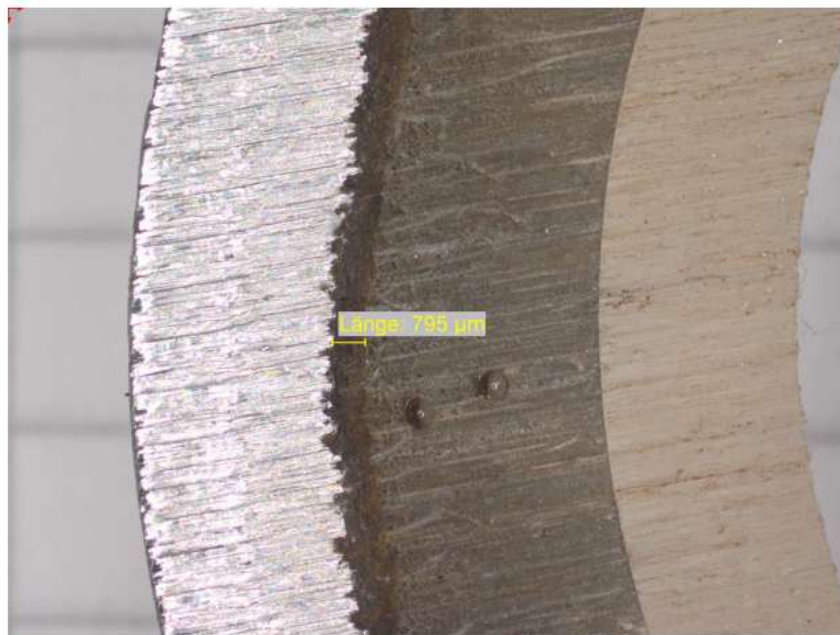


Abbildung 7-2: Präparierte Rohrprobe 1

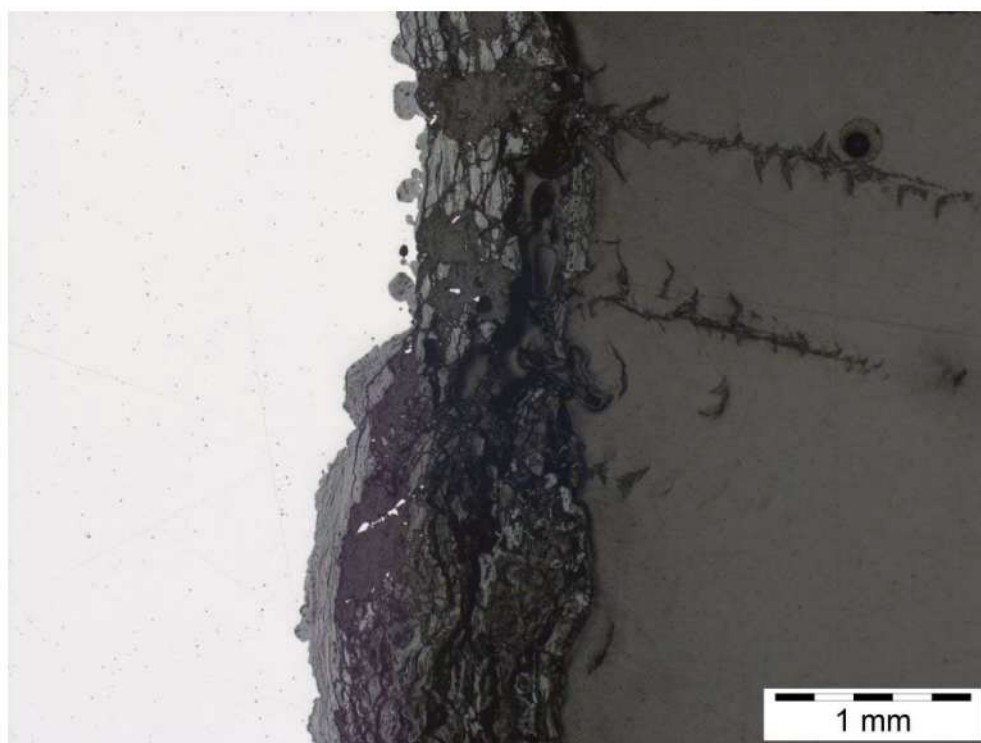


Abbildung 7-3: Metallographische Untersuchung an Rohr 1

Ablagerungsart	Härte [Mohs]	Formel	Ba	C	Ca	Cr	Fe	O	Pb	S	Sr	Zn
Calciumcarbonathaltige Ablagerungen												
Calcit	3	Ca[CO ₃]		X	X			X				
Aragonit	3-4	Ca[CO ₃]		X	X			X				
Sulfathaltige Ablagerungen												
Bariumsulfat	3-3,5	Ba[SO ₄]	X					X		X		
Calciumsulfat	2	Ca[SO ₄]-2H ₂ O			X			X		X		
Calciumsulfat	3-3,5	Ca[SO ₄]			X			X		X		
Strontiumsulfat	3-3,5	Sr[SO ₄]						X		X	X	
Sulfidhaltige Ablagerungen												
Eisen(II)-sulfid	4	FeS ... Fe ₁₀ S ₁₁					X			X		
Zink(II)-sulfid	3-4	ZnS								X		X
Blei(II)-sulfid	2,5-3	PbS							X	X		
Rohr												
Stahl				(X)		X	X					
Rost				(X)		X	X	X				
Einbettmittel				X								

Tabelle 7-1: Mögliche Ablagerungen und ihre Zusammensetzung in Rohr 1

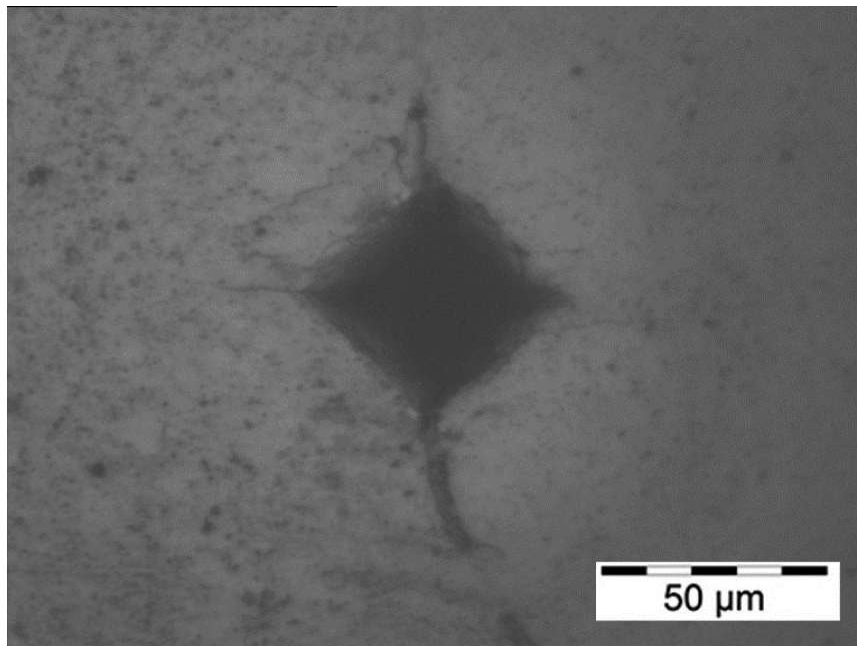


Abbildung 7-4: Rohr 3 mit Eindruck 06 Vickers HV0,5 40x

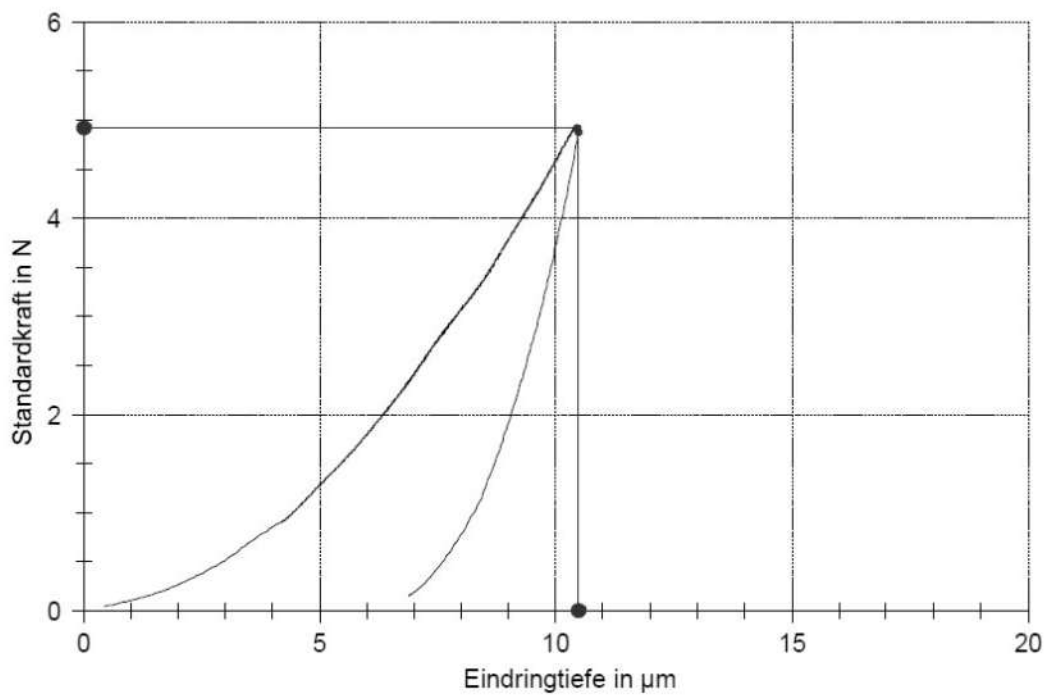


Abbildung 7-5: Rohr 3 mit Verlauf von Eindruck 06 Vickers HV0,5

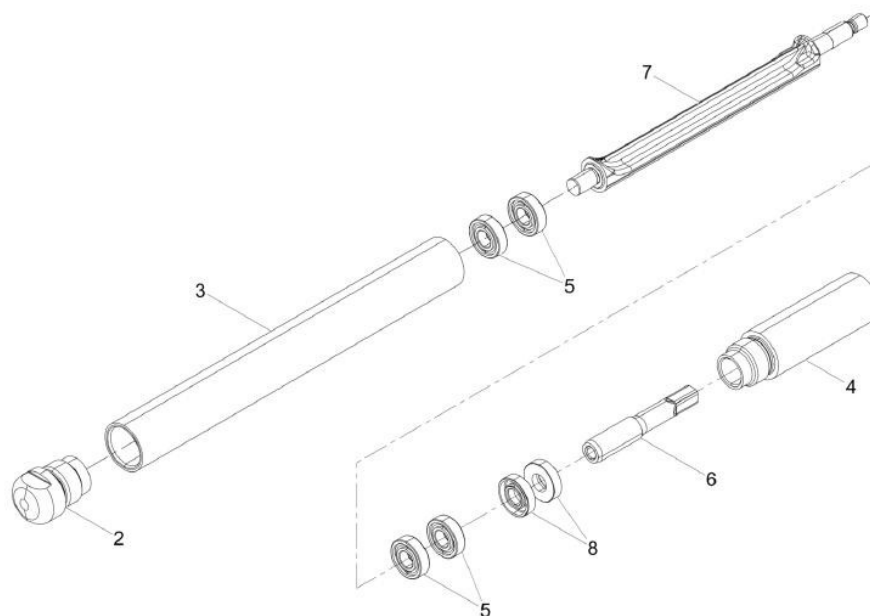


Abbildung 7-6: Explosionszeichnung: Rüttelflasche Wacker Neuson

Nummer	Bezeichnung		Nummer	Bezeichnung
2	Verschlusskappe		6	Wellenadapter
3	Gehäuse		7	Unwucht
4	Adapter		8	Wellendichtring
5	Wälzlager			

Tabelle 7-2: Bezeichnung der Einzelteile der Rüttelflasche

Prozess Elemente	Prozessparameter und Einflussgrößen		Abkürzung	Wertebereich		
				Einheit	Min.	max.
Ablagerung	Eigenschaften	Härte	H	HB	76	227
		Dicke	D	mm	1	3
Werkzeugträger/Werkzeug	Geometrie	Kantenzahl	Ka	-	4	16
		Kantenwinkel	Kw	°	60	90
	Unwuchtmasse	Masse	m	g	200	200
	Frequenz	Frequenz	F	Hz	150	217
Verfahren	Abstand zwischen Werkzeug und Rohrrinnenwand	Abstand	L	mm	4	12
	Vorschub	Geschwindigkeit	V	mm/s	10	50

Tabelle 7-3: Wertebereiche für die Parameter

Änderung	F / W	Anforderungen
23.02.2013	F	<p>1. Geometrie:</p> <p>Außenmaße mit angebrachtem Werkzeug ohne Gelenk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Durchmesser < 55 mm - Länge: 300 – 500 mm
23.02.2013	F	<p>Werkzeugaufnahme vorsehen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Länge: 60 mm - Durchmesser: 35 mm
23.02.2013	W	<ul style="list-style-type: none"> - aktuelle Werkzeuge sollen weiter verwendbar sein
23.02.2013	F	<ul style="list-style-type: none"> - Verdrehsicherung vorsehen
23.02.2013	F	<p>Schnittstelle zum Antrieb: flexible Welle mit Vierkant (□8 mm)</p>
23.02.2013	W	<p>Sensoren berücksichtigen; zur Messung von</p> <ul style="list-style-type: none"> - der Relativbewegung zwischen beiden Seiten des Gelenks - der Drehzahl der Unwuchtmasse
23.02.2013	W	<p>2. Kräfte:</p> <p>Gewicht des Werkzeugträgers: 2–4 kg</p>
23.02.2013	F	<p>Radiale Beschleunigungen von ca. 770 m/s² im Messpunkt 0mm (entspricht 900 m/s² am Werkzeug) bei eingespanntem, vertikalem Versuchsaufbau</p>
23.02.2013	W	<p>3. Kinematik:</p> <p>Umdrehungen/Frequenz variabel: bis 200 Hz</p>
23.02.2013	W	<p>minimale Handhabungszeit</p>
23.02.2013	F	<p>4. Stoffe:</p> <p>Materialbeständigkeit bei gegebenen Einsatzbedingungen (Härten)</p> <p>Temperatureinfluss berücksichtigen</p>

	F	Möglichst Normteile verwenden
	W	5. Fertigung: Restriktionen
		Fertigungsmöglichkeiten berücksichtigen: Drehen, Fräsen und sonstige grundlegende Fertigungsmöglichkeiten
23.02.2013	W	Standardteile oder Normteile bei Zukaufteilen verwenden
	F	6. Instandhaltung:
		Möglichst wartungsarm
23.02.2013	F	7. Sicherheit:
		Schutz des Bedienpersonals
	F	8. Gebrauch:
		kein Eindringen von Verunreinigungen ins Innere
		hohe Schwingungsbeanspruchung
	F	hohe Stoßbelastungen beim Einsatz in Rohren
	F	Einsatzort: kontaminierte Rohre
	F	Kühlung sicherstellen: Temperatur < 70 °C
	F	
	W	

Tabelle 7-4: Anforderungsliste

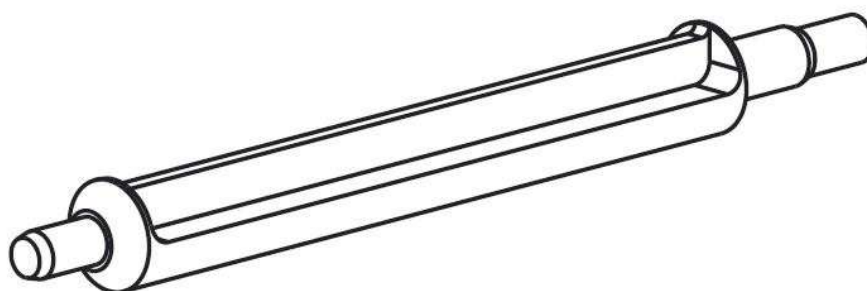


Abbildung 7-7: 3D-Ansicht der neukonstruierten Unwucht

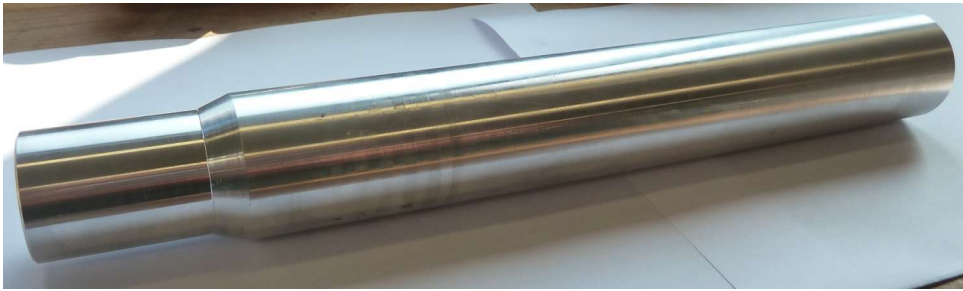


Abbildung 7-8: Gefertigtes Gehäuse des neuen Werkzeugträgers



Abbildung 7-9: Gefertigter Adapter des neuen Werkzeugträgers



Abbildung 7-10: Gefertigte Verschlusskappe des neuen Werkzeugträgers



Abbildung 7-11: Gefertigter Wellenadapter des neuen Werkzeugträgers



Abbildung 7-12: Komplett montierter Werkzeugträger

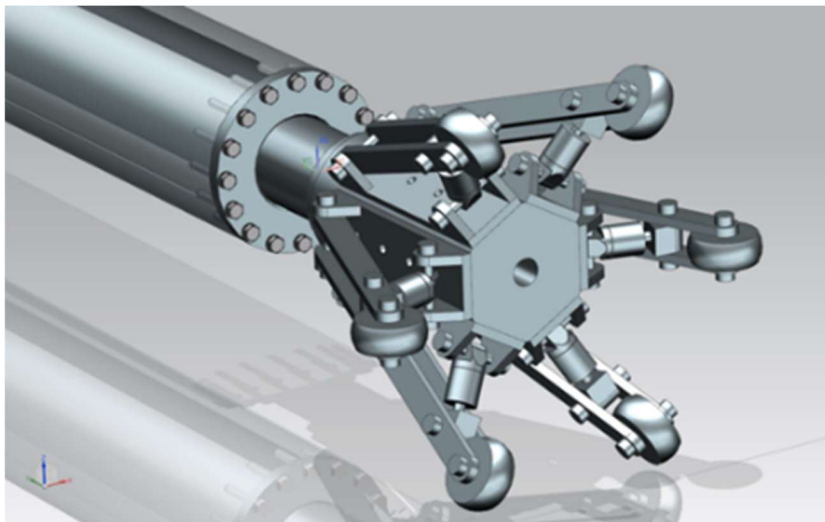


Abbildung 7-13: Konstruierte Vorschubvorrichtung



Abbildung 7-14: Geometrische Variante der Gesamtbaugruppe

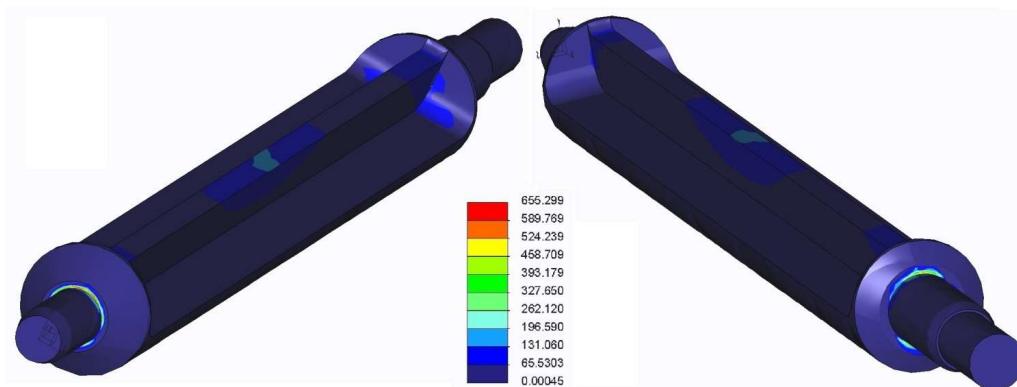


Abbildung 7-15: Unwucht, verschiedene Ansichten – v. Mises-Vergleichsspannung [MPa]

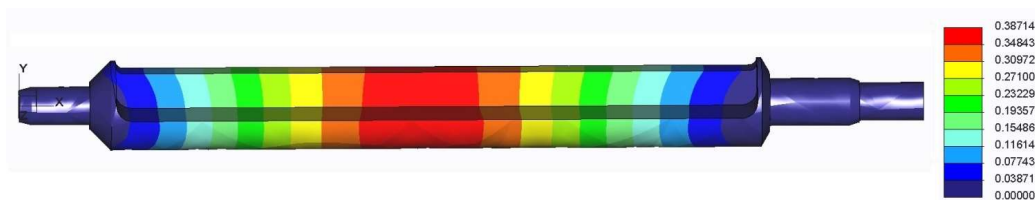


Abbildung 7-16: Verschiebungen der Unwucht [mm]

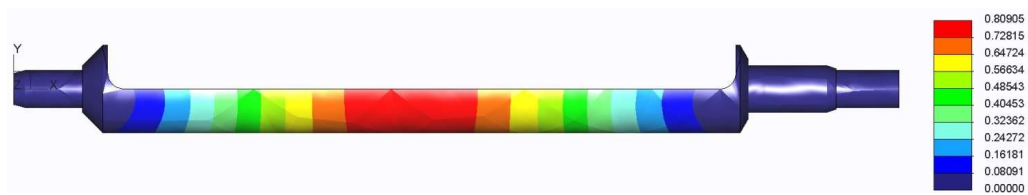


Abbildung 7-17: Verschiebung der Unwucht [mm]

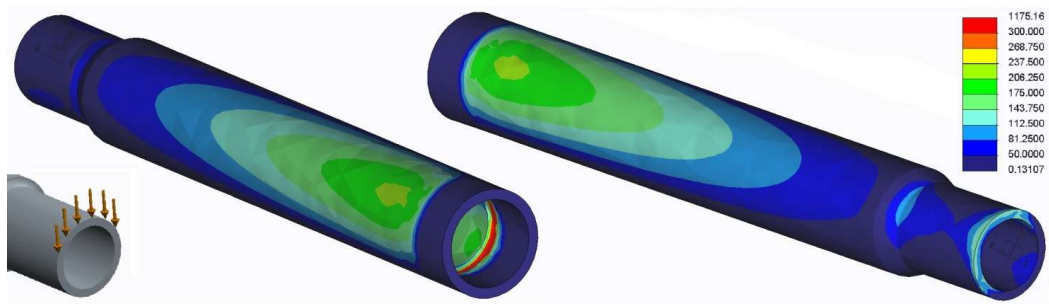


Abbildung 7-18: Gehäuse, verschiedene Ansichten - Mises-Vergleichsspannung [MPa]