

Ein Beitrag zur Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Modellierung technischer Systeme

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Jan Würtenberger, M.Sc.

aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christian Weber
Tag der Einreichung: 08.08.2017
Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2017

Darmstadt 2018

D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-73482

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7348>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – keine kommerzielle Nutzung – keine Bearbeitung 4.0 international

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente *pmd* der Technischen Universität Darmstadt aus der Bearbeitung des Teilprojekts A1 im Sonderforschungsbereich SFB 805 *Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus*.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für seine wertvollen, fachlichen Anregungen sowie für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Insbesondere die vielen Beispiele aus der Industrie haben mir sehr geholfen, mein Verständnis von Unsicherheit bei der Modellierung von Systemen zu schärfen und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin danken möchte ich dir für die vielen Diskussionen sowie das entgegengebrachte Vertrauen, die zu meiner persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Weber danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und für das damit verbundene Interesse an dieser Arbeit. Weiterhin möchte ich mich für die sehr interessanten Diskussionen im Rahmen der *Summer School on Engineering Design Research 2015* bedanken, deren Erkenntnisse ebenfalls wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die sehr angenehme Zeit und kollegiale Arbeitsatmosphäre am Fachgebiet danke ich allen ehemaligen und derzeitigen Kolleginnen und Kollegen. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Michael Roos, Christian Wagner, Sandra Link, Julian Sarnes und selbstverständlich meine beiden Bürokollegen Tillmann Freund und Julian Lotz. Euch beiden danke ich neben der Vielzahl an fachlichen Diskussionen auch für die vielen Erlebnisse, die die Zeit am Fachgebiet sehr angenehm gestaltet haben und mir noch lange in Erinnerung bleiben werden.

Weiterhin danke ich meinen Eltern sowie meinem Bruder für den großen Rückhalt und die umfangreiche Unterstützung, mein Dissertationsvorhaben auch realisieren zu können. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Karolin. Deine Unterstützung und dein Verständnis in besonders schwierigen Phasen beim Erstellen dieser Arbeit haben maßgeblich dazu beigetragen, diese Arbeit zu erstellen.

Darmstadt, im April 2018

Jan Würtenberger

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Symbolverzeichnis.....	X
Kurzfassung.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Bedeutung von Produktmodellen in der Produktentwicklung.....	1
1.1.1 Rückrufaktion General Motors	3
1.1.2 Rückrufaktion Toyota	5
1.2 Motivation und Gegenstand der Arbeit	7
1.3 Einordnung der Arbeit in die Forschungstätigkeiten des SFB 805	8
1.4 Aufbau der Arbeit	8
2 Stand der Forschung	9
2.1 Unsicherheit im Maschinenbau	9
2.1.1 Der Begriff Unsicherheit.....	9
2.1.2 Sonderforschungsbereich 805	14
2.1.3 Verständnis von Unsicherheit in der Produktentwicklung.....	16
2.2 Definitiorische Grundlagen	17
2.2.1 Definition Produkt.....	17
2.2.2 Definition System.....	17
2.2.3 Definition technisches System.....	19
2.2.4 Definition Modell	20
2.2.5 Definition Prozess	22
2.2.6 Definition Methode	25
2.3 Beschreibung von Produktentwicklungsprozessen	27
2.3.1 Vorgehen in der Produktentwicklung nach VDI 222x	27
2.3.2 Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung.....	29
2.3.3 Axiomatic Design	31

2.3.4	Property-Driven Development.....	33
2.4	Produktmodelle im Produktentwicklungsprozess.....	36
3	Verwendung von Produktmodellen	47
3.1	Verortung von Produktmodellen im Entwicklungsprozess	47
3.2	Lebenszyklus eines Produktmodells	56
3.2.1	Bestehende Ansätze in der Literatur	56
3.2.2	Konsolidierte Beschreibung des Produktmodelllebenszyklus	60
3.3	Unsicherheit bei der Verwendung von Produktmodellen	66
4	Grundidee einer methodischen Unterstützung zur Beherrschung von Unsicherheit	70
4.1	Defizite bestehender, methodischer Ansätze.....	70
4.2	Zielsetzung der Arbeit.....	72
4.3	Forschungsansatz.....	73
5	Detaillierung des Modellerstellungsprozesses	76
5.1	Grundlegende Aspekte zur Detaillierung	76
5.1.1	Externalisierungsprozess des Entwicklers	76
5.1.2	Übersicht bestehender Ansätze zur Detaillierung.....	78
5.2	Ansatz zur detaillierten Beschreibung des Modellerstellungsprozesses..	82
5.2.1	Festlegen des Betrachtungsrahmens	82
5.2.2	Festlegen von Modellbausteinen	84
5.2.3	Festlegen der Modellstruktur	87
5.2.4	Individualisierung der Modellstruktur	88
5.3	Beispielhafte Anwendung der Detaillierung.....	90
5.4	Erkenntnisse bei der Produktmodellerstellung.....	94
5.4.1	Anwendung des Produktmodellerstellungsprozesses	94
5.4.2	Annahmen im Produktmodellerstellungsprozess	96
6	Methodik IDEA.....	98
6.1	Vorüberlegungen zur Umsetzung der Methodik	98

6.1.1	Informationslage in der Produktentwicklung	98
6.1.2	Transformation von Perspektiven auf das System.....	100
6.2	Vorgehensschritte der Methodik IDEA	101
6.2.1	Identifikation von Lebenslaufprozessen	103
6.2.2	Detaillierung relevanter Lebenslaufprozesse	105
6.2.3	Effekt- und Wirkungsabschätzung.....	109
6.2.4	Auswertung.....	113
6.3	Beurteilung des Nutzens der Methodik IDEA.....	116
6.4	Beispielhafte Anwendung der Methodik IDEA	118
7	Evaluation	124
7.1	Anwendung am Beispiel eines Hydraulikmembranaktors	124
7.1.1	Problemstellung	126
7.1.2	Anwendung der Methodik und Auswertung der Ergebnisse	128
7.2	Anwendung am Beispiel einer elektrischen Parkbremse	132
7.2.1	Problemstellung	133
7.2.2	Anwendung der Methodik und Auswertung der Ergebnisse	133
8	Fazit	141
8.1	Ergebnisse	141
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	144
	Literaturverzeichnis.....	146
	Eigene Veröffentlichungen	161
	Betreute studentische Arbeiten	164
	Lebenslauf.....	166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Produktrückrufe auf Basis der RAPEX Datenbank	2
Abbildung 1-2: Die fünf größten Produktkategorien der Rückrufaktionen	3
Abbildung 1-3: An- und Aus-Position des GM-Zündschlosses	4
Abbildung 1-4: Toleranzkette im Zündschloss	5
Abbildung 1-5: Schematische Darstellung des Toyota Gaspedals.....	6
Abbildung 2-1: Daten, Information, Wissen	11
Abbildung 2-2: Zusammenhang zwischen Information und Unsicherheit	13
Abbildung 2-3: Manifestation von Unsicherheit	14
Abbildung 2-4: SFB 805 Unsicherheitsmodell	15
Abbildung 2-5: Konzepte der Systemtheorie	18
Abbildung 2-6: Modell eines (technischen) Systems	19
Abbildung 2-7: Die Original-Modell Abbildung.....	22
Abbildung 2-8: Prozessmodell nach HEIDEMANN	24
Abbildung 2-9: Entwicklungsprozess nach HUBKA	25
Abbildung 2-10: Vorgehensmodell der Produktentwicklung nach VDI 2221	28
Abbildung 2-11: Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung ...	30
Abbildung 2-12: Vier Domains der Axiomatic Design Theorie	32
Abbildung 2-13: Analyse und Synthese im CPM/PDD Ansatz	34
Abbildung 2-14: Vorgehen im CPM/PDD Ansatz	35
Abbildung 2-15: Klassifizierungsmöglichkeiten von Produktmodellen.....	37
Abbildung 2-16: Klassifizierungen von Produktmodellen nach deren Zweck.....	38
Abbildung 2-17: Produktmodellpyramide	42
Abbildung 2-18: Prototyp, CAD-Model und FE-Modell einer Halterung	44
Abbildung 2-19: Erstellung eines MKS-Modells	45
Abbildung 3-1: Verortung von Produktmodelltypen im CPM/PDD Modell	49
Abbildung 3-2: Produktmodelle am Beispiel der Entwicklung eines Auslegers	51
Abbildung 3-3: Analytisches Produktmodell zur Absenkungsbestimmung	52

Abbildung 3-4: Festlegung von Ausprägungen des analytischen Produktmodells	53
Abbildung 3-5: CAD- und FE-Modell zur Absenkungsbestimmung	54
Abbildung 3-6: Lebenszyklusphasen eines Modells nach NANCE.....	57
Abbildung 3-7: Konsolidierter Lebenszyklus eines Produktmodells	61
Abbildung 3-8: Verifikation und Validierung bei der Modellabsicherung	63
Abbildung 3-9: Validierung am Beispiel einer Schraubenfeder	65
Abbildung 3-10: Treffen von Annahmen im Lebenszyklus eines Produktmodells	66
Abbildung 3-11: Unsicherheit am Beispiel der Entwicklung eines Auslegers	68
Abbildung 4-1: Verifikation und Validierung der ASME und der AIAA	71
Abbildung 4-2: Kerngedanke der methodischen Unterstützung.....	73
Abbildung 4-3: Vorgehen zum Entwickeln einer methodischen Unterstützung ...	74
Abbildung 5-1: Externalisierungsprozess des Entwicklers	77
Abbildung 5-2: Externalisierungsprozess am Beispiel eines Fahrwerks.....	77
Abbildung 5-3: Modellerstellungsprozess nach NANCE	78
Abbildung 5-4: Formalisierung des Systems nach NEGELE.....	80
Abbildung 5-5: Stufenweises Vorgehen bei der Modellerstellung nach NEGELE .	81
Abbildung 5-6: Detaillierung des Modellerstellungsprozesses.....	82
Abbildung 5-7: Festlegen des Betrachtungsrahmens.....	83
Abbildung 5-8: Betrachtungsrahmen zur Analyse des Fahrkomforts.....	83
Abbildung 5-9: Festlegen von Modellbausteinen.....	84
Abbildung 5-10: Beispielhafte Modellbausteine aus der Statik	85
Abbildung 5-11: Modellbausteine zur Analyse des Fahrkomforts	87
Abbildung 5-12: Festlegen der Modellstruktur.....	87
Abbildung 5-13: Modellstruktur zur Analyse der Radaufhängung	88
Abbildung 5-14: Individualisierung der Modellstruktur	89
Abbildung 5-15: Individualisierung am Beispiel der Analyse des Fahrkomforts...	90
Abbildung 5-16: Internes Modell des Zündschlosses.....	91
Abbildung 5-17: Demonstrator des Zündschlosses.....	91

Abbildung 5-18: Modellbausteine zur Abbildung des Zündschlosses	92
Abbildung 5-19: Reaktionskräfte am Stößel des Zündschlosses.....	93
Abbildung 5-20: Modellstruktur des Produktmodells.....	93
Abbildung 5-21: Ausprägungen der Produktmodellelemente.....	94
Abbildung 5-22: Iterationsschleifen bei der Produktmodellerstellung	95
Abbildung 6-1: Informationslage in der Produktentwicklung	99
Abbildung 6-2: Informationslage in der Produktentwicklung	100
Abbildung 6-3: Übertragung der Prozess- auf die Produktmodellperspektive	101
Abbildung 6-4: Vorgehensschritte zum Antizipieren	102
Abbildung 6-5: Vorgehensschritte zum Auswerten	102
Abbildung 6-6: Identifikation von Lebenslaufprozessen.....	103
Abbildung 6-7: Auszüge einer Lebenslaufcheckliste nach ROTH	104
Abbildung 6-8: Analyse der Produktumgebung.....	105
Abbildung 6-9: Detaillierung von Lebenslaufprozessen.....	106
Abbildung 6-10: Auszüge einer Störgrößencheckliste nach MATHIAS.....	107
Abbildung 6-11: Störgrößenzuordnung am Beispiel einer Vertikalschwingung .	108
Abbildung 6-12: Effekt- und Wirkungsabschätzung	109
Abbildung 6-13: Abhängigkeitsmatrix.....	110
Abbildung 6-14: Auszug einer Checkliste physikalischer Effekte	111
Abbildung 6-15: Abhängigkeitsmatrix am Beispiel einer Getriebewelle.....	113
Abbildung 6-16: Auswertung	113
Abbildung 6-17: Bewertung der Stör- und Nebengrößen in einem Portfolio	114
Abbildung 6-18: Bewertung des Nutzens der Methodik IDEA.....	117
Abbildung 6-19: Fahrbahnanregung des Zündschlossdemonstrators	119
Abbildung 6-20: Prozessmodell Fahrt über unebene Fahrbahn.....	120
Abbildung 6-21: Abhängigkeitsmatrix des Zündschlosses	120
Abbildung 6-22: Anpassung von Betrachtungsrahmen und Modellbausteinen ..	121
Abbildung 6-23: Anpassung der Modellstruktur des Zündschlosses.....	122

Abbildung 7-1: Aktive Luftfeder	124
Abbildung 7-2: Hydraulikmembranaktor	125
Abbildung 7-3: Druckaufbaugleichung.....	126
Abbildung 7-4: Produktmodell zur Nachgiebigkeitsbestimmung	127
Abbildung 7-5: Nachgiebigkeitsbestimmung am Prototypen.....	127
Abbildung 7-6: Detaillierte Betrachtung des Entlüftungsprozesses des Aktors...	129
Abbildung 7-7: Effekt- und Wirkungsabschätzung von Stör- und Nebengrößen	130
Abbildung 7-8: Integrierte Faustsattelbremse von Continental	132
Abbildung 7-9: Relevante Nutzungsprozesse der Parkbremse.....	134
Abbildung 7-10: Detaillierung des Zuspannprozesses nach einer Bergabfahrt ...	135
Abbildung 7-11: Contact und Channel Modell der Parkbremse	136
Abbildung 7-12: Abhängigkeitsmatrix der Parkbremse	137
Abbildung 7-13: Reibwertkennfeld	138
Abbildung 7-14: Theoretisch und experimentell bestimmte Zuspannkraft	139
Abbildung 7-15: Anpassung des Reibwertkennfelds.....	140

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CAX	Computer Aided Verfahren
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPM	Characteristics-Properties Modelling
FEM	Finite Elemente Modell
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
MKS	Mehrkörpersimulation
PDD	Property-Driven-Development
PDM	Product Data Management
QFD	Quality Function Deployment
RAPEX	Rapid Exchange of Information
SFB	Sonderforschungsbereich
u. a.	unter anderem

Symbolverzeichnis

α	Winkel	[Grad]
a	Beschleunigung	$[\frac{m}{s^2}]$
A	Fläche	$[mm^2]$
c	Federkonstante	$[\frac{N}{mm}]$
d	Dämpfungskonstante	$[\frac{kg}{s}]$
D	Dämpfungsgrad	[/]
E_{pneu}, E_{mech}	Energie	$[Nm]$
F, Q	Kraft	$[N]$
I	Flächenträgheitsmoment	$[mm^4]$
l, w, z, r, s	Länge	$[mm]$
m	Masse	$[kg]$
n	Drehzahl	$[s^{-1}]$
p	Druck	$[\frac{N}{m^2}]$
t	Zeit	$[s]$
T, M	Moment	$[Nm]$
τ	Schubspannung	$[\frac{N}{mm^2}]$
μ	Reibungskoeffizient	[/]
v	Geschwindigkeit	$[\frac{m}{s}]$
V	Volumen	$[m^3]$
γ	Verdrehung	[Grad]

Kurzfassung

Die Motivation dieser Arbeit resultiert aus der steigenden Anzahl an Produktrückrufen, deren Ursachen sich häufig auf eine nicht beachtete Kombination von relevanten Informationen aus Lebenslaufprozessen bei der Auslegung der Produkte zurückführen lässt. Es stellt sich die zentrale Forschungsfrage, inwiefern der Entwickler bei der Auslegung unterstützt werden kann, um ungewollte Abweichungen zwischen geforderten und realisierten Produkteigenschaften minimieren und somit die Gefahr von Produktrückrufen reduzieren zu können. Darauf aufbauend wird in der Arbeit die Bedeutung der Verwendung von Produktmodellen im Produktentwicklungsprozess herausgestellt. Bei der Erstellung eines Produktmodells findet eine Informationsverarbeitung statt, auf deren Basis Entscheidungen zur Auslegung des Produkts getroffen werden. Kommt es hierbei zur ungewollten Vernachlässigung von relevanten Informationen und somit zu Unsicherheit im Produktmodell, steigt die Gefahr von Fehlentscheidungen in der Produktentwicklung deutlich an. Somit besteht durch die Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen die Möglichkeit, die Gefahr von Fehlentscheidungen in der Produktentwicklung zu reduzieren.

Zur Identifikation von Unsicherheit wird anschließend zunächst eine repräsentative Konsolidierung auf Basis des Stands der Forschung vorgenommen, welche Produktmodelltypen für welche Tätigkeiten im Produktentwicklungsprozess verwendet werden. Zentrales Ergebnis hierbei ist eine vorgenommene Zuordnung der Produktmodelltypen Zielmodell, Entwicklungsmodell, Analysemodell und Problemmodell zu den Tätigkeiten Identifikation von Zielen, Durchführung von Produktsynthese, Identifikation von Abhängigkeiten festgelegter Merkmale und Analyse von Eigenschaften.

Anschließend wird auf die Verwendung von Analysemodellen fokussiert und der Lebenszyklus eines Produktmodells betrachtet, um anhand des Begriffspaars Verifikation und Validierung das Unsicherheitsverständnis bei der Verwendung von Produktmodellen schärfen zu können. Hierbei ist erkannt worden, dass Unsicherheit im Rahmen einer Validierung identifiziert und durch eine sich anschließende Verifikation reduziert werden kann. Der Zusammenhang dieses Begriffspaars stellt somit ein Mechanismus dar, mit deren Hilfe sich ein Vorgehen zur Beherrschung Unsicherheit entwickeln lässt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird davon ausgegangen, dass im Rahmen einer Validierung Unsicherheit bereits erkannt wurde. Somit ist der Fokus auf die Reduktion von Unsicherheit im Rahmen einer Verifikation gelegt worden. Hierfür wurde zunächst eruiert, welche Unterstützungsmöglichkeiten es bisher für den Entwickler gibt. Es konnte festgestellt werden, dass sich bisherige Unterstützungen meistens nur auf späte Phasen des Lebenszyklus eines Produktmodells beziehen, beispielsweise auf den Übergang eines konzeptionellen Modells in eine rechnergestützte Form. Hieraus ist der Bedarf abgeleitet worden, eine Unterstützung für die frühen Phasen des Lebenszyklus eines Produktmodells zu entwickeln, da vernachlässigte Informationen in diesen Phasen zu einer besonders hohen Ausprägung von Unsicherheit in Produktmodellen führen. Im Rahmen der Beschreibung des Lebenszyklus eines Produktmodells ist weiterhin herausgestellt worden, dass der Entwickler bei der Verarbeitung von Informationen stets Annahmen auf Basis einer als relevant erachteten Informationsmenge trifft.

Um prinzipielle Einflussmöglichkeiten zur Unterstützung des Entwicklers zu identifizieren, wurde untersucht, welche Annahmen der Entwickler bei der Erstellung von Produktmodellen trifft. Die identifizierten Annahmen wurden strukturiert und beziehen sich auf die Festlegung des Betrachtungsrahmens, der Wahl von Modellbausteinen, der Erstellung einer Modellstruktur und der Individualisierung von Produktmodellelementen.

Darauf aufbauend wird untersucht, wie der Entwickler bei der Festlegung einer als relevant erachteten Informationsmenge unterstützt werden kann. Hierzu wurde eine vierstufige Methodik entwickelt worden, mit deren Hilfe sich durch eine systematische Identifikation und Auswertung von Lebenslaufprozessen neben der bestehenden, produktmodellbezogenen Perspektive noch eine prozessbezogene Perspektive auf das untersuchte Produkt legen lässt. Dadurch kann der Entwickler die Menge an relevant erachteten Informationen gezielt erweitern und die getroffenen Annahmen des Produktmodells im Rahmen einer Verifikation überprüfen und gegebenenfalls anpassen. Der Nutzen der Methodik wird abschließend am Beispiel eines Hydraulikmembranaktors und einer elektrischen Parkbremse evaluiert, wobei jeweils eine Reduktion von Modellunsicherheit bewirkt werden konnte.

1 Einleitung

Die Aufgabe eines jeden Entwicklers ist es, unter Berücksichtigung von stofflichen, technologischen, wirtschaftlichen, gesetzlichen, umwelt- und menschenbezogenen Einflüssen Lösungen für technische Probleme zu finden und diese in Form von Produkten oder Dienstleistungen am Markt anzubieten¹. Diese müssen sowohl den Anforderungen der Kunden als auch denen des eigenen Unternehmens im Hinblick auf Qualität, Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit genügen².

Neben der Vielzahl an Einflüssen kommt erschwerend hinzu, dass die zugrundeliegende Komplexität aufgrund der steigenden Verfügbarkeit neuer Technologien stetig steigt, ein Konkurrenzdruck durch Wettbewerber herrscht und dass sich das Nutzerverhalten sowie die Anforderungen der Kunden ständig ändern³.

Der Entwickler steht somit vor der Herausforderung, die resultierende Komplexität aus den verschiedenen Einflüssen und Anforderungen zu beherrschen und daraus resultierende Zielkonflikte zu lösen, damit sich Produkte erfolgreich am Markt etablieren können. In diesem Kontext spielen Produktmodelle eine wichtige Rolle, deren Bedeutung in Abschnitt 1.1 erläutert wird.

1.1 Bedeutung von Produktmodellen in der Produktentwicklung

Während des gesamten Entwicklungsprozesses muss der Entwickler eine Vielzahl von Entscheidungen treffen, um eine schrittweise Konkretisierung des Produkts voranzutreiben. Zur Komplexitätsbeherrschung verwendet er hierfür verschiedene Hilfsmittel, um aus der Informationsflut stets die relevanten Informationen für eine bestimmte Fragestellung identifizieren zu können. Neben verschiedenen Werkzeugen wie PDM-Systemen, CAD-Systemen oder dem Methodeneinsatz spielt vor allem die Verwendung von Produktmodellen eine bedeutende Rolle⁴.

Produktmodelle bilden das Produkt auf einem definierten Abstraktionslevel ab, in dem alle relevanten Informationen für eine bestimmte Aufgabe oder ein Problem zweckmäßig abgebildet werden. Auf deren Basis trifft der Entwickler Entscheidungen, mit denen er die Konkretisierung des Produkts und somit auch dessen Verhalten maßgeblich beeinflusst. Aufgrund der Tatsache, dass gerade zu Beginn der Ent-

¹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 1; Lindemann (2007), S. 7.

² Vgl. Masing (2007), S. 3.

³ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 7.

⁴ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 8; Pahl et al. (2007), S. 10.

wicklung noch viele Aspekte über das zu entwickelnde Produkt und deren Lebenslaufprozesse unbekannt sind bzw. entsprechende Informationen darüber fehlen und sich die Informationslage der genannten Einflüsse im Produktentwicklungsprozess permanent ändert, trifft der Entwickler Annahmen. Diese wirken sich auch auf die Arbeit mit Produktmodellen aus, da er entscheiden muss, welche Informationen er im Produktmodell abbildet, um damit beispielsweise eine überschlägige Vorauslegung des Produkts durchzuführen. Hierbei entsteht zwangsläufig Unsicherheit, die unvermeidbar ist und sich auf die Entscheidungsfindung und somit auch auf die fortschreitende Konkretisierung des Produkts auswirkt. Dies kann zu Fehlentscheidungen und somit zu einer ungewollten Abweichung der geplanten von den realisierten Eigenschaften des Produkts führen, wodurch es sich in Lebenslaufprozessen nicht so verhält wie erwartet. Dies kann eine Gefährdung für den Kunden zur Folge haben, wenn er das entwickelte Produkt für seine Zwecke nutzt.

Die Relevanz dieser Gefahr lässt sich anhand der Auswertung von Produktrückrufen belegen, siehe Abbildung 1-1.

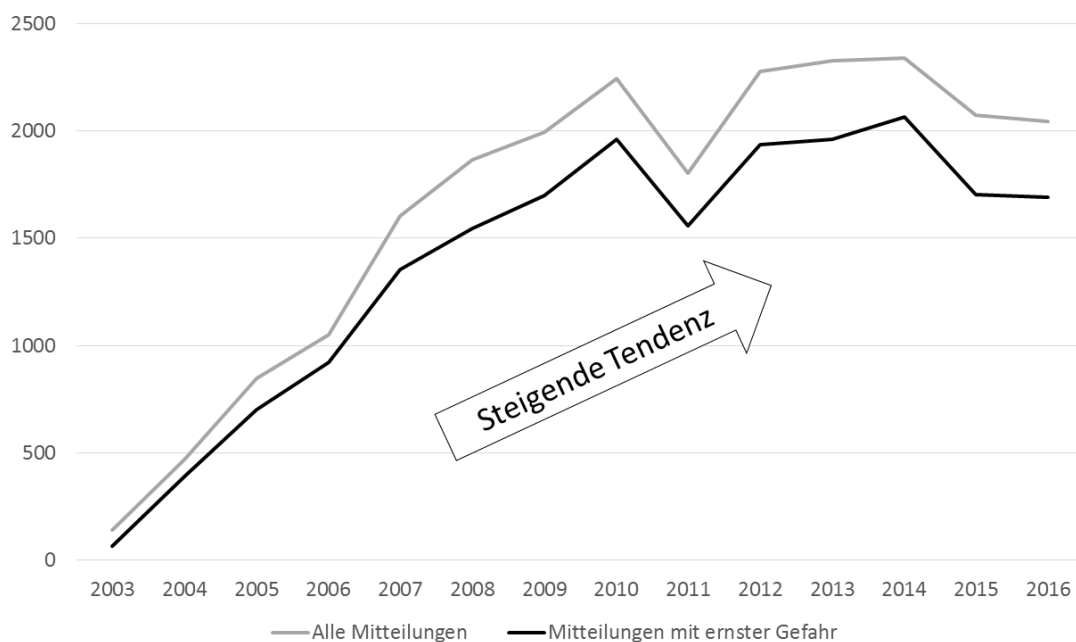


Abbildung 1-1: Produktrückrufe auf Basis der RAPEX Datenbank⁵

Diese werden beispielsweise von dem Schnellwarnsystem RAPEX der Europäischen Union oder auch von dem Kraftfahrtbundesamt gesammelt und jährlich zur Verfügung gestellt. Anhand der ausgewerteten Daten lässt sich eine steigende Anzahl an

⁵ Zugrundeliegende Daten entnommen aus Europäische Kommission (2017), S. 7.

Produktrückrufen in den letzten Jahren erkennen, die sich u. a. auf die steigende Komplexität der Produkte zurückführen lässt. Hierbei fallen alleine 18% aller Mitteilungen auf die Automobilindustrie zurück, einer der bedeutendsten Branche des Maschinenbaus, siehe Abbildung 1-2.

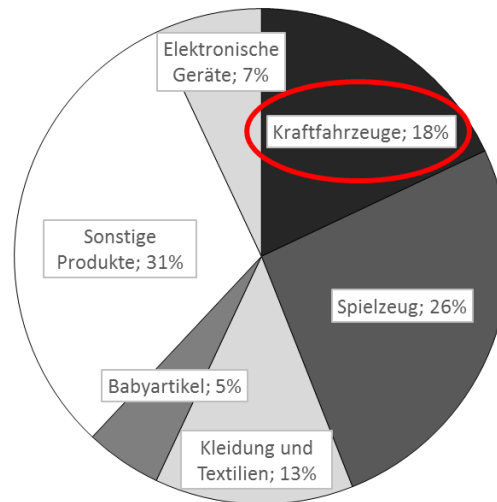


Abbildung 1-2: Die fünf größten Produktkategorien der Rückrufaktionen⁶

Im Folgenden werden zwei ausgewählte Beispiele aus der Automobilbranche vorgestellt, an denen die Bedeutung von Produktmodellen verdeutlicht wird.

1.1.1 Rückrufaktion General Motors

Eine der größten Rückrufaktionen der letzten Jahre ereignete sich im Jahr 2014. Betroffen war der Automobilkonzern General Motors, der aufgrund defekter Zündschlösser etwa 2,6 Millionen Fahrzeuge zurückrufen musste. Mit dem Zündschlossskandal werden 124 Todesfälle sowie 275 Verletzte in Verbindung gebracht. General Motors erklärte sich zu einer Zahlung von 900 Millionen Dollar bereit, weiterhin wurde ein Entschädigungsfonds in Höhe von 625 Millionen Dollar für die Familien der tödlich Verunglückten eingerichtet.⁷

Das Zündschloss wird nach Betätigung des Zündschlüssels durch einen Stößel in der *An-Position* gehalten, der durch die Kraft F einer Schraubenfeder in eine Nut gedrückt wird und dadurch einen Form- und Reibschluss erzeugt, siehe Abbildung 1-3.

⁶ Zugrundeliegende Daten entnommen aus Europäische Kommission (2017), S. 10.

⁷ Vgl. Kröger (2015), S. 1.

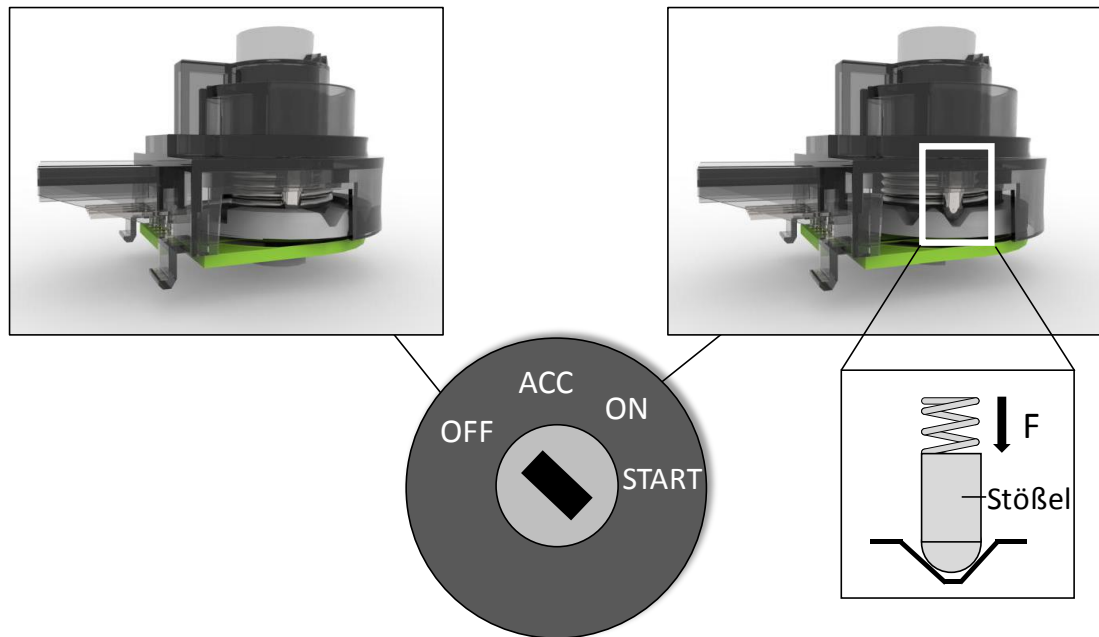


Abbildung 1-3: An- und Aus-Position des GM-Zündschlosses⁸

Bei den Zündschlössern bestand die Gefahr, dass der Zündschlüssel unbeabsichtigt von der *An* in die *Aus-Position* springt, wodurch sich elektronische Systeme im Fahrzeug wie Servolenkung, Bremskraftverstärker oder Airbags abschalten⁹. Auslöser für das Herausspringen des Stößels aus der *An-Position* waren u. a. aus dem Durchfahren von Schlaglöchern resultierende, stoßartige Belastungen auf das Zündschloss sowie Gewichte am Zündschlüssel selbst in Form von weiteren Schlüsseln¹⁰. Die Hauptursache für das Versagen lag in einer bestehenden, mehrfachen Passung zwischen dem oberen und unteren Gehäuseteil des Zündschlosses, siehe Abbildung 1-4. Gleichzeitig wurde für beide Bauteile ein kostengünstiges Fertigungsverfahren zur Herstellung gewählt, was zu hohen geometrischen Schwankungen führte. Dies hat zur Folge, dass sich je nach Zündschloss aufgrund der sich einstellenden Toleranzketten an unterschiedlichen Stellen ein Wirkflächenpaar zwischen den Gehäusenhälften einstellt¹¹, siehe Abbildung 1-4.

Da die Ausprägung der Federkraft des Stößels vom sich einstellenden Wirkflächenpaar der beiden Bauteile abhängt, unterliegt diese von Zündschloss zu Zündschloss ebenfalls großen Schwankungen. Tritt nun der kombinierte Fall eines Zündschlosses mit geringer Federkraft und einer der beiden oben genannten Auslöser auf,

⁸ Vgl. Eifler et al. (2014), S. 54.

⁹ Vgl. Kröger (2015), S. 1.

¹⁰ Vgl. Picchi (2014), S. 1.

¹¹ Vgl. Eifler et al. (2014), S. 55f.

kommt es zum Herauspringen des Stößels und somit zum ungewollten Ausschalten des Fahrzeugs.

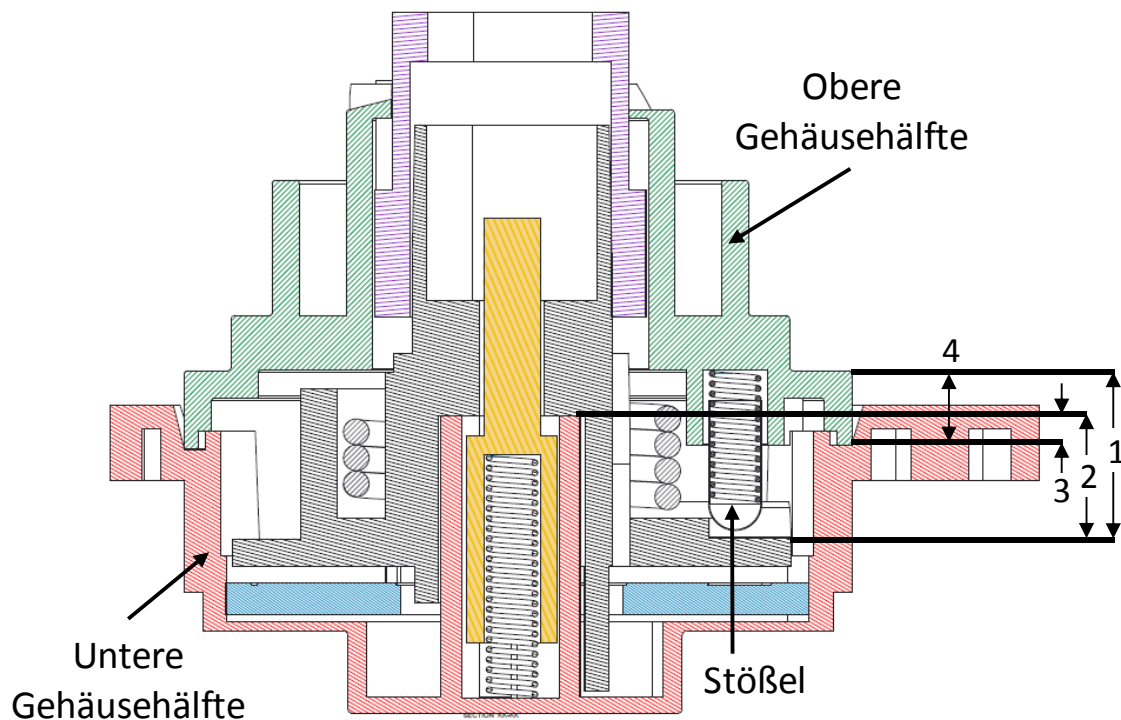


Abbildung 1-4: Toleranzkette im Zündschloss¹²

Für das beschriebene Beispiel wäre somit eine kombinierte Betrachtung der geometrischen Abweichungen der Bauteile des Zündschlosses und der Fahrt durch ein Schlagloch in einem Produktmodell notwendig gewesen, um das ungewollte Ausschalten bereits im Produktentwicklungsprozess zu erkennen.

1.1.2 Rückrufaktion Toyota

Bei einem weiteren bekannten Beispiel handelt es sich um die Rückrufaktion des Automobilherstellers Toyota. Aufgrund von klemmenden Gaspedalen kam es zu zahlreichen Unfällen, teilweise auch mit Todesfolge. Der Konzern musste einen Betrag von 1,2 Milliarden Dollar zahlen, um ein Strafverfahren abzuwenden¹³.

Wie in Abbildung 1-5 erkennbar, ist das betreffende Gaspedal an einer Aufhängung gelagert. An der Seite befindet sich ein Reibungsschuh, in den das Gaspedal bei

¹² Vgl. Eifler et al. (2014), S. 545.

¹³ Vgl. Reiche (2014), S. 1

Betätigung durch den Fahrer eintaucht und dadurch geführt wird. Die Rückstellfeder sorgt dafür, dass das Gaspedal nach einer aufgebrachten Kraft wieder in seine Ausgangsposition zurückgedrückt wird.

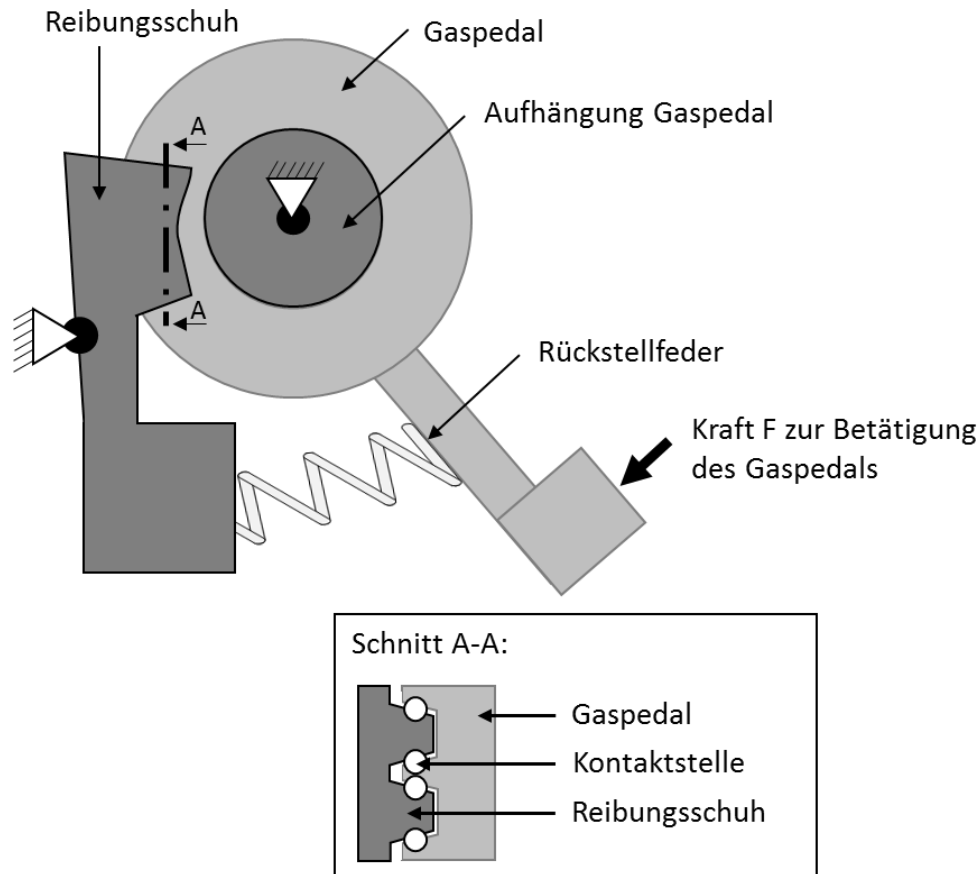


Abbildung 1-5: Schematische Darstellung des Toyota Gaspedals

Auslöser für das Klemmen war neben verrutschten Fußmatten im Fahrerinnenraum vor allem eine erhöhte Reibung zwischen dem Reibungsschuh und dem Gaspedal.¹⁴ Verursacht wurde diese hauptsächlich durch eine hohe Feuchtigkeit im Innenraum¹⁵, die zu einem Quellen der beiden Bauteile geführt hat. Aufgrund der gewählten Geometrie des Reibungsschuhs erhöhte sich dadurch die Reibung deutlich. Dies hatte zur Folge, dass je nach Ausprägung des Quellens die Kraft der Rückstellfeder nicht mehr ausreichte, um das Gaspedal wieder in die Ausgangsposition zu bringen.

¹⁴ Vgl. Reiche (2014), S. 1.

¹⁵ Vgl. Strassmann (2010), S. 1.

In diesem Beispiel wäre eine Betrachtung der Geometrie des Reibungsschuhs in Kombination mit einer Betätigung des Gaspedals in einer feuchten Umgebung hilfreich gewesen, um die erhöhte Reibung frühzeitig zu erkennen und durch konstruktive Anpassungsmaßnahmen zu reduzieren.

1.2 Motivation und Gegenstand der Arbeit

Anhand der beiden vorgestellten Beispiele lässt sich erkennen, dass jeweils ein kombiniertes Auftreten von Effekten zum Versagen der Produkte geführt hat, die jeweils aufgrund von Unsicherheit nicht erkannt worden sind. Sie verdeutlichen die Bedeutung, relevante Informationen für eine Problemstellung zu identifizieren und in einem Produktmodell abzubilden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, den Entwickler bei der Identifikation von relevanten Informationen für ein Produktmodell zu unterstützen. Damit soll ein Beitrag zur Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen geleistet werden, um damit die Gefahr von *Fehlentscheidungen* in der Produktentwicklung zu verringern. Hieraus lassen sich die folgenden Schwerpunkte für diese Arbeit ableiten:

- Eine wesentliche Herausforderung besteht darin zu erkennen, wie der Entwickler Informationen bei der Erstellung von Produktmodellen verarbeitet und welche Typen von Produktmodellen es gibt, in denen Informationen abgebildet werden. Weiterhin soll identifiziert werden, wofür Produktmodelle benötigt werden und wie diese sich im Produktentwicklungsprozess verorten lassen.
- Darauf aufbauend gilt es herauszustellen, wie Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen entsteht, auf welche Ursachen sich Unsicherheit zurückführen lässt und welche Defizite bei bestehenden Ansätzen zur Unterstützung des Entwicklers für diese Thematik vorliegen.
- Abgeleitet aus dem erarbeiteten Verständnis von Unsicherheit und Defizite bestehender Unterstützungsansätze soll ein methodischer Ansatz entwickelt werden, mit dessen Hilfe relevante Informationen identifiziert und im Hinblick auf die vorgegebene Aufgabenstellung ausgewertet werden können, um damit einen Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit zu leisten.

1.3 Einordnung der Arbeit in die Forschungstätigkeiten des SFB 805

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Forschungstätigkeiten des SFB 805 mit dem Titel „*Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus*“.

Ziel des Sonderforschungsbereichs ist die lebenslaufübergreifende Beherrschung von Unsicherheit, wobei sowohl die Produktentwicklung als auch die sich anschließenden Produktions- und Nutzungsphasen eines lasttragenden Systems betrachtet werden. Hierbei wird Unsicherheit aus unterschiedlichen Perspektiven beleuchtet und sowohl methodische als auch technologische Ansätze zur Unsicherheitsbeherrschung erarbeitet. Grundannahme des gesamten SFBs ist, dass Unsicherheit in Prozessen auftritt. Dieser gesetzte Schwerpunkt wird im Laufe dieser Arbeit sowohl bei der Konsolidierung des Stands der Forschung in Kapitel 2 als auch bei der detaillierten Zielsetzung in 4 berücksichtigt und bildet somit die Grundlage für die Unterstützung des Entwicklers im Rahmen dieser Arbeit.

1.4 Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf der Einleitung gliedert sich die Arbeit in 8 Kapitel. In Kapitel 2 werden zunächst notwendige Grundlagen erarbeitet, um darauf aufbauend in Kapitel 3 ein konsolidiertes Verständnis der Verwendung von Produktmodellen im Produktentwicklungsprozess zu entwickeln und eine Verortung von Unsicherheit vornehmen zu können.

Anhand der vorgenommenen Konsolidierung wird in Kapitel 4 die Zielsetzung weiter detailliert und die Notwendigkeit der Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklers erarbeitet.

In Kapitel 5 erfolgt eine detaillierte Darstellung des Lebenszyklus eines Produktmodells um zu erkennen, welche Arten von Annahmen der Entwickler trifft.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 6 eine methodische Unterstützung erarbeitet, die mit Hilfe einer detaillierten Prozessanalyse Informationen aus dem Lebenslauf aufbereitet, detailliert und im Hinblick auf *Relevanz* auswertet.

In Kapitel 7 wird die methodische Unterstützung am Beispiel eines Hydraulikmembranaktors sowie am Beispiel einer elektrischen Parkbremse evaluiert.

Kapitel 8 schließt die Arbeit mit einem Fazit und einem Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen ab.

2 Stand der Forschung

An dieser Stelle wird zunächst ein Verständnis des Begriffs *Unsicherheit* erarbeitet. Anschließend wird auf grundlegende, definitorische Grundlagen eingegangen, die u. a. zur Erläuterung der Informationsverarbeitung bei der Erstellung von Produktmodellen in Unterabschnitt 3.2.2 benötigt werden. Weiterhin sind die Grundlagen zum Verständnis der Unterstützung für den Entwickler in Abschnitt 6.2 von Bedeutung.

Abschließend wird ein Überblick über Produktentwicklungsprozesse gegeben. Damit lässt sich zum einen die Frage aus Abschnitt 1.2 beantworten, wofür Produktmodelle benötigt werden und welche prinzipiellen Produktmodelltypen es gibt. Zum anderen wird dieser Überblick in Kapitel 3 verwendet, um eine konsolidierte Vorstellung der Verwendung von Produktmodellen für diese Arbeit zu erstellen.

2.1 Unsicherheit im Maschinenbau

Im Zuge steigender Anzahlen von Produktrückrufaktionen ist im Maschinenbau ein steigendes Bewusstsein zu erkennen, sich mit dem Thema *Unsicherheit* auseinanderzusetzen¹⁶. Aufgrund sehr heterogener Fragestellungen der einzelnen Wissenschaftsfelder herrscht jedoch kein einheitliches Verständnis von Unsicherheit¹⁷. Im Folgenden werden grundlegende Definitionen des Unsicherheitsbegriffs der Literatur vorgestellt, in das Unsicherheitsverständnis des SFB eingeordnet und daraus ein konsolidiertes Verständnis für diese Arbeit abgeleitet.

2.1.1 Der Begriff Unsicherheit

Dem Begriff *Unsicherheit* liegen in den verschiedenen Disziplinen des Maschinenbaus unterschiedliche Verständnisse zugrunde, die jedoch häufig nicht klar definiert und teilweise auch als Synonyme für Begriffe wie *Fehler* oder *Risiko* verwendet werden¹⁸. So bezieht sich Unsicherheit im Bereich der Messtechnik auf die Fragestellung, wie exakt eine gemessene die zu messende Größe repräsentiert¹⁹. Im Bereich der Mathematik dient Unsicherheit u. a. als Maß für die *Wahrscheinlichkeit*

¹⁶ Vgl. Thunnissen (2005), S. 27; Kreye et al. (2011), S. 97; van Venrooy (2015), S. 1ff.

¹⁷ Vgl. Thunnissen (2005), S. 24; Knetsch (2006), S. 13; Hanselka, Platz (2010), S. 56.

¹⁸ Vgl. Oberkampf et al. (2002), S. 336; Ang, Tang (1984), S. 1ff.; Morgan, Henrion (1992), S. 47ff.

¹⁹ Vgl. JCGM (2008), S. 2.

zukünftiger Ereignisse und wird somit im Sinne einer *Prognoseunsicherheit* verwendet²⁰. In den Ingenieurwissenschaften hingegen wird unter Unsicherheit vor allem die *Unklarheit* bzw. die *Intransparenz* verstanden, die aus der gestellten Aufgabe an den Entwickler resultiert. Daraus entstehen *Ungenauigkeiten* bei der konstruktiven Auslegung von Produkten, die sich auf Daten-, Bewertungs-, Beurteilungs- und Entscheidungsunsicherheit zurückführen lassen und u. a. zu Überdimensionierungen, Maßabweichungen in der Produktion oder zu erhöhtem Verschleiß der Produkte bei deren Verwendung führen können²¹.

Eine inhaltliche Abgrenzung bzw. Konsolidierung des unterschiedlichen Verständnisses von Unsicherheit wird hingegen in der Literatur nicht vorgenommen, sondern jeweils nur im Hinblick auf die jeweilige Zielsetzung beschrieben²².

Erkennbar ist jedoch, dass sich eine wesentliche Ursache von Unsicherheit auf die Informationsverfügbarkeit²³ für bestimmte Fragestellungen im Maschinenbau zurückführen lässt²⁴. Abgeleitet aus dem Risikomanagement wird Unsicherheit daher wie folgt definiert:

„Unsicherheit ist ein Zustand, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen [...] oder Wissen [...] ergibt“²⁵.

Diese grundlegende Definition von Unsicherheit beinhaltet eine unmittelbare Verknüpfung zu den Begriffen *Daten*, *Informationen* und *Wissen*, die in der Literatur voneinander abgegrenzt werden und stets aufeinander aufbauen²⁶, siehe Abbildung 2-1.

Unter Daten werden Fakten verstanden, die noch in keinem Zusammenhang stehen und somit noch nicht hinsichtlich ihrer Verwendung in der Entwicklung deutbar

²⁰ Vgl. Fahrmeir et al. (2007), S. 1ff.

²¹ Vgl. u. a. Otto, Antonsson (1994), S. 234f.; Lindemann (2007), S. 178ff.; Pahl et al. (2007), S. 179ff.; 499ff.; 693ff.; Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 59f.

²² Vgl. DeLaurentis, Mavris (2000), S. 2; Kreye et al. (2011), S. 98.

²³ Vgl. DeLaurentis, Mavris (2000), S. 2f.; Knetsch (2006), S. 30; Drosig (2006), S. 29.

²⁴ Neben der Informationsverfügbarkeit lässt sich eine weitere wesentliche Ursache auf die Übermittlung von Informationen zwischen Entwicklern zurückführen. Es können Kommunikationsprobleme auftreten, was zu Fehlinterpretationen von übermittelten Informationen führt und somit zu Unsicherheit beiträgt. Diese Ursache wird im Rahmen dieser Arbeit nicht thematisiert, hierfür sei auf einschlägige Literatur wie Picot et al. (2010), S. 77ff. verwiesen.

²⁵ DIN-Norm 31000 (2011), S. 9

²⁶ Vgl. VDI-Richtlinie 5610 (2009), S. 4ff.; North (2011), S. 36ff.; Krcmar (2005), S. 14ff.

sind²⁷. Werden diese strukturiert, interpretiert und einem bestimmten Zweck zugeordnet bzw. in einen Bedeutungskontext gesetzt, entstehen Informationen²⁸. Durch die Kombination der Daten *210, GPa* und *Stahl* lässt sich beispielsweise die Information *Elastizitätsmodul von Stahl* bestimmen, ähnliches gilt für die Kombination der Daten *x20, M6, 4014, DIN* und *LH* zu einer nach *DIN 4014* genormten, metrischen Sechskantschraube mit *6mm* Durchmesser, *20mm* Länge und Linksgewinde, siehe Abbildung 2-1.

Von Wissen spricht man, wenn zweckmäßig vernetzte Informationen vorliegen²⁹. So kann zum Beispiel durch die Verknüpfung einer Anforderung und der Information *Elastizitätsmodul von Stahl* oder Sechskantschrauben nach *DIN 4014* eine Handlungsempfehlung zur Konstruktion von Produkten abgeleitet werden siehe Abbildung 2-1.

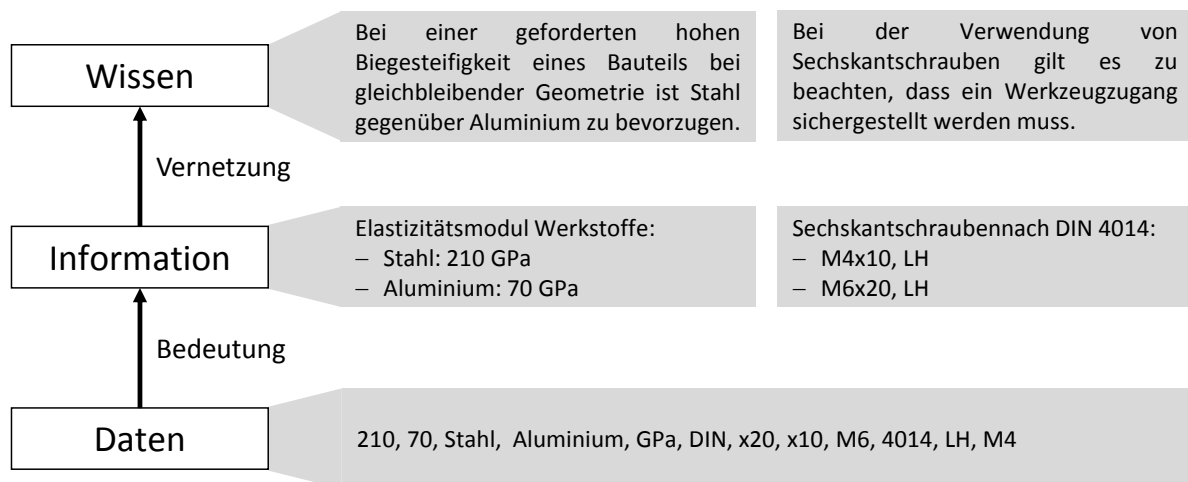


Abbildung 2-1: Daten, Information, Wissen³⁰

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden unter Informationen somit stets Daten verstanden, denen eine Bedeutung zugeordnet wird.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Informationsverfügbarkeit in der Produktentwicklung permanent ändert und gleichzeitig einen wesentlichen Einfluss auf Unsicherheit darstellt, besteht die Notwendigkeit, den Zusammenhang zwischen Information und Unsicherheit weiter zu präzisieren. In der Literatur wird hierbei zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit unterschieden.

²⁷ Vgl. VDI-Richtlinie 5610 (2009), S. 4.

²⁸ Vgl. VDI-Richtlinie 5610 (2009), S. 4; Rehäuser, Krcmar (1996), S. 5f.; North (2011), S. 37.

²⁹ Vgl. VDI-Richtlinie 5610 (2009), S. 4; North (2011), S. 37.

³⁰ In Anlehnung an Rehäuser, Krcmar (1996), S. 6f.

„Unter **aleatorischer Unsicherheit** wird Unsicherheit durch zufällige Variation der stochastischen Natur von Einflussgrößen verstanden“. ³¹

Diese Definition basiert auf der Annahme, dass eine vollkommene Informationslage vorliegt, wodurch das System vollständig determiniert werden kann. Es verbleibt jedoch eine Restunsicherheit in Form von natürlichen Schwankungen der Einflussgrößen, wie beispielsweise die der Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Luftdruck, die auf das System wirken. Diese können zwar mit Hilfe von Informationen beschrieben, aber nicht eliminiert werden, da der zugrundeliegende Determinismus der Einflussgrößen von keinem Individuum erkannt werden kann³².

„Unter **epistemischer Unsicherheit** wird Unsicherheit in Folge ungenauer Kenntnis des Sachverhalts verstanden“. ³³

Bei epistemischer Unsicherheit wird davon ausgegangen, dass das System nur teilweise bzw. näherungsweise aufgrund fehlender Informationen beschrieben werden kann. Es kann somit zu einer potentiellen, ungewollten Ungenauigkeit kommen.³⁴ Durch die Generierung von zusätzlichen Informationen, beispielsweise durch detailliertere Analysen von bestehenden bzw. der Identifikation von weiteren Einflussgrößen, kann die Ungenauigkeit so lange reduziert werden, bis ausschließlich aleatorische Unsicherheit vorliegt. Hierbei spielt das Wissen des Entwicklers sowie dessen Verständnis vom betrachteten System eine wichtige Rolle und beeinflusst den Umfang der Reduktion von epistemischer Unsicherheit.

Den Zusammenhang zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit fasst KNETSCH in einer qualitativen Darstellung zusammen, siehe Abbildung 2-2.

Ausgehend von einem Informationsstand, der dem Entwickler vorliegt, lässt sich epistemische Unsicherheit durch Generierung von weiteren Informationen reduzieren. Der Übergang zu dem aleatorischen Bereich hängt hierbei von der Anzahl wirkender Einflussgrößen ab, die auf das betrachtete System wirken und verschiebt sich entsprechend entlang der Unsicherheitsachse. Weiterhin ist die notwendige

³¹ Vgl. Knetsch (2006), S. 3; Thunnissen (2005), S. 24f.; Choi (2005), S. 56. Oberkampff et al. (2002), S. 336f.

³² Vgl. Ocker (2010), S. 57f.

³³ Vgl. Knetsch (2006), S. 3; Thunnissen (2005), S. 24f.; Choi (2005), S. 56. Oberkampff et al. (2002), S. 336f.

³⁴ Vgl. Oberkampff et al. (2002), S. 336.

Menge an Informationen, mit der man epistemische Unsicherheit eliminieren und aleatorische Unsicherheit komplett beschreiben kann, vom betrachteten System abhängig³⁵.

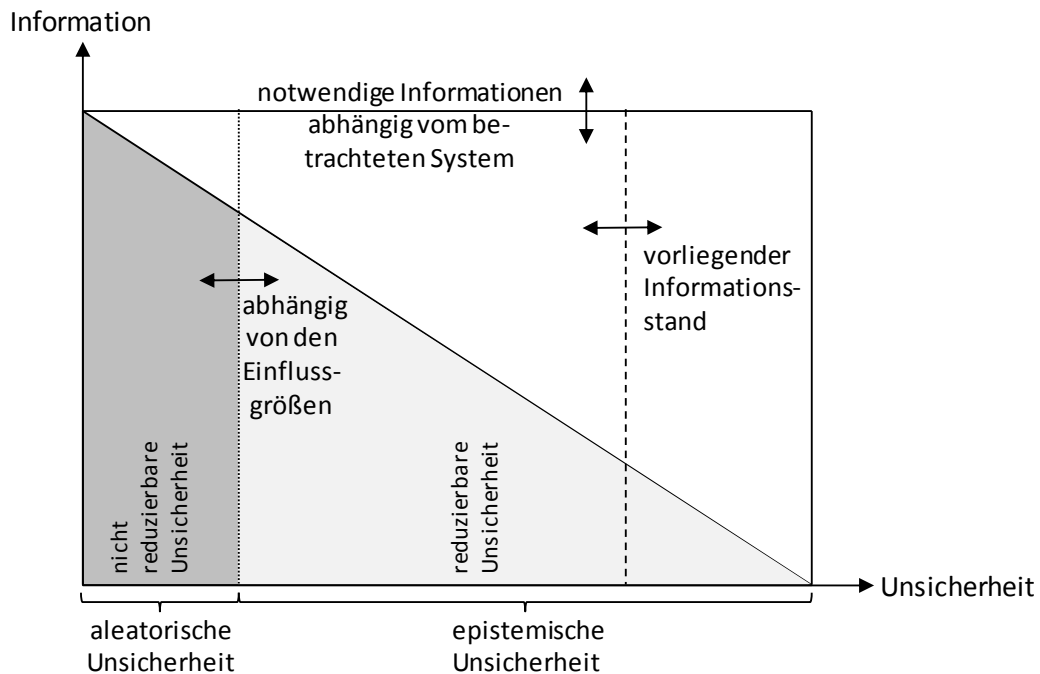


Abbildung 2-2: Zusammenhang zwischen Information und Unsicherheit³⁶

Neben einer unvollkommenen Informationslage als eine Ursache für Unsicherheit spielt deren Manifestation eine wichtige Rolle. WALKER et al. und KREYE et al. beziehen diese auf die Informationsverarbeitung im Rahmen der modellbasierten Unterstützung von Entscheidungsprozessen³⁷, siehe Abbildung 2-3. Basierend auf einer bestehenden Informationslage wird ein Kontext festgelegt, unter dem die für die zu treffende Entscheidung zugrundeliegende Situation betrachtet wird. Darauf aufbauend werden relevante Daten bzw. Informationen festgelegt und in einem Modell abgebildet, um die Situation beschreiben zu können. Jeder dieser Schritte ist wiederum unsicherheitsbehaftet und beeinflusst somit den Entscheidungsprozess³⁸. Unter *Kontextunsicherheit* wird das potentielle Fehlen von Einflüssen auf die

³⁵ Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der menschliche Einfluss auf die Analyse von Unsicherheit bei der Produktmodellierung nicht weiter betrachtet. Hierfür wird an dieser Stelle auf einschlägige Literatur wie beispielsweise Thunnissen (2003), S. 2ff., Ghirardato et al. (2008), S. 3ff. oder Morone, Morone (2008), S. 205ff. verwiesen.

³⁶ In Anlehnung an Knetsch (2006), S. 31.

³⁷ Vgl. Walker et al. (2003), S. 8ff.; Kreye et al. (2011), S. 2ff.

³⁸ Kreye et al. (2011), S. 3ff.

betrachtete Situation verstanden, die sich wiederum auf Input, Modell und Outcome auswirkt. *Datenunsicherheit* hingegen beschreibt die Ungenauigkeit oder Unvollständigkeit der verwendeten Daten, die dem Modell als Input dienen. Unter *Modellunsicherheit* wird verstanden, ob das Modell die betrachtete Situation ausreichend genau beschreibt.

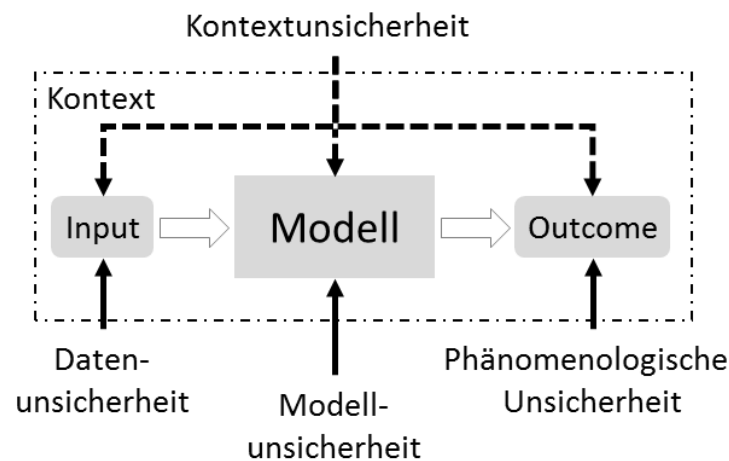


Abbildung 2-3: Manifestation von Unsicherheit³⁹

Aufgrund der getroffenen Festlegungen können im Rahmen des sich anschließenden Entscheidungsprozesses zukünftige Ereignisse unvorhergesehen beeinflusst werden, was unter dem Begriff der *phänomenologischen Unsicherheit* zusammengefasst wird.

2.1.2 Sonderforschungsbereich 805

Im Sonderforschungsbereich 805 wird das Thema Unsicherheit interdisziplinär untersucht mit dem Ziel, sowohl methodische als auch technologische Ansätze zu deren Beherrschung zu erarbeiten. Im Fokus der Untersuchung steht eine zunächst rein technisch orientierte Betrachtung von Unsicherheit in Entwicklung, Produktion und Nutzung lasttragender Systeme, um deren Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erhöhen bei gleichzeitiger Schonung von Ressourcen durch das Vermeiden von Überdimensionierungen⁴⁰.

Alle im Sonderforschungsbereich verfolgten Ansätze basieren auf der Annahme, dass Unsicherheit in Prozessen auftritt. Darauf aufbauend wurde folgende Arbeitshypothese erarbeitet:

³⁹ In Anlehnung an Kreye et al. (2011), S. 99.

⁴⁰ Vgl. Hanselka, Platz (2010), S. 55.

„Unsicherheit tritt auf, wenn Prozesseigenschaften eines Systems nicht oder nicht vollständig determiniert werden können⁴¹.“

Als unsicher werden demnach Einflussgrößen verstanden, die in Prozessen der Entwicklungs- oder Lebenslaufphasen eines lasttragenden Systems auftreten und deren Wirkung auf das System nicht oder nicht ausreichend bekannt ist. Zur Beschreibung der Wirkung von Unsicherheit wurde im Sonderforschungsbereich ein Unsicherheitsmodell erarbeitet, das zwischen Unwissen, Ungewissheit und stochastischer Unsicherheit unterscheidet, siehe Abbildung 2-4.

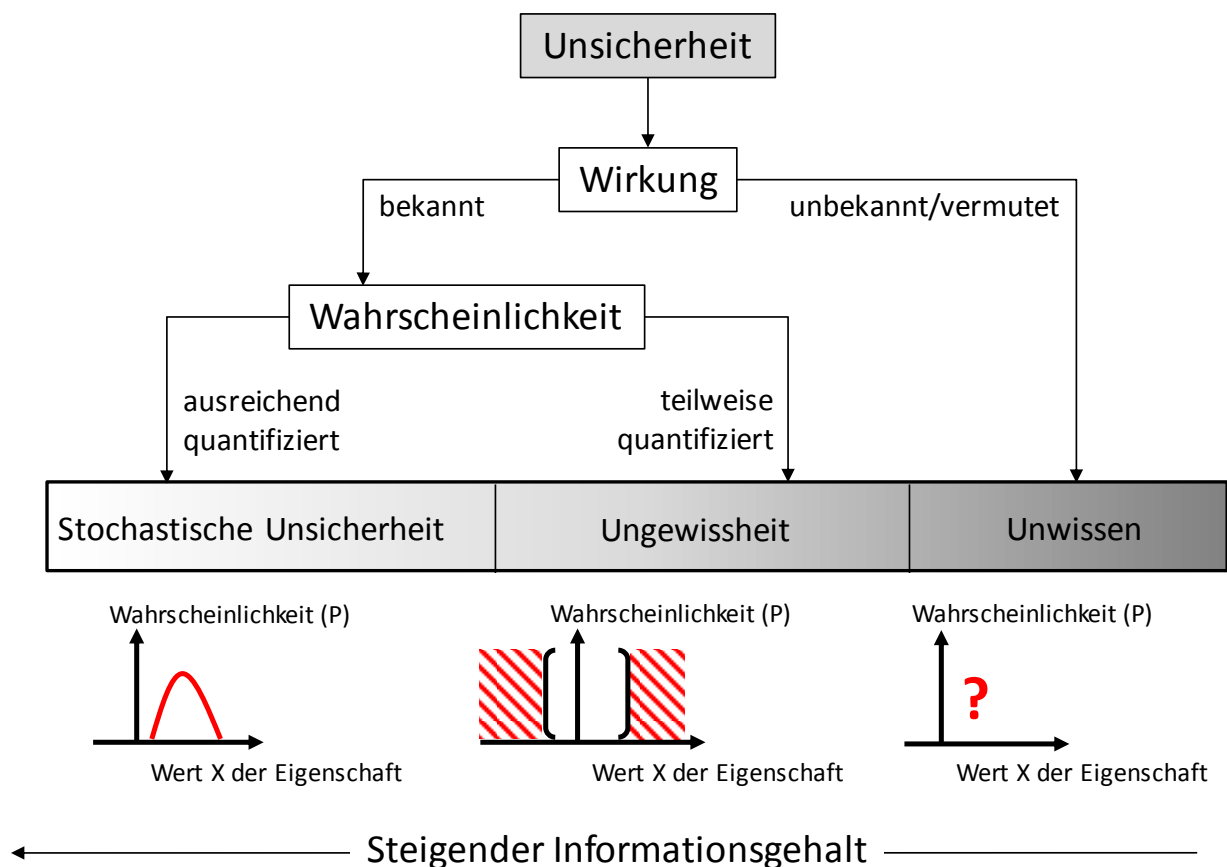


Abbildung 2-4: SFB 805 Unsicherheitsmodell⁴²

Im Falle von *Unwissen* sind Einflussgrößen bzw. die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und dem Prozess gänzlich unbekannt und es kann keine Aussage über eine Unsicherheitswirkung getroffen werden.

⁴¹ Vgl. Hanselka, Platz (2010), S. 57.

⁴² Engelhardt et al. (2012), S. 35.

Bei *Ungewissheit* sind die Wirkungen von Einflussgrößen weitgehend bekannt, können aber aufgrund einer eingeschränkten Informationslage nur teilweise quantifiziert werden. Dieser Zustand kann als epistemisch angesehen werden und unterliegt somit dem Verständnis von epistemischer Unsicherheit des Unterabschnitts 2.1.1.

Stochastische Unsicherheit hingegen liegt vor, wenn die Wirkungen von Einflussgrößen in Prozessen vollständig mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie beschrieben werden können, was dem Verständnis von aleatorischer Unsicherheit entspricht.

2.1.3 Verständnis von Unsicherheit in der Produktentwicklung

Anhand des hier vorgestellten Begriffsverständnisses von Unsicherheit wird deutlich, dass eine Abhängigkeit zwischen deren Ursache, Erscheinen und Wirkung existiert. Da die gesamte Produktentwicklung geprägt ist von einer unvollständigen und sich permanent ändernden Informationslage⁴³, auf deren Basis Produktmodelle erstellt und Entscheidungen getroffen werden müssen, ist vor allem der epistemische Teil von Unsicherheit von besonderer Bedeutung. Liegen unvollständige Informationen vor, entsteht während der Informationsverarbeitung im Rahmen der Analyse bzw. der Beschreibung einer Situation oder eines Systems Unsicherheit, die sich wiederum anhand deren Wirkung beschreiben lässt. Die Informationsverarbeitung selbst wird in Prozessen vorgenommen, wobei im Rahmen der Produktentwicklung vor allem Entwicklungsprozesse relevant sind.

Zusammenfassend lässt sich aus den hier dargestellten Erkenntnissen für diese Arbeit das folgende Verständnis von Unsicherheit ableiten, das als wesentliche Grundlage für die Verortung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen in Abschnitt 3.3 dient:

Unsicherheit...

- ... ist ein Zustand ungenauer Kenntnis des Sachverhalts,
- ... resultiert aus fehlenden Informationen,
- ... entsteht bei der Verarbeitung von Informationen in Entwicklungsprozessen,
- ... kann zu einer ungewollten, nicht bemerkten Ungenauigkeit führen,
- ... lässt sich anhand von deren Wirkung beschreiben bzw. abschätzen.

⁴³ Vgl. Kreye et al. (2011), S. 97f.; Grebici et al. (2008), S. 3ff.

2.2 Definitoriale Grundlagen

Im Folgenden wird auf notwendige Grundlagen und Definitionen eingegangen, die zum Verständnis der angestrebten, konsolidierten Betrachtung der Verwendung von Produktmodellen in Kapitel 3 dienen. Hierbei wird jeweils auf die entsprechende Stelle verwiesen, an der die Grundlagen zum Verständnis des Vorgehens dieser Arbeit benötigt werden.

2.2.1 Definition Produkt

Unter einem *Produkt* wird ein technisches Gebilde verstanden, mit dem die gestellte, technische Aufgabe an die Produktentwicklung gelöst werden kann⁴⁴. Das Spektrum an technischen Gebilden bzw. Produkten ist groß und lässt sich anhand von Produktbereichen wie beispielsweise der Automobiltechnik, Fahrzeugtechnik, Anlagentechnik oder Produktionstechnik sowie anhand ihrer Komplexität in Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Maschinenelement oder Einzelteil gliedern⁴⁵.

Da Produkte stets in Systeme eingebettet sind und mit diesen auch verträglich sein müssen, hat sich zur Beschreibung von Produkten bzw. technischen Gebilden die Systemtechnik in der Produktentwicklung als vorteilhaft erwiesen⁴⁶, die dieser Arbeit im weiteren Verlauf zugrunde gelegt wird.

2.2.2 Definition System

Als *System* wird ein aus einer endlichen Menge an Elementen nach bestimmten Regeln geordnetes Ganzes bezeichnet⁴⁷. Es bestehen Beziehungen zwischen den Elementen, die durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt werden⁴⁸. Generell lässt sich zwischen natürlichen Systemen, die sich in der Natur beobachten lassen, und vom Menschen geschaffenen, künstlichen Systemen unterscheiden⁴⁹. Unabhängig von der Art des Systems leitet ROPOHL aus den Erkenntnissen der allgemeinen Systemtheorie drei unterschiedliche Systemdeutungen ab, die jeweils

⁴⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 39.

⁴⁵ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 12; Pahl et al. (2007), S. 39.

⁴⁶ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 20f.; Pahl et al. (2007), S. 39f.

⁴⁷ Vgl. Hubka (1984), S. 11.

⁴⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21.

⁴⁹ Vgl. Hubka (1984), S. 5 und 17.

einen Aspekt zur deren Beschreibung in den Vordergrund stellen. Hierbei wird zwischen einem *funktionalen*, *strukturellen* und einem *hierarchischen* Systemkonzept unterschieden, siehe Abbildung 2-5.

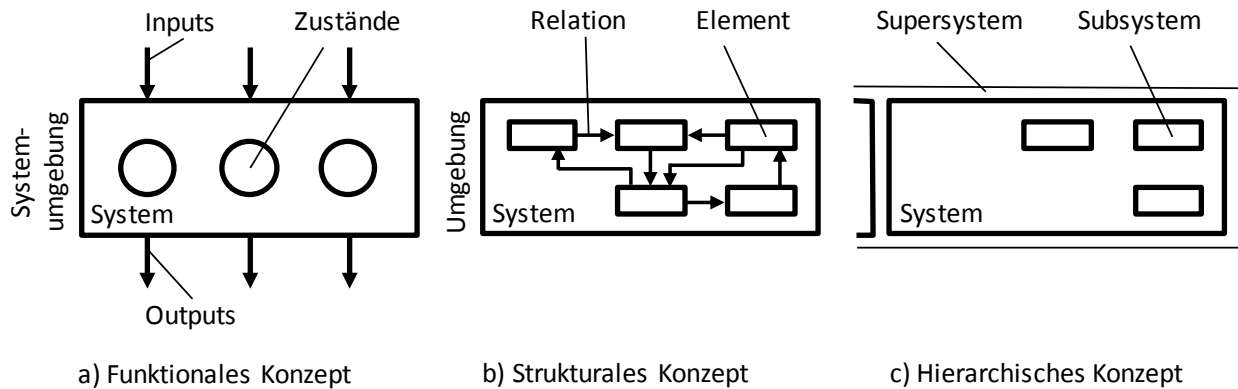


Abbildung 2-5: Konzepte der Systemtheorie⁵⁰

Das *funktionale* Systemkonzept stellt das System als Black-Box dar und fokussiert bei der Systembeschreibung auf die von außen beobachtbaren Größen. Hierunter fallen die Inputs und Outputs eines Systems sowie Zustände, die die Verfassung bzw. das Verhalten des Systems beschreiben. Beim funktionalen Systemdenken wird von der materiellen Konkretisierung und vom inneren Aufbau des Systems abgesehen und ausschließlich das Verhalten des Systems in seiner Umgebung untersucht⁵¹.

Beim *strukturellen* Systemkonzept wird das System als Ganzheit miteinander verknüpfter Elemente betrachtet, wobei die Vielfalt möglicher Beziehungsgeflechte im Fokus der Systembeschreibung steht. Kerngedanke dieses Konzepts ist es, dass stets die wechselseitigen Abhängigkeiten von Wirkungen zwischen den Elementen sowie zu anderen Teilen innerhalb des Systems betrachtet werden sollen⁵².

Das *hierarchische* Konzept fokussiert auf die Tatsache, dass sich ein betrachtetes System in sogenannte Subsysteme gliedern lässt oder Bestandteil eines übergeordneten Systems, einem Supersystem, sein kann. Es existieren somit Systemhierarchien mit mehreren Stufen, in denen je nach Betrachtungsweise ein Element als

⁵⁰ Vgl. Ropohl (2009), S. 76.

⁵¹ Vgl. Ropohl (2009), S. 75f.

⁵² Vgl. Ropohl (2009), S. 75.

System angesehen werden kann oder ein System ein Element eines übergeordneten Systems darstellt⁵³.

Entscheidend ist nach ROPOHL, dass sich die drei Systemkonzepte einander nicht ausschließen, sondern jedes System stets alle Aspekte der Konzepte umfasst. Je nach Betrachtungszweck wird einer der Aspekte hervorgehoben und eine hierfür geeignete Systemgrenze festgelegt⁵⁴.

2.2.3 Definition technisches System

Technische Systeme sind geometrisch stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck erfüllen und eine Untergruppe der künstlichen Systeme darstellen⁵⁵. Sie genügen dem Verständnis eines Systems und beinhalten somit auch alle drei Systemkonzepte. Die Zweckerfüllung wird durch die Umsetzung der zugrundeliegenden Aufgabe des technischen Systems mit Hilfe von physikalischen Effekten erreicht⁵⁶. Besteht beispielsweise die Aufgabe eines Systems darin, eine Last zu heben, kann diese mit Hilfe des physikalischen Effekts *Druckfortpflanzung* und dessen weiterer Konkretisierung zu einer *hydraulischen Hebebühne* umgesetzt werden. Technische Systeme interagieren durch ihre Inputs und Outputs mit ihrer Umgebung, siehe Abbildung 2-6.

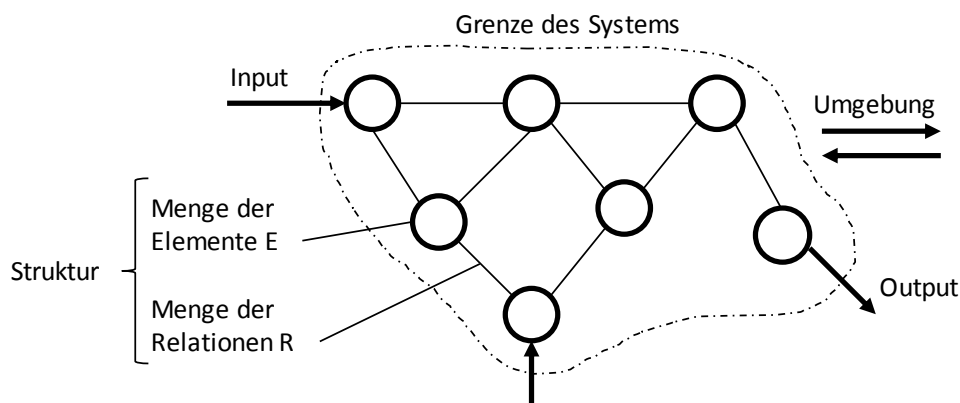


Abbildung 2-6: Modell eines (technischen) Systems⁵⁷

Die festgelegte Systemgrenze bestimmt die Menge an Elementen des betrachteten Systems, die in Relation zueinander stehen und dem System eine Struktur geben.

⁵³ Vgl. Hubka (1984), S. 11.

⁵⁴ Vgl. Ropohl (2009), S. 75ff.; Pahl et al. (2007), S. 40.

⁵⁵ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21.

⁵⁶ Vgl. Feldhusen (2016), S. 155.

⁵⁷ Vgl. Hubka (1984), S. 15.

Je nach Zweck können die Elemente wiederum als Sub- oder Teilsystem des übergeordneten Systems dargestellt werden. Jedes technische System lässt sich durch Eigenschaften beschreiben, wodurch sie sich voneinander unterscheiden lassen⁵⁸. Zu konstruierende Produkte werden, analog der vorherrschenden Meinung in einschlägiger Literatur⁵⁹, in dieser Arbeit als technische Systeme aufgefasst. Dadurch erleichtert sich die Vorstellung erheblich, von was der Entwickler ein Produktmodell bildet. Durch die erläuterten Systemkonzepte nach ROPOHL lassen sich somit Informationen über das Produkt strukturieren, die eine wesentliche Grundlage für die in Abschnitt 5.2 angestrebte Detailierung des Modellerstellungsprozesses darstellen.

2.2.4 Definition Modell

Basierend auf der Betrachtung von realen oder zu konstruierenden Produkten als technische Systeme werden in der Produktentwicklung Modelle erstellt und verwendet. Sie unterstützen den Entwickler beim Verständnis des Systems und leisten einen Beitrag, um die hohe Komplexität beherrschen zu können⁶⁰. In Abgrenzung zu anderen Anwendungsbereichen⁶¹ wird im Bereich der Produktentwicklung unter einem Modell ein gegenüber dem Original vereinfachtes, gedankliches oder stoffliches Gebilde verstanden, mit dessen Hilfe bestimmte Rückschlüsse auf das Original vollzogen werden können⁶². Modelle bilden eine gegenüber dem Original reduzierte Menge an Informationen ab, mit denen unterschiedliche Sachverhalte, wie die Beschreibung von Objekten oder Prozessen, dargestellt werden können⁶³. Sie trennen somit für die jeweilige Betrachtung Wesentliches vom Unwesentlichen, um das Original besser verstehen zu können⁶⁴. Jedes Modell hat dementsprechend eine zweckorientierte Komponente, auf deren Basis die Erstellung eines Repräsentanten vom Original durchgeführt wird⁶⁵.

Eine wichtige Grundlage des hier aufgeführten Verständnisses von Modellen in der Produktentwicklung besteht in der allgemeinen Modelltheorie nach STACHOWIAK.

⁵⁸ Vgl. Birkhofer (1980), S. 5.

⁵⁹ Vgl. Hubka (1984), S. 4ff.; Franke (1976), S. 186; Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27.

⁶⁰ Vgl. Lindemann (2007), S. 11.

⁶¹ Vgl. Jockisch, Rosendahl (2010), S. 26ff.

⁶² Vgl. Lindemann (2007), S. 331.

⁶³ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 41; Lindemann (2007), S. 331.

⁶⁴ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21.

⁶⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 80.

Sie kann als systematischer Ordnungsversuch des Modellbegriffs verstanden werden, die anwendungsunabhängig ist und vor allem durch wissenschaftstheoretische Erkenntnisse beeinflusst wurde⁶⁶. Ein Modell ist nach STACHOWIAK durch die drei Hauptmerkmale *Abbildungsmerkmal*, *Verkürzungsmerkmal* und *pragmatisches Merkmal* gekennzeichnet⁶⁷.

Das *Abbildungsmerkmal* besagt, dass Modelle stets Abbildungen eines Originals sind, wobei das Original auch ein Modell sein kann⁶⁸. Der Zusammenhang zwischen Original und Modell wird, in Anlehnung an den algebraischen Abbildungsbegriff der Mathematik⁶⁹, durch eine Zuordnung von Modell-Attributen zu Original-Attributen hergestellt⁷⁰.

Das *Verkürzungsmerkmal* besagt, dass nicht alle Attribute bzw. Elemente⁷¹ des Originals im Modell erfasst werden, sondern nur diejenigen, die dem Modellerschaffer und bzw. oder dem Modellbenutzer relevant erscheinen⁷². Neben der Vernachlässigung von Elementen (präterierte Elemente) ist es möglich, dass Elemente des Originals im Modell mit einer anderen Bedeutung (Transkodierung) belegt oder besonders hervorgehoben werden (Kontrastierung). Weiterhin können auch im Modell Elemente hinzugefügt werden, die im Original kein Äquivalent aufweisen (abundante Elemente)⁷³.

Das *pragmatische Merkmal* stellt den Zweck und den Nutzen eines Modells in den Vordergrund und besagt, dass Modelle nicht eindeutig ihren Originalen zugeordnet werden können und stets ihre Ersetzungsfunktion für bestimmte Subjekte, innerhalb bestimmter Zeitintervalle und unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen, erfüllen⁷⁴.

Die Hauptmerkmale können nicht losgelöst voneinander betrachtet werden, sondern sind voneinander abhängig, siehe Abbildung 2-7.

⁶⁶ Vgl. Stachowiak (1973), S. 56ff.

⁶⁷ Vgl. Stachowiak (1973), S. 128ff.

⁶⁸ Vgl. Stachowiak (1973), S. 131.

⁶⁹ Vgl. Fischer (2010), S. 32ff.

⁷⁰ Vgl. Stachowiak (1973), S. 132.

⁷¹ Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aufgrund der Anlehnung an die Mathematik der Begriff Attribut und Element synonym verwendet.

⁷² Vgl. Stachowiak (1973), S. 132.

⁷³ Vgl. Stachowiak (1973), S. 155ff.

⁷⁴ Vgl. Stachowiak (1973), S. 132f.

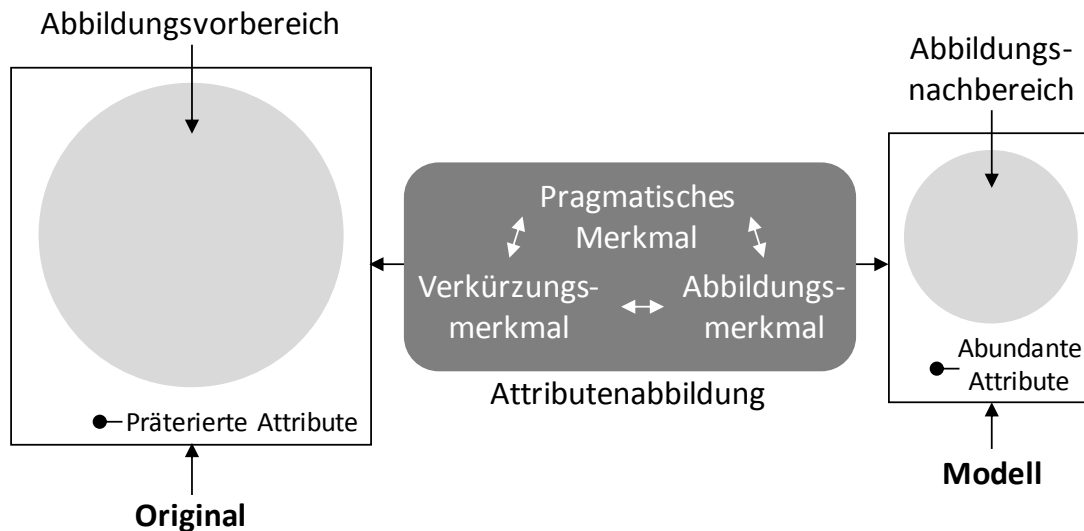


Abbildung 2-7: Die Original-Modell Abbildung⁷⁵

Je nach zugrunde gelegtem Pragmatismus wird der Zweck des Modells festgelegt, wodurch automatisch Elemente des Originals vernachlässigt, betont oder auch hinzugefügt werden. Dies führt dazu, dass das *Abbildungsmerkmal* beeinflusst wird, da beispielsweise durch die Betonung einzelner Elemente die Möglichkeiten der Abbildung eingeschränkt werden. Gleichzeitig beeinflusst beispielsweise die Transkodierung einzelner Elemente den zugrunde gelegten Pragmatismus des Modells, wodurch ebenfalls das *Abbildungsmerkmal* tangiert wird.

Anhand des hier erarbeiteten Verständnisses eines Modells lässt sich erkennen, dass der Entwickler bei der Verarbeitung von Informationen zur Erstellung eines Produktmodells eine Vielzahl von Annahmen trifft, um die Merkmale eines Modells festzulegen. Es verdeutlicht somit, in welcher Form der Entwickler Informationen bei der Erstellung eines Produktmodells verarbeitet und wird ebenfalls als Grundlage zur Detaillierung des Modellerstellungsprozesses in Abschnitt 5.2 benötigt.

2.2.5 Definition Prozess

In Abschnitt 2.1 wurde bereits das Auftreten von Unsicherheit in Prozessen thematisiert, daher ist eine Definition dieses Begriffs bedeutend für die vorliegende Arbeit. Ein *Prozess* definiert sich über die zeitabhängige, zweckmäßige Transformation eines Operanden von einem Anfangszustand in einen Endzustand⁷⁶. Hierbei

⁷⁵ In Anlehnung an Stachowiak (1973), S. 157.

⁷⁶ Vgl. Hubka (1984), S. 23.

erfahren die Eigenschaften des Operanden Veränderungen, bis der gewünschte Zustand erreicht ist⁷⁷. Zur Durchführung des Prozesses wirken Operatoren in Form von Stoffen, Energien oder Informationen auf den Prozess ein. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sind technische Prozesse sowie Entwicklungsprozesse relevant, die im Folgenden jeweils anhand eines Prozessmodells erläutert werden.

Technischer Prozess

In der Regel dienen technische Systeme technischen Prozessen⁷⁸. Sie stellen Mittel zur Verfügung, mit denen ein bestimmter Zweck im Rahmen eines Prozesses erfüllt werden kann. HEIDEMANN definiert auf Basis einer Zweck-Mittel-Differenzierung einen technischen Prozess als zweckdienliche Zustandsänderung eines Objekts bzw. eines Operanden in einem bestimmten Zeitintervall⁷⁹. Hierbei werden die Eigenschaften des Operanden vom Anfangszustand hin zum Endzustand verändert, siehe Abbildung 2-8.

In seinen Ausführungen beschränkt sich HEIDEMANN auf Nutzungsprozesse des Produkts. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf dessen Materialherstellungsprozesse, Produktionsprozesse und Recyclingprozesse übertragen. In Nutzungsprozessen fungiert das Produkt selbst als Operator bzw. Arbeitsmittel innerhalb einer festgelegten Systemgrenze, während in Produktionsprozessen die Produktionsmaschine das Arbeitsmittel darstellt. Das Arbeitsmittel verarbeitet Eingangsgrößen wie beispielsweise Energien, Stoffe oder Signale, um damit die zur Transformation eines Operanden notwendige Wirkgröße bereitzustellen. Zwischen dem Prozess und dem Operator können Interaktionen bestehen, die in Form von Prozessrückmeldungen abgebildet werden.

Im Gesamtsystem *Prozess* wirken weiterhin Nebengrößen, wie beispielsweise Vibrationen oder Abgase, die vom Prozess auf den Operator und umgekehrt oder auch über die Systemgrenze wirken können. Weiterhin existieren Störgrößen, beispielsweise in Form von Temperaturschwankungen, die auf den Operanden oder den Operator wirken können. Beide Größen können die Transformation ungewollt beeinflussen, weshalb es diese zu vermeiden oder zu kompensieren gilt⁸⁰.

⁷⁷ Vgl. Hubka (1984), S. 17.

⁷⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 42.

⁷⁹ Vgl. Heidemann (2001), S. 21.

⁸⁰ Vgl. Heidemann (2001), S. 76ff.

Mit Hilfe des Prozessmodells lassen sich technische Prozesse im Rahmen der Produktentwicklung umfassend analysieren, weshalb es im Rahmen der Erarbeitung einer methodischen Unterstützung in Abschnitt 6.2 benötigt wird.

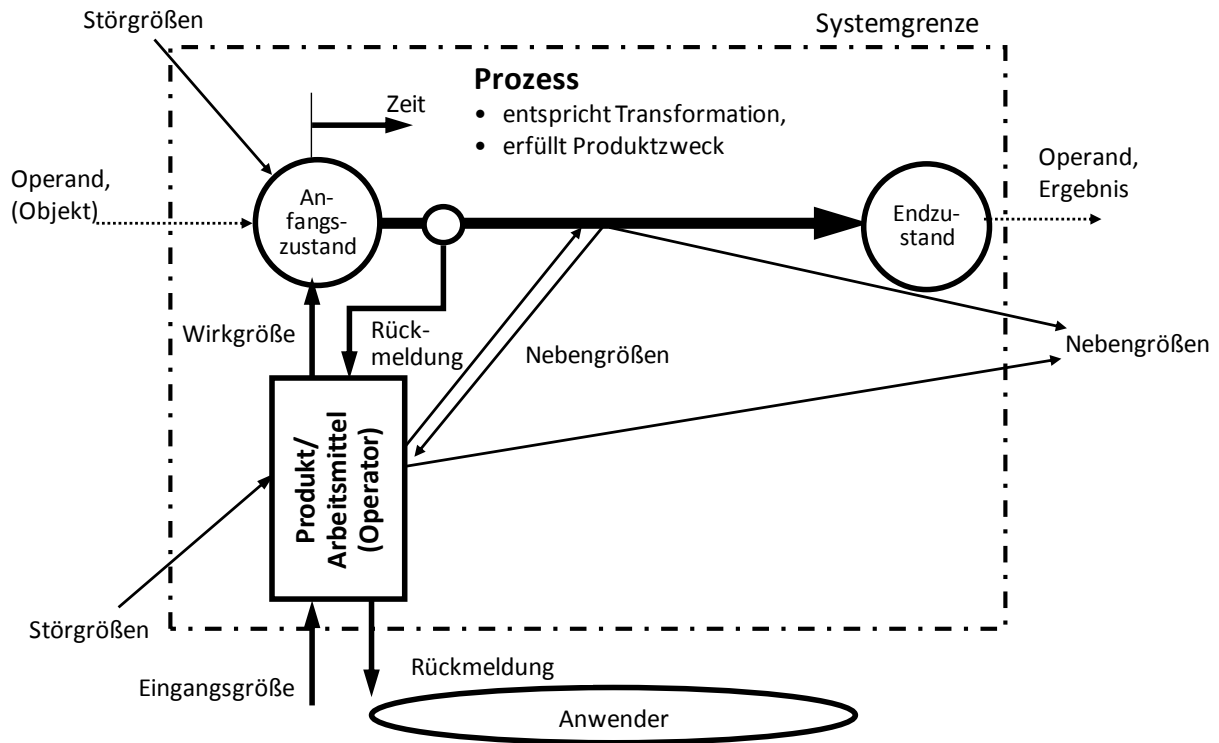


Abbildung 2-8: Prozessmodell nach HEIDEMANN⁸¹

Entwicklungsprozess

Während technische Prozesse das Produkt als Operator in den Fokus des Transformationsprozesses stellen, beschäftigt sich der *Entwicklungsprozess* mit der Frage, wie der Entwickler zu einem Produkt kommt. Anhand einer zeitlichen Abfolge von Handlungen wird festgelegt, was wann getan werden muss⁸². In Anlehnung an die Theorie technischer Systeme kann ein *Entwicklungsprozess* ebenfalls als ein Transformationssystem aufgefasst werden, siehe Abbildung 2-9.

Ein *Entwicklungsprozess* ist definiert als eine Transformation von Informationen in Form von Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt in Informationen, die das Produkt zur Erfüllung der Anforderungen zweckmäßig beschreiben⁸³.

⁸¹ Heidemann (2001), S. 138.

⁸² Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 2f.

⁸³ Vgl. Hubka, Eder (1988), S. 215.

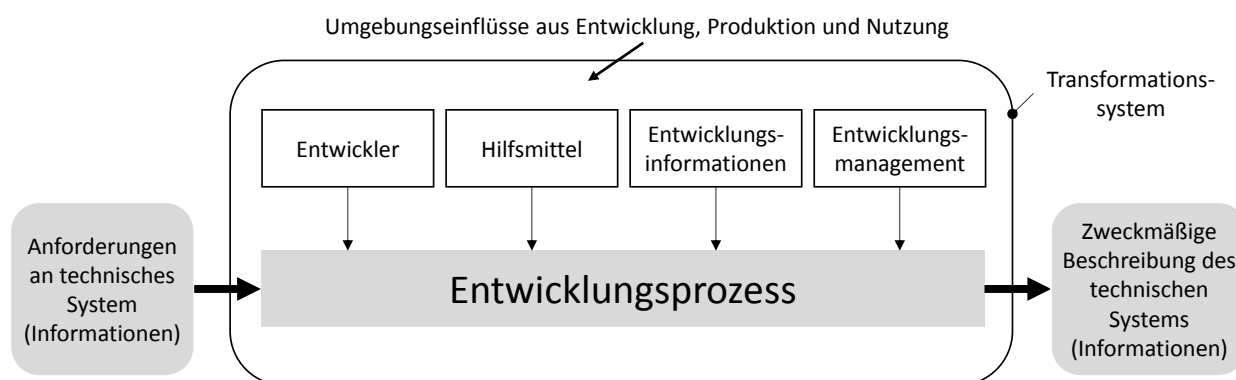


Abbildung 2-9: Entwicklungsprozess nach HUBKA⁸⁴

Der Entwickler selbst wird bei der Transformation von bereits bestehenden Entwicklungsinformationen und –wissen beeinflusst, die er selektieren und ggf. berücksichtigen muss. Hierbei spielt auch seine Erfahrung eine wichtige Rolle.

Die Transformation wird weiterhin vom Entwicklungsmanagement beeinflusst, in dessen Rahmen der Entwicklungsprozess in einem Unternehmen stattfindet. Wesentliche Einflussfaktoren sind hierbei die herrschende Organisationsstruktur, die vorgegebenen Entwicklungsziele und der daraus resultierende Handlungsrahmen, dem der Entwickler unterstellt ist.

Von außen wirken verschiedene Aspekte auf das Transformationssystem, die sich aus der Umgebung der eigentlichen Entwicklung, der Produktion und der Nutzung des Produktes ableiten lassen, wie beispielsweise gesellschaftliche, soziale, politische oder Umweltaspekte.⁸⁵

Das hier dargelegte Transformationsverständnis in einem Entwicklungsprozess stellt einen formalen Rahmen für die Verarbeitung von Informationen zur Erstellung eines Produktmodells dar und wird daher zur Detaillierung des Modellerstellungsprozesses in Abschnitt 5.2 benötigt.

2.2.6 Definition Methode

Methoden sind ein weiteres, wichtiges Hilfsmittel zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses. Eine Methode definiert ein planmäßiges und regelbasiertes Vorgehen, nach dessen Vorgaben bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen⁸⁶. Methoden geben Denk- und Handlungsempfehlungen

⁸⁴ In Anlehnung an Hubka, Eder (1988), S. 215.

⁸⁵ Vgl. Hubka, Eder (1988), S. 216.

⁸⁶ Vgl. Lindemann (2007), S. 56.

bzw. Handlungsvorschriften zum Erreichen eines definierten Ergebnisses⁸⁷. Mit Hilfe von Methoden können komplexe Sachverhalte in überschaubare Teilprobleme aufgeteilt und durch eine vorgegebene Abfolge von Tätigkeiten zielorientiert gelöst werden. Im Gegensatz zu Vorgehensmodellen, die angeben, welche Schritte durchzuführen sind, steht bei Methoden die Art und Weise zur Durchführung von Tätigkeiten im Vordergrund⁸⁸.

Die Ergebnisse der Methodenanwendung werden oftmals mit Hilfe von auf die Methoden abgestimmte Modelle dokumentiert⁸⁹. So werden beispielsweise die Ergebnisse einer QFD-Anwendung im Modell *House of Quality* eingetragen.

Hinsichtlich der Anzahl an durchzuführenden Tätigkeiten unterscheiden sich Methoden in der Literatur. Es existieren Methoden mit nur wenigen Handlungsabfolgen wie beispielsweise der Paarvergleich oder die Punktbewertung. Weiterhin gibt es Methoden, die wiederum aus Einzelmethode bestehen. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die FMEA, die aus den Einzelmethode *Fehleridentifikation* sowie der darauf aufbauenden *Ursache-Wirkungsanalyse*, *Risikoabschätzung* und *Maßnahmendefinition* besteht⁹⁰. Für derartige Methodenkombinationen mit einem planmäßigen Vorgehen wird in der Literatur auch der Begriff Methodik verwendet⁹¹. Wichtig ist, dass die Methode zu der jeweiligen Situation in der Entwicklung passt, weshalb für einen erfolgreichen Einsatz umfassende Vorüberlegungen bezüglich der Methodenauswahl, Methodenanpassung und Methodenanwendung notwendig sind⁹².

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Vorteile einer Methode bzw. einer Methodik genutzt werden, die sich einem schrittweisen und schlussfolgernden Vorgehen äußern. Dies wird für das systematische Antizipieren und Auswerten von Lebenslaufprozessen benötigt und findet sowohl bei der Erläuterung des Forschungsansatzes in Abschnitt 4.3 als auch bei der Entwicklung der methodischen Unterstützung in Abschnitt 6.2 Anwendung.

⁸⁷ Vgl. Geis (2011), S. 14; Walter (2007), S. 38.

⁸⁸ Vgl. Lindemann (2007), S. 57.

⁸⁹ Vgl. Lindemann (2007), S. 56.

⁹⁰ Vgl. DIN-Norm 60812 (2015), S. 13ff.

⁹¹ Vgl. VDI-Richtlinie 2223 (2004), S. 88.

⁹² Vgl. Lindemann (2007), S. 58ff.

2.3 Beschreibung von Produktentwicklungsprozessen

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Beschreibung des Vorgehens eines Produktentwicklungsprozesses, die sich in ihrer Schwerpunktsetzung unterscheiden und somit das Geschehen aus unterschiedlichen Perspektiven beschreiben. Je nach zugrunde gelegter Perspektive lassen sich unterschiedliche Fragestellungen ableiten, zur deren Beantwortung Produktmodelle benötigt werden. Somit lässt sich anhand des Vorgehens auch eine Klassifizierung von unterschiedlichen Typen von Produktmodellen ableiten.

Im Folgenden werden daher ausgewählte Vorgehensmodelle zur Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.4 eine Aufarbeitung von Produktmodelltypen, die in der Produktentwicklung verwendet werden. In Abschnitt 3.1 erfolgt dann eine Konsolidierung der Vorgehensmodelle sowie eine Verortung der Produktmodelltypen.

2.3.1 Vorgehen in der Produktentwicklung nach VDI 222x

Die Richtlinienserie 222x des VDI fasst Erkenntnisse von verschiedenen Wissenschaftlern zur Konstruktionstheorie und –methodik aus dem europäischen Raum zusammen⁹³. Am bekanntesten hierbei ist die *VDI 2221*, die ein generisches Vorgehensmodell zur Entwicklung und Konstruktion von technischen Systemen beinhaltet⁹⁴. Das Vorgehensmodell dient als Rahmenwerk zur Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses, dem in den folgenden Richtlinien verschiedene Methoden zur Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte zugeordnet werden. Dem Produktentwickler steht somit eine umfassende Methodik zur Realisierung von Entwicklungsaufgaben zur Verfügung.

Das Vorgehensmodell besteht aus insgesamt sieben Arbeitsabschnitten, wobei jedem Abschnitt ein definiertes Arbeitsergebnis zugeordnet wird, siehe Abbildung 2-10.

Die einzelnen Abschnitte bauen inhaltlich aufeinander auf und werden mehrfach iterativ durchlaufen. In Abhängigkeit vom Neuheitsgrad der Aufgabe, bei dem man zwischen Neukonstruktionen, Anpassungskonstruktionen, und Variantenkonstruktionen⁹⁵ unterscheidet, werden die Abschnitte nicht vollständig oder auch gar nicht

⁹³ Vgl. Weber (2012), S. 26.

⁹⁴ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 9.

⁹⁵ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 6.

durchlaufen⁹⁶. Häufig werden die Abschnitte auch zu Phasen zusammengefasst, die je nach Branche und Unternehmen variieren können. Aufbauend auf einschlägiger Literatur wird im Folgenden eine Einteilung in vier Phasen bzw. Prozesse vorgenommen⁹⁷.

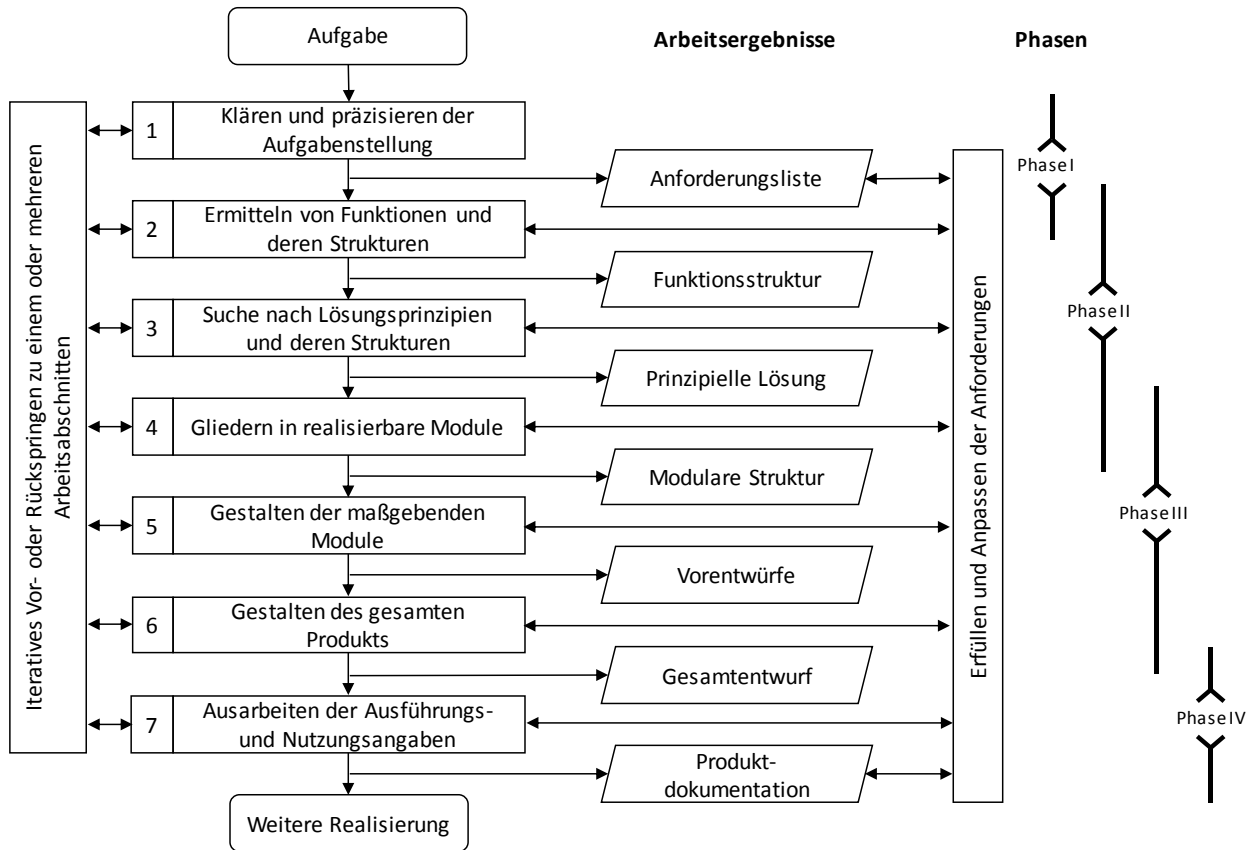


Abbildung 2-10: Vorgehensmodell der Produktentwicklung nach VDI 2221⁹⁸

In der *Projektdefinitionsphase* (Phase I) wird, ausgehend von der Produktidee, die Entwicklungsaufgabe geklärt und durch die Festlegung von Anforderungen präzisiert und formalisiert. Diese werden in einer Anforderungsliste dokumentiert und dienen den folgenden Phasen zum Abgleich mit den Arbeitsergebnissen. Gewonnene Erkenntnisse während der Entwicklung können dazu führen, dass bestehende Anforderungen aktualisiert werden oder dass neue Anforderungen gestellt werden müssen⁹⁹.

⁹⁶ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 9.

⁹⁷ Vgl. Birkhofer (2011a), S. 335; Roth (2000), S. 32ff.

⁹⁸ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 9.

⁹⁹ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 10.

In der *Konzeptphase* (Phase II) wird zunächst eine Gesamtfunktion mit zugehörigen Teilfunktionen definiert und in einer Funktionsstruktur dokumentiert. Zur Realisierung der einzelnen Teilfunktionen werden im nächsten Schritt geeignete Teillösungen identifiziert und zu einer prinzipiellen Gesamtlösung zusammengefasst. Während der *Entwurfphase* (Phase III) wird die prinzipielle Gesamtlösung u. a. durch die Festlegung einer modularen Struktur und durch die Erarbeitung von Vorentwürfen weiter konkretisiert. Ergebnis ist ein Gesamtentwurf, der alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen zur Produktrealisierung enthält¹⁰⁰.

Der Gesamtentwurf wird in der *Ausarbeitungsphase* (Phase IV) weiter detailliert und die Ergebnisse in einer Produktdokumentation zusammengefasst.

Der Zweck des hier vorgestellten Vorgehensmodells liegt in der Unterstützung des Entwicklers bei der systematischen Lösungsfindung, wobei notwendige Iterationschleifen zur erfolgreichen Entwicklung eines Produkts betont werden¹⁰¹. Durch die Strukturierung des Produktentwicklungsprozesses und der Festlegung von konkreten Arbeitsschritten wird die Komplexität bei der Lösungssuche reduziert, gleichzeitig wird durch die Zuordnung von Methoden¹⁰² die Lösungssuche unterstützt, wodurch nahezu die gesamte Breite des Lösungsfeldes erfassbar wird.

2.3.2 Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung

Das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung fasst die Arbeitsschritte zur Entwicklung eines Produkts, ähnlich der *VDI 2221*, als vierstufige Prozesskette zusammen¹⁰³.

Im Fokus des Modells steht eine Verknüpfung dieser Prozesskette mit den Lebenslaufphasen des Produkts, um damit der Tatsache gerecht zu werden, dass das Produkt in seinem Produktleben eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse durchläuft und sich hieraus relevante Informationen für die Produktentwicklung ableiten lassen, siehe Abbildung 2-11.

¹⁰⁰ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 11.

¹⁰¹ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 5.

¹⁰² Vgl. VDI-Richtlinie 2222 (1996), S. 22.

¹⁰³ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 566

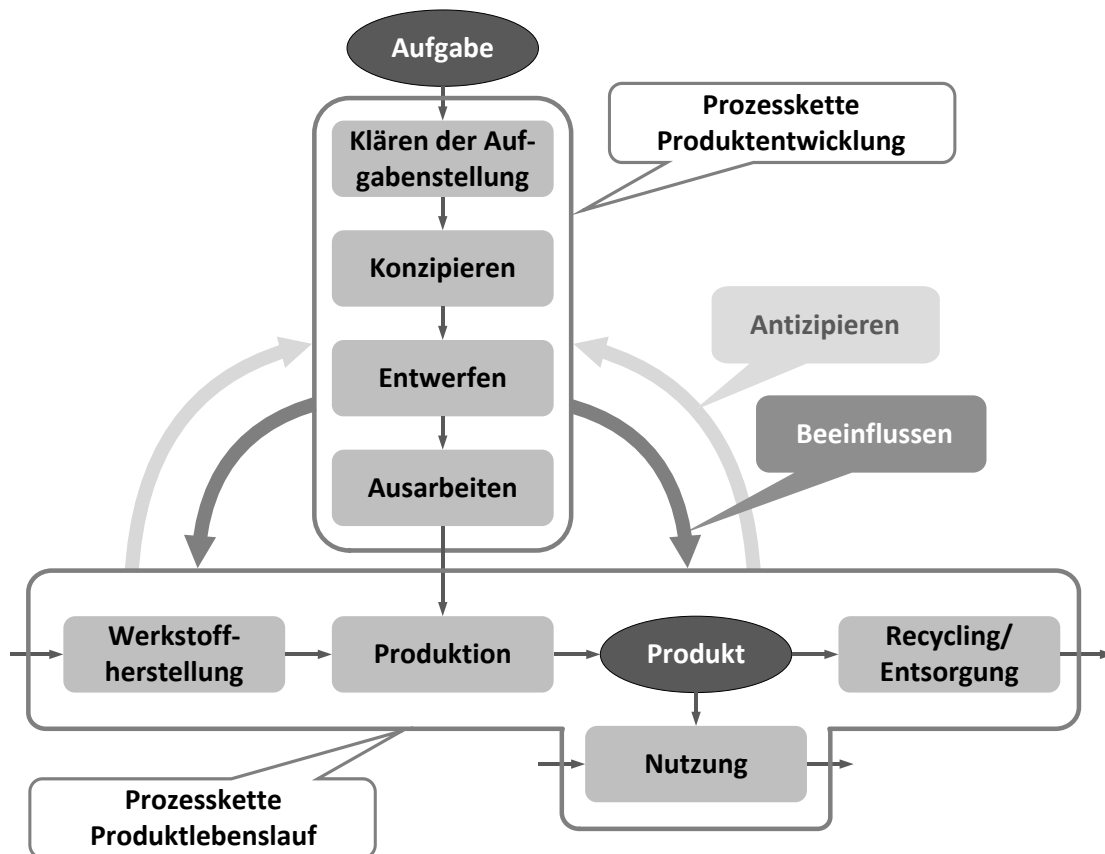


Abbildung 2-11: Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung¹⁰⁴

Der *Produktlebenslauf* wird im Modell in vier Phasen gegliedert, in denen das Produkt jeweils verschiedene Prozesse durchläuft. Die Phase der *Werkstoffherstellung* beinhaltet alle Prozesse, die zur Herstellung von Rohstoffen notwendig sind, wie deren Gewinnung, Aufbereitung und Transport¹⁰⁵. In der *Produktionsphase* werden aus den Rohstoffen in verschiedenen Prozessen Produkte gefertigt, die in der *Nutzungsphase* verwendet werden. Aufgrund der Tatsache, dass das Produkt in der *Nutzungsphase* nicht mehr entwickelt oder bearbeitet, sondern zur Verarbeitung von Energien, Stoffen und Signalen genutzt wird, ist diese Phase im Modell hervorgehoben¹⁰⁶.

Die Verknüpfung zwischen den Prozessketten Produktlebenslauf und Produktentwicklung wird durch das Begriffspaar *Antizipieren* und *Beeinflussen* beschrieben. Ziel ist es, die Wechselwirkungen zwischen Lebenslauf- und Entwicklungsphasen zu analysieren und zu beurteilen. Hierzu werden zum einen Lebenslaufprozesse

¹⁰⁴ Vgl. Grüner (2001), S. 46; Birkhofer et al. (2012), S. 566.

¹⁰⁵ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 564.

¹⁰⁶ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 564f.

antizipiert, ausgewertet und anschließend für eine zielgerichtete Produktentwicklung genutzt. So lassen sich beispielsweise zum einen Umwelteinflüsse aus antizipierten Prozessen auf das Produkt gezielt analysieren und bei Bedarf darauf abgestimmte, geeignete konstruktive Anpassungen festlegen. Zum anderen wird durch die Festlegung von Eigenschaften des Produkts mit zugehörigen Fertigungsprozessen automatisch auch der Lebenslauf beeinflusst. Anhand der mit dem Begriffspaar *Antizipieren* und *Beeinflussen* verbundenen Tätigkeiten wird der Entwickler somit sensibilisiert, eine parallele Betrachtung von dem zu entwickelnden Produkt und Lebenslaufprozessen anzustreben und deren Abhängigkeiten in der Entwicklung zu berücksichtigen, um Probleme bei der Realisierung des Produkts frühzeitig erkennen zu können¹⁰⁷.

2.3.3 Axiomatic Design

Die Axiomatic Design Theorie von SUH beschreibt einen formaleren Ansatz zur Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses. Im Fokus steht eine Transformation von Kundenwünschen an das zu entwickelnde Produkt hin zu Eigenschaften, die das Produkt nach Vollendung der Entwicklung aufweist.

Zur Durchführung der Transformation definiert SUH vier Domains, die jeder Entwicklungsprozess durchläuft: die *Customer Domain*, *Functional Domain*, *Physical Domain* und die *Process Domain*, siehe Abbildung 2-12.

Zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Domains wird stets die Frage gestellt, was erreicht werden soll („What we want to achieve“) und in welcher Form das angestrebte Ziel realisiert werden kann („How we want to achieve it“)¹⁰⁸.

Zu Beginn werden Kundenwünsche {CAs} in der Customer Domain definiert. Diese werden im nächsten Schritt in funktionale Anforderungen {FRs} mit zugehörigen Constraints {Cs}, sogenannten Randbedingungen, transformiert und in der Functional Domain eingetragen. Diese erfüllen die Kundenwünsche bestmöglich. Anschließend werden Design Parameter {DPs} mit Hilfe einer Designmatrix [A] festgelegt, mit denen die Einträge der Functional Domain realisiert werden können. Im letzten Schritt werden Herstellprozesse und notwendige Ressourcen mit Hilfe von

¹⁰⁷ Vgl. Grüner (2001), S. 46f.; Schott (1998), S. 38ff.; Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 193ff.; Kusiak (2000), S. 78;

¹⁰⁸ Vgl. Suh (1990), S. 25.

Process Variables {PVs} bestimmt, die zur Herstellung des konstruierten Produkts notwendig sind¹⁰⁹.

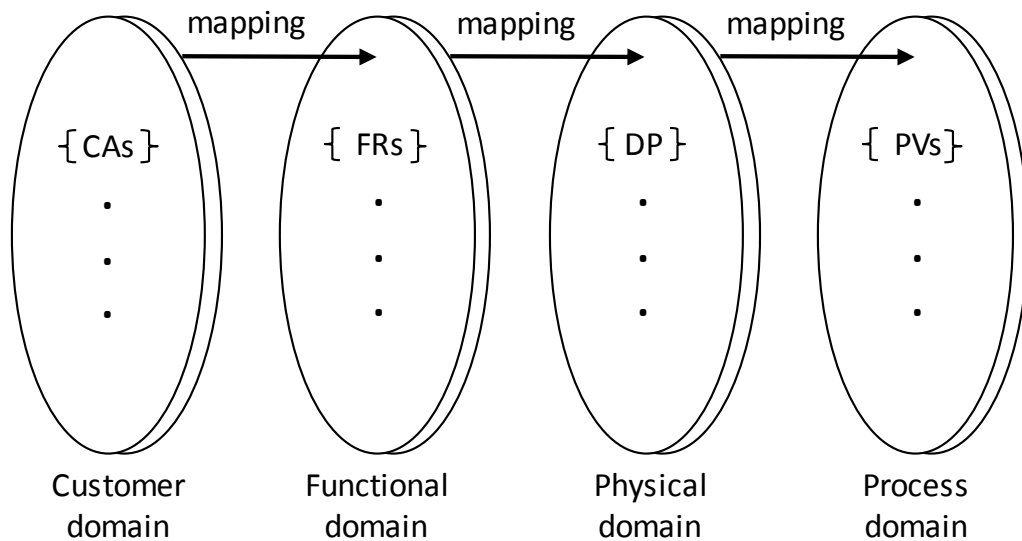


Abbildung 2-12: Vier Domains der Axiomatic Design Theorie¹¹⁰

Grundlage der Axiomatic Design Theorie sind das *Independence Axiom* und das *Information Axiom*. Das erste Axiom besagt, dass bei einem optimalen Design keine Abhängigkeiten zwischen den funktionalen Eigenschaften bestehen dürfen. Dies leitet wiederum zum zweiten Axiom über, das sich auf die Informationsmenge bezieht und besagt, dass bei einem optimalen Design jede funktionale Eigenschaft durch einen Design Parameter abgebildet und der Informationsgehalt somit minimiert wird. Ziel ist es, mit Hilfe beider Axiome die Transformationen und somit das zu entwickelnde Produkt zu optimieren¹¹¹.

Aufbauend auf den Axiomen unterscheidet SUH zwischen einem coupled, decoupled und uncoupled Design, das sich auf die Vernetzung zwischen den jeweiligen Domains bezieht¹¹². In einschlägiger Literatur werden darauf aufbauend eine Reihe von Regeln und Prinzipien zur optimierten Konstruktion von Produkten abgeleitet, wie beispielsweise das Prinzip der Funktionstrennung und Funktionsintegration¹¹³.

¹⁰⁹ Vgl. Suh (1998), S. 208f.

¹¹⁰ Vgl. Suh (1998), S. 204.

¹¹¹ Vgl. Suh (1990), S. 87ff.

¹¹² Vgl. Suh (1998), S. 192.

¹¹³ Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 866ff.

2.3.4 Property-Driven Development

Beim Property-Driven-Development rücken Merkmale, sog. characteristics C_i , und Eigenschaften, sog. properties P_j , eines Produkts in den Fokus der Betrachtung. Merkmale (C_i) erfassen die Gestalt eines Produktes, die durch die Struktur, räumliche Anordnung der Komponenten und Formen, Abmessungen, Werkstoffe und Oberflächenbeschaffenheiten definiert sind. Alle Merkmale können vom Entwickler direkt festgelegt und somit beeinflusst werden. Eigenschaften (P_j) hingegen beschreiben das Verhalten von Produkten. Hierzu zählen beispielsweise Größen wie Funktion, Sicherheit, Zuverlässigkeit, ästhetische Eigenschaften sowie Fertigungsgerechtheit, Montagegerechtheit, Prüfgerechtheit, Umweltgerechtheit und Herstellkosten¹¹⁴. Eigenschaften können nicht direkt vom Entwickler festgelegt, sondern nur indirekt durch die Festlegung oder Änderung von Merkmalen beeinflusst werden¹¹⁵. Das Entwickeln eines Produkts auf Basis von Merkmalen und Eigenschaften wird als Characteristics-Properties Modelling bezeichnet. Ziel des CPM/PDD Ansatzes ist es, dass die aus den festgelegten Merkmalen resultierenden Ist-Eigenschaften die vom Kunden geforderten Soll-Eigenschaften hinreichend gut erfüllen bzw. bestmöglich annähern. Um dies zu erreichen, werden die beiden Tätigkeiten Synthese und Analyse im Wechsel durchgeführt, siehe Abbildung 2-13.

Beim Grundmodell für die Analyse handelt es sich im Kern um ein Netzwerkmodell, das die Beziehungen (R_j) zwischen den Merkmalen (C_i) und den zu untersuchenden Eigenschaften (P_j) unter Berücksichtigung von Randbedingungen (EC_j) darstellt. Hierbei können die verschiedenen Eigenschaften unabhängig voneinander betrachtet werden, was gängiger Analysepraxis entspricht¹¹⁶. Zentrale Aussage des Grundmodells ist, dass sämtliche relevante Eigenschaften bestimmbar sind, wobei hierfür jeweils unterschiedliche Kombinationen von Merkmalen maßgebend sind. Zur Identifikation der Beziehungen (R_j) kann sich der Entwickler einer Reihe von Modellen, Methoden und Werkzeugen wie Schätzungen, Befragungen, experimentellen Bestimmungen oder Simulationswerkzeugen bedienen¹¹⁷.

¹¹⁴ Vgl. Weber (2012), S. 32.

¹¹⁵ Vgl. Weber (2012), S. 31f.

¹¹⁶ Vgl. Weber (2012), S. 37.

¹¹⁷ Vgl. Weber (2012), S. 38.

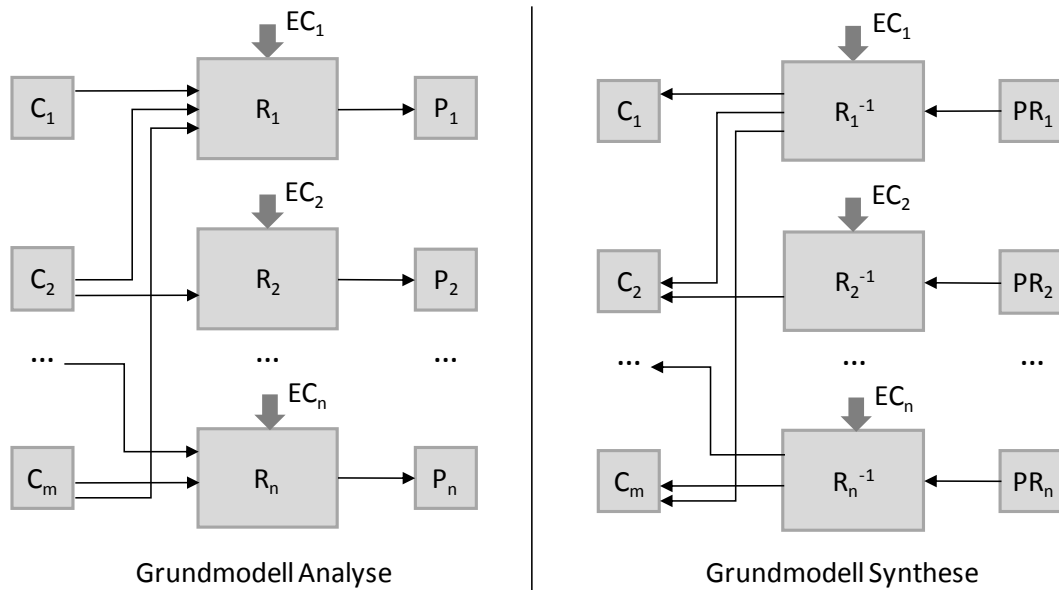


Abbildung 2-13: Analyse und Synthese im CPM/PDD Ansatz¹¹⁸

Das Grundmodell der Synthese beschreibt, ausgehend von geforderten Eigenschaften (PR_j), die Festlegung von Merkmalen (C_i) und kann somit als Invertierung der Analyse angesehen werden.

Sowohl bei der Analyse als auch bei der Synthese gilt es stets die Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen, beispielsweise geometrische Kopplungen zweier Module, zu berücksichtigen. Da verschiedene Eigenschaften dieselben Merkmale zu beeinflussen versuchen, können Zielkonflikte auftreten. So führen beispielsweise die geforderten Eigenschaften einer hohen Steifigkeit eines Bauteils im Betrieb und einer hohen Nachgiebigkeit bei deren Montage zu unterschiedlichen Merkmalen bezüglich der Geometrie und somit zu einem Zielkonflikt¹¹⁹. Zur Wiederverwendung von Konstruktionswissen im Produktentwicklungsprozess werden sogenannte Lösungselemente bzw. -muster verwendet. Sie aggregieren bekannte Beziehungen von Merkmalen und Eigenschaften und können sowohl für Analyse- als auch für Synthesetätigkeiten verwendet werden¹²⁰.

Ausgehend von den Grundmodellen Analyse und Synthese lässt sich das Vorgehen des CPM/PDD Ansatzes erläutern, siehe Abbildung 2-14.

Zu Beginn der Entwicklung werden auf Basis von Anforderungen Soll-Eigenschaften (PR_j) abgeleitet. Darauf aufbauend startet die Produktentwicklung mit einem

¹¹⁸ Weber (2005), S. 165.

¹¹⁹ Vgl. Roos et al. (2016), S. 126ff.

¹²⁰ Vgl. Weber (2012), S. 41f.

Syntheseschritt, in dem mittels geeigneter Synthesemethoden (R_A^{-1}) einige wesentliche Merkmale (C_{iA}) des Produkts festgelegt werden. Im Anschluss folgt ein Analyseschritt, in dem auf Basis von Analysemethoden (R_A) relevante Ist-Eigenschaften des Produkts unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten (D_{XA}) zwischen Merkmalen bestimmt bzw. vorhergesagt werden. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Anzahl an untersuchten Ist-Eigenschaften durchaus größer sein kann als die im Syntheseschritt zuvor verwendeten Soll-Eigenschaften.

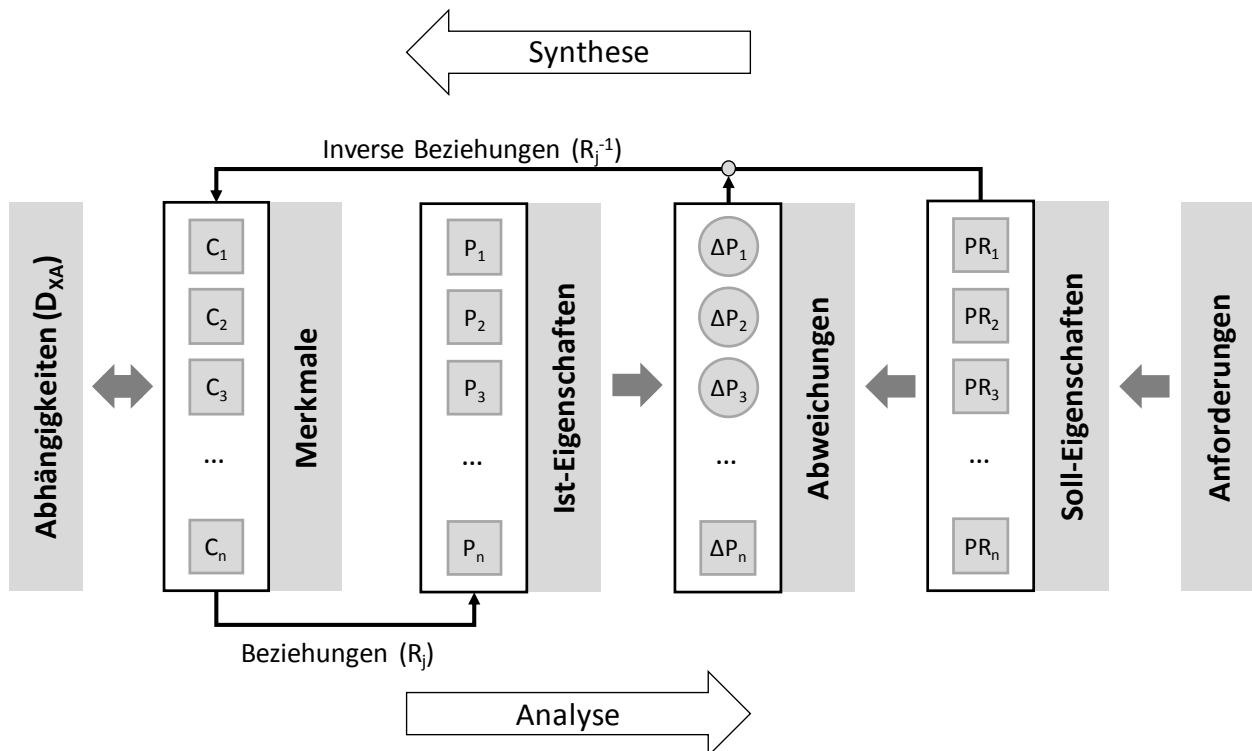


Abbildung 2-14: Vorgehen im CPM/PDD Ansatz¹²¹

Im nächsten Schritt findet ein Abgleich zwischen den Ist- und Soll-Eigenschaften statt und Einzeldifferenzen (ΔP_{jA}) werden bestimmt. Auf deren Basis wird eine Gesamtevaluation des gegenwärtigen Entwicklungsstands durchgeführt und es werden Treiber für weitere Synthese-Analyseschritte identifiziert. Zur Identifikation von Treibern gilt es Strategien abzuleiten, die auch methodisch unterstützt werden können. Während in frühen Entwicklungsphasen Eigenschaften mit der größten Abweichung zwischen Ist- und Soll als Treiber in Frage kommen, müssen in späten Entwicklungsphasen aufgrund der hohen Komplexität des Produkts häufig Evaluationsmethoden eingesetzt werden¹²².

¹²¹ In Anlehnung an Weber (2012), S. 46f.

¹²² Vgl. Weber (2012), S. 44.

Basierend auf den identifizierten Treibern findet im nächsten Syntheseschritt eine zielgerichtete Anpassung der Merkmale des Produkts statt¹²³. Diese werden wiederum in einem Analyseschritt hinsichtlich der sich neu einstellenden Ist-Eigenschaften untersucht und mit den Soll-Eigenschaften abgeglichen.

Im weiteren Verlauf wird die Merkmalsseite immer weiter vervollständigt, bis das Produkt hergestellt werden kann, womit der Entwicklungsprozess dann abgeschlossen ist. Während der fortschreitenden Festlegung von Merkmalen findet nach jeder Analyse-Syntheseschleife ein Ist-Soll Vergleich der Eigenschaften mit anschließender Festlegung von Treibern des Entwicklungsprozesses statt, um auftretende Abweichungen (ΔP_j) zu minimieren. Neben einer vollständigen Festlegung aller Merkmale ist die Bestimmung bzw. Vorhersage aller relevanten Eigenschaften, die das Verhalten des Produkts beschreiben, eine weitere Bedingung für die Beendigung des Entwicklungsprozesses¹²⁴.

2.4 Produktmodelle im Produktentwicklungsprozess

Der gesamte Produktentwicklungsprozess wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Produktmodelle begleitet, die Produktdaten und -informationen in Form von technischen Dokumenten oder sonstigen Produktrepräsentationen spezifizieren und dadurch (Zwischen-)Ergebnisse des Entwicklungsfortschritts darstellen¹²⁵. Ein Produktmodell repräsentiert das Produkt dabei zweckmäßig auf einer definierten Abstraktionsebene und stellt alle benötigten Informationen für einen bestimmten Arbeitsschritt in der Produktentwicklung bereit¹²⁶. Die zweckorientierte Komponente von Produktmodellen liegt in der Tatsache, dass die Repräsentation des Produkts stets aufgabenspezifisch¹²⁷ durch die Festlegung des pragmatischen Merkmals sowie der Abbildungs- und Verkürzungsmerkmale erfolgt, vergleiche hierzu Unterabschnitt 2.2.4.¹²⁸

¹²³ Vgl. Weber (2007), S. 94.

¹²⁴ Vgl. Weber (2012), S. 49.

¹²⁵ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 18.

¹²⁶ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 41; Wäldele (2012), S. 28.

¹²⁷ Vgl. Bandow, Holzmüller (2010), S. 40.

¹²⁸ In Abgrenzung zu der hier gewählten Definition wird in der Produktdatentechnologie unter einem Produktmodell ausschließlich die Instanziierung von festgelegten Produktdaten verstanden, die das Resultat des Produktentwicklungsprozesses dokumentieren und in einer durch den Rechner interpretierbaren Form abgebildet werden. Somit existiert nach dieser Interpretation ein gemeinschaftliches Produktmodell, das alle konstruktionsbestimmenden Informationen des Produkts beinhaltet und auch als integriertes Produktmodell bezeichnet wird, vergleiche hierzu u. a. Grabowski (1997), S. 59f.; Anderl, Trippner (2000), S. 9ff.; DIN ISO-Norm 10303-1

In der Literatur existieren eine Vielzahl von Möglichkeiten, Produktmodelle zu klassifizieren, wobei stets eines der Modellmerkmale nach STACHOWIAK im Vordergrund steht, vergleiche Abbildung 2-15. Liegt der Fokus beispielsweise auf dem Abbildungsmerkmal, lassen sich Klassifizierungen von Produktmodellen hinsichtlich des strukturellen Aufbaus, der Darstellungsform oder des Konkretisierungsgrads finden.



Abbildung 2-15: Klassifizierungsmöglichkeiten von Produktmodellen¹²⁹

Die Wahl der Klassifizierung hängt somit stets davon ab, welchen Zweck man damit verfolgt bzw. welche Aussage man daraus ableiten will.

Da in Abschnitt 3.1 eine Verortung von Produktmodelltypen in den Produktentwicklungsprozess vorgenommen wird, wird das pragmatische Merkmal zur Erstellung einer Klassifizierung in den Fokus gestellt. Damit lässt sich die Frage beantworten, wofür Produktmodelle im Entwicklungsprozess gebraucht werden. Hierdurch lässt sich die angestrebte Analyse der Informationsverarbeitung bei der Er-

(1994), S. 1ff.; Potinecke (2009), S. 51. Da in dieser Arbeit keine rechnergestützte Umsetzung der Methodik in Abschnitt 6.2 angestrebt wird, wird das konstruktionsmethodische Verständnis des Begriffs Produktmodell verwendet, wie es bereits definiert wurde, vergleiche hierzu u. a. Pahl et al. (2007), S. 86; Birkhofer (2011b), S. 9; Andreasen, Hein (1987), S. 111ff. Die Erkenntnisse der Produktdatentechnologie in Form von CAx Systemen werden jedoch in der angestrebten Kategorisierung von Produktmodellen verortet.

¹²⁹ Vgl. Page et al. (2005), S. 6ff.; Felgen (2007), S. 167; Lauer (2010), S. 83; Wenzel (1998), S. 38; Rodenacker (1976), S. 28; Szykman et al. (2001), S. 3f.; Scholl (2008), S. 36f.; VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 8; Setter, Pache (1998), S. 2-4f.; Dylla (1991), S. 21.

stellung von Produktmodellen wesentlich vorbereiten, vergleiche Abschnitt 1.2. Anhand einschlägiger Literatur lässt sich hierfür eine Klassifizierung von Produktmodellen in die Typen *Zielmodell*, *Problemmodell*, *Entwicklungsmodell* und *Analysemodell* ableiten¹³⁰, siehe Abbildung 2-16.

Im Folgenden wird zunächst erläutert, was ein Produktmodell der einzelnen Typen auszeichnet und welche konkreten Ausprägungen sich zuordnen lassen. Aufgrund der Vielzahl an Produktmodellen erfolgt die Zuordnung im Folgenden exemplarisch. Die Verwendung von Produktmodellen der einzelnen Typen durch den Entwickler wird in Abschnitt 3.1 anhand eines Auslegungsbeispiels erläutert.

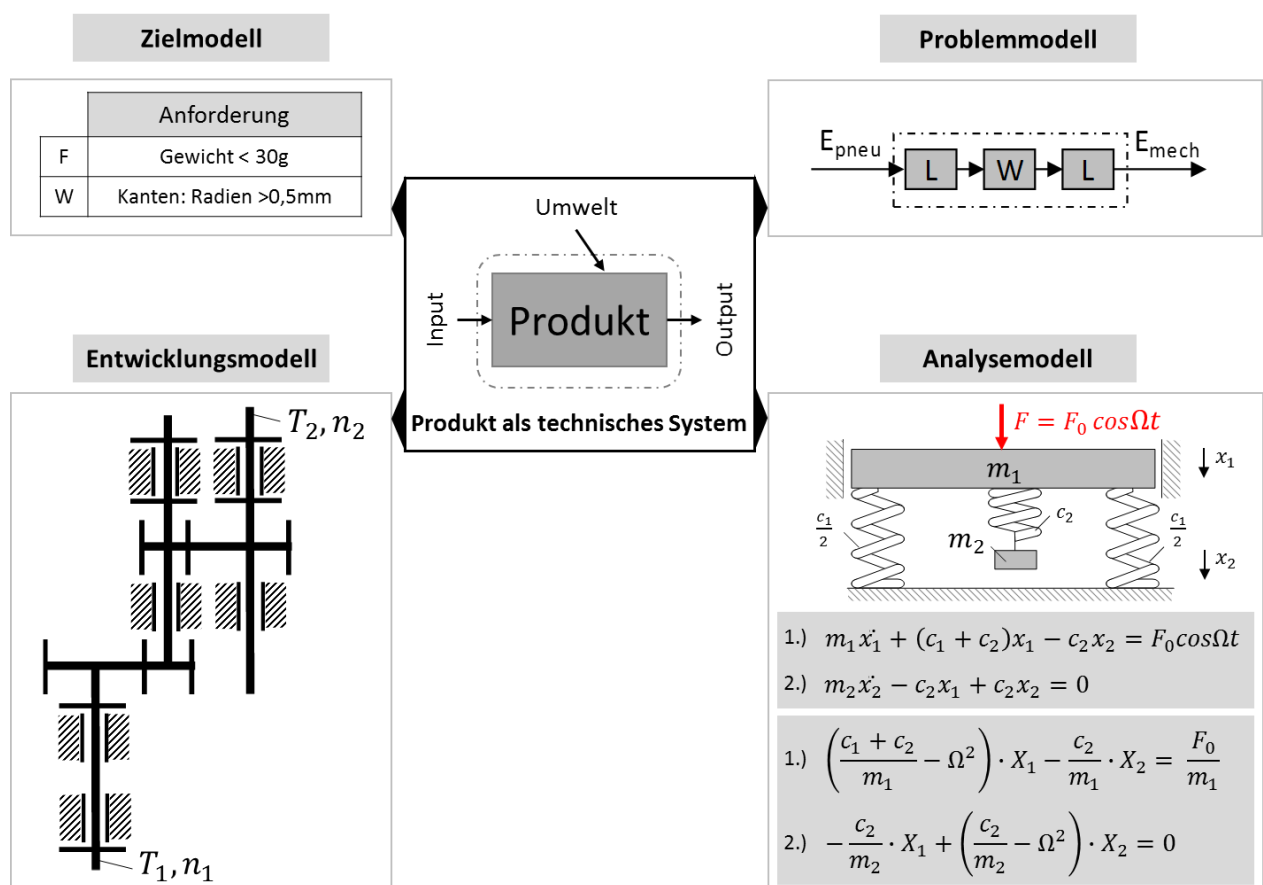


Abbildung 2-16: Klassifizierungen von Produktmodellen nach deren Zweck

In einem *Zielmodell* werden Informationen erfasst, strukturiert und dokumentiert, die zur Beschreibung der angestrebten Ziele eines Produktentwicklungsprozesses und deren Rahmenbedingungen notwendig sind¹³¹. Hierbei handelt es sich haupt-

¹³⁰ Vgl. Lindemann (2007), S. 21f.; Gramann (2004), S. 43ff.; Giapoulis (1998), S. 94ff.

¹³¹ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 19f.

sächlich um die möglichst vollständige Erfassung von Anforderungen an das Produkt, es können aber auch persönliche Ziele des Entwicklers oder strategische Unternehmensziele enthalten sein¹³². Zur Strukturierung, Formalisierung und Dokumentation von identifizierten Anforderungen wird häufig das Produktmodell *Anforderungsliste* verwendet. Es werden Anforderungen in *Forderungen* und *Wünsche* gegliedert, mit einem Datum versehen und der verantwortlichen Konstruktionsgruppe zugeordnet. Wird beispielsweise eine Armbanduhr entwickelt und ein guter Tragekomfort erwartet, lassen sich Anforderungen bezüglich des Gewichts und der Kanten bzw. äußeren Radien festlegen, siehe Abbildung 2-16. Da sich Anforderungen im Zuge der fortschreitenden Konkretisierung des zu entwickelnden Produkts ebenfalls konkretisieren bzw. durch weitere Anforderungen ersetzt oder ergänzt werden, gilt es die Zielmodelle kontinuierlich mit den anderen Produktmodelltypen abzugleichen und gegebenenfalls zu aktualisieren¹³³. Zur Erfassung von Anforderungen kann beispielsweise mit der Methode *Analyse der Produktumgebung* gearbeitet werden, in dessen Rahmen Nachbarsysteme des zu entwickelnden Produkts untersucht werden¹³⁴. Die Ergebnisse werden in einem Produktmodell abgebildet, welches die Beziehung des Produkts zu den Nachbarsystemen beschreibt und zur Identifikation von weiteren Anforderungen an das Produkt dient.

Kommt es im Laufe der Entwicklung zu einer Abweichung des Ist-Zustands vom angestrebten Zustand oder besteht Unklarheit darüber, wie ein gewünschter Zustand erreicht werden soll, liegt ein Problem vor. Ursächlich hierfür ist vor allem die hohe Komplexität der Entwicklungsaufgabe und die damit einhergehende, teils unüberschaubare und unbekannte Anzahl an Verknüpfungen zwischen dem zu entwickelnden Produkt und den angestrebten Zielen des Entwicklungsprozesses¹³⁵. Es werden Modelle zur Generierung eines Problemverständnisses sowie zur Problemstrukturierung benötigt, um darauf aufbauend Maßnahmen zur Reduzierung der Abweichungen zwischen Ist- und Sollzustand bzw. Ansätze zur Erreichung eines erwünschten Zustands ableiten zu können¹³⁶. Ein gängiges Vorgehen hierfür besteht in der Abstraktion bzw. Vereinfachung des betrachteten Systems, um damit die Komplexität zu reduzieren und wesentliche Aspekte hervorzuheben. Dies kann

¹³² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 215f.; Lindemann (2007), S. 22.

¹³³ Vgl. Lindemann (2007), S. 22.

¹³⁴ Vgl. Roth (2000), S. 67ff.

¹³⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 60f.

¹³⁶ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 19.

beispielsweise durch eine Abstraktion auf die Funktionsebene eines Systems und deren Beschreibung mit Hilfe des Produktmodells *Funktionsmodell* erreicht werden. Es existieren verschiedene Ansätze zur Erstellung eines *Funktionsmodells*, die sich in normierte und nicht normierte Darstellungen gliedern lassen¹³⁷. Eine gängige, normierte Funktionsbeschreibung nach PAHL und BEITZ bildet den Funktionszusammenhang eines Systems anhand der Transformation der allgemeinen Größen *Stoff*, *Energie* und *Signal* mit Hilfe der Operationen *Speichern*, *Leiten*, *Umformen*, *Wandeln* und *Verknüpfen*.¹³⁸ Wurde im Rahmen der Produktentwicklung beispielsweise der Prototyp eines Pneumatikzylinders gefertigt und es kam bei ersten Tests zu einem Versagen des Zylinders, lässt sich mit einem Problemmodell deren Ursache gezielt hinterfragen. Hierzu wird der Pneumatikzylinder zunächst mit Hilfe eines Funktionsmodells abgebildet, wodurch der Zusammenhang zwischen der pneumatischen Energie am Eingang und der mechanischen Energie am Ausgang verdeutlicht wird, siehe Abbildung 2-16. Es lassen sich die Teilfunktionen *Leiten*, *Wandeln* und *Leiten* identifizieren, die die einströmende Luft in den Zylinder, deren Wandlung in eine Druckkraft an der Kolbenfläche sowie die anschließende Bewegung der Kolbenstange beschreiben. Die Einteilung des untersuchten Systems in drei Teilfunktionen reduziert deren Komplexität zunächst und verdeutlicht dem Entwickler damit prinzipielle, relevante Einflussbereiche, die er nun nacheinander im Hinblick auf das Versagen des Zylinders überprüfen kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Abstraktion des Systems besteht in der Erstellung eines *Black-Box Modells*, das lediglich die Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems betrachtet, deren Zusammenhänge untersucht und die restlichen Informationen ausblendet und somit in ähnlicher Weise wie ein *Funktionsmodell* den Entwickler unterstützt¹³⁹.

In *Entwicklungsmodellen* wird die fortschreitende Konkretisierung des zu entwickelnden Produkts beschrieben. Typische Produktmodelle hierfür sind beispielsweise *Strichskizzen*, *Handskizzen*, *CAD-Modelle*, *Fertigungszeichnungen* oder *Stücklisten*, die die vom Entwickler festgelegten geometrischen und stofflichen Merkmale dokumentieren¹⁴⁰. So lässt sich beispielsweise im Rahmen einer Getriebeentwicklung die Anforderung eines Übersetzungsverhältnisses von $i=6$ durch eine 2-stufige

¹³⁷ Vgl. Birkhofer (1980), S. 86ff.

¹³⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 47f.

¹³⁹ Vgl. Vgl. Hauth (2008), S. 4f.

¹⁴⁰ Vgl. Lindemann (2007), S. 22.

Übersetzung mit Fest-Los Lagerungen bzw. einer angestellten Lagerung realisieren und in einer Strichskizze dokumentieren, siehe Abbildung 2-16. Die Skizze beschreibt den Zusammenhang zwischen Eingangsmoment T_1 bzw. Eingangsdrehzahl n_1 und Ausgangsmoment T_2 , der im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses weiter konkretisiert wird.

In der Literatur existieren weiterhin auch integrierte Ansätze zur Beschreibung der Produktkonkretisierung. Hierzu werden aufeinander aufbauende Abstraktionsebenen definiert und jeder Ebene Produktmodelle zur Beschreibung des zu entwickelnden Produkts zugeordnet¹⁴¹. EHRENSPIEL beispielsweise definiert die Abstraktionsebenen *Funktion*, *Physik* und *Gestalt* und stellte diese in Pyramidenform dar. Damit wird zum einen angedeutet, dass der Informationszuwachs und somit auch der Konkretisierungs- und Komplexitätsgrad der Produktmodelle stetig zunimmt, zum anderen wird dadurch die Zunahme an sinnvollen Lösungsmöglichkeiten angedeutet¹⁴². Während auf der Funktionsebene mit *Funktionsmodellen* bzw. auf physikalischer Ebene mit physikalischen Effektmodellen wie dem *Keileffekt* oder dem *Kniehebeleffekt* das Produkt schrittweise konkretisiert wird, werden auf der Wirkprinzip- bzw. Gestaltebene Wirkprinzipmodelle wie das *Contact und Channel Modell* oder struktur-, teileorientierte oder topologisch geometrische Gestaltmodelle wie *technische Zeichnungen* oder auch *CAD-Modelle* verwendet¹⁴³.

In Abbildung 2-17 wird die fortlaufende Konkretisierung einer Produktmodellpyramide am Beispiel der Entwicklung einer Hebebühne verdeutlicht. Ausgangspunkt der Produktentwicklung ist die Aufgabe, ein Produkt zum *Heben einer Last* zu entwickeln. Hierzu wird in Anforderungen u. a. festgehalten, dass der Anwender das Produkt von Hand bedienen kann, dass man mit dem Produkt eine Last von bis zu vier Tonnen heben kann und es in einer Garage verwendbar ist. Darauf aufbauend beginnt der Entwickler, das Produkt schrittweise zu konkretisieren. Auf der Funktionsebene konkretisiert er die Anforderungen mit Hilfe eines *Funktionsmodells* beispielsweise zur Funktion *Handkraft vergrößern*. Auf der nächsten Konkretisierungsstufe legt er den physikalischen Effekt *Druckfortpflanzung* $F_1 \cdot A_1 = F_2 \cdot A_2$ fest, um die Funktion zur *Handkraftvergrößerung* prinzipiell realisieren zu können. Alterna-

¹⁴¹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 39f.; Andreasen, Hein (1987), S. 63ff.

¹⁴² Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 40.

¹⁴³ Vgl. u. a. Ponn, Lindemann (2008), S. 19f.; Matthiesen (2002), S. 50f.; Potinecke (2009), S. 52f.

tiv dazu ist auch eine Realisierung der Funktion mittels des Effekts *zweiseitiger Hebel* denkbar. Bei der Festlegung von Effekten muss der Entwickler stets überprüfen, ob hiermit die gestellten Anforderungen auch erfüllt werden können. Im vorliegenden Beispiel scheidet der *Hebeleffekt* aus, da aufgrund der benötigten, großen Hebelarme zum Heben der Last von 4 Tonnen eine Verwendung in einer Garage nicht gewährleistet werden kann.

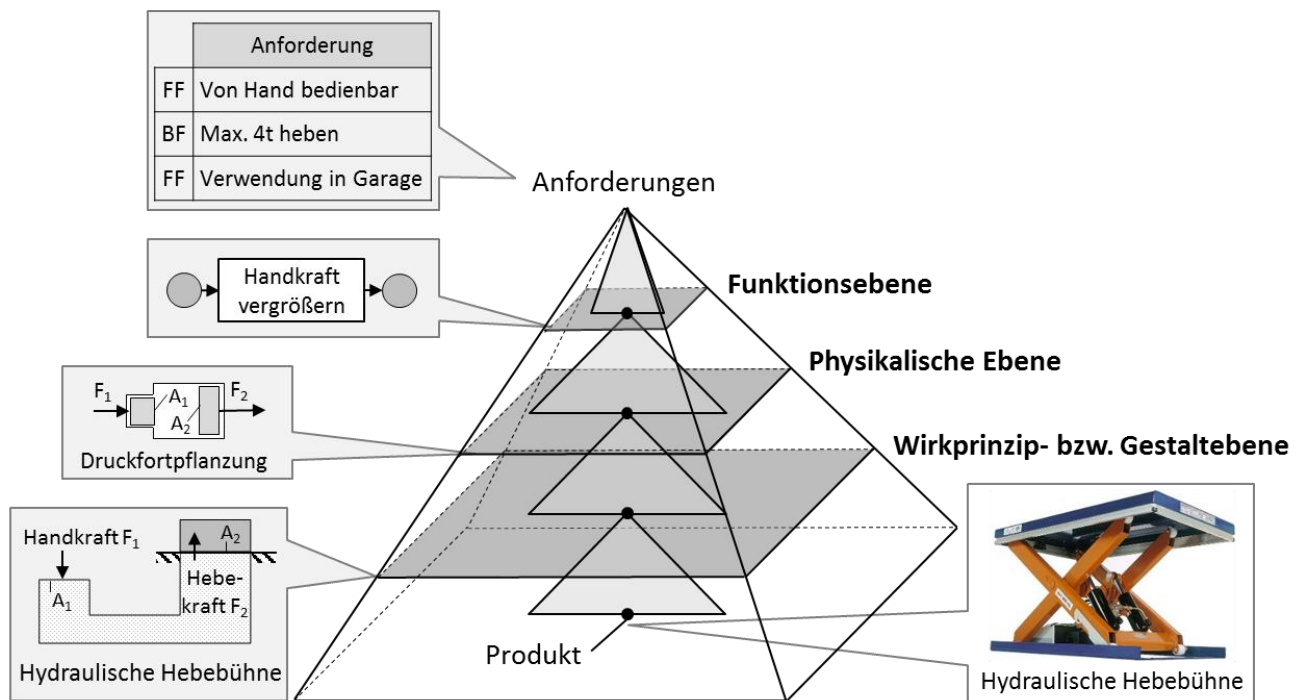


Abbildung 2-17: Produktmodellpyramide¹⁴⁴

Auf der Wirkprinzip- bzw. Gestaltebene werden die physikalischen Effekte durch das Festlegen von geometrischen und stofflichen Merkmalen weiter konkretisiert und in einen Wirkzusammenhang gebracht, siehe Abbildung 2-17. Anschließend werden die sich daraus ergebenden, auslegungsrelevanten Größen wie Form, Gestalt und Anzahl der Hydraulikzylinder, zugehörige Anschlüsse der Hydraulikleitungen, passende Hydraulikpumpen und ein entsprechendes Bedienelement für den Anwender bestimmt, bis die finale Gestalt der Hebebühne festgelegt worden ist.

In einem *Analysemodell* werden die wesentlichen Eigenschaften des Produkts erfasst, die zur Bewertung und Beurteilung der Anforderungserfüllung notwendig sind. Da der Entwickler die Eigenschaften eines Produkts nur mittelbar durch die

¹⁴⁴ In Anlehnung an Meerkamm, et al. (2009), S. 39 und Ponn, Lindemann (2008), S. 83; Bild entnommen aus Edmolift (2006).

Festlegung von Merkmalen beeinflussen kann, dienen Analysemodelle hauptsächlich dem Erkenntnisgewinn¹⁴⁵. So lässt sich beispielsweise ein System mit zwei Freiheitsgraden in das Analysemodell *Bewegungsgleichung* überführen, um damit die sich einstellenden Schwingungsamplituden der beiden Massen in Abhängigkeit von einer vorgegebenen, erzwungenen Schwingung zu untersuchen, siehe Abbildung 2-16. Da der Einfluss der Dämpfung vernachlässigt wurde, reicht eine Betrachtung der Partikulärlösung aus. Zur Lösung der *Bewegungsgleichung*, die eine Differentialgleichung darstellt, wurde ein Ansatz vom Typ der rechten Seite $x_{1P} = X_1 \cdot \cos \Omega t$ und $x_{2P} = X_2 \cdot \cos \Omega t$ gewählt, um damit die Amplituden X_1 und X_2 zu bestimmen. Die Ausprägungen eines Analysemodells sind, abhängig von den gestellten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt sowie der zugrundeliegenden Fachdisziplin, somit sehr individuell, weshalb an dieser Stelle nur einige beispielhaft aufgeführt werden. Im Bereich der Mechanik sind u. a. die folgenden Produktmodelle von Bedeutung, deren Ausprägung analytisch, numerisch oder auch physisch sein kann:

- Statische Modelle wie *Kräftegleichgewichte*, *Biegelinien*, oder *Finite Elemente Modelle* zur Analyse von auftretenden Kräften, Verformungen, Spannungen oder Temperaturen an Produkten,
- kinematische Modelle wie *Bewegungsgleichungen* oder *Mehrkörpersimulationsmodelle*, um das dynamische und kinematische Verhalten von Produkten zu untersuchen,
- strömungsmechanische Modelle wie die *Kontinuitätsgleichung der Stromfadentheorie*, *Erhaltungsgleichungen*, *Navier-Stokes Gleichungen* oder *Finite Volumen Modelle*, um Größen wie Druck, Auftriebskräfte, Widerstandskräfte oder sich einstellende Geschwindigkeiten an Produkten zu untersuchen,
- physische Modelle wie *Prototypen*, um realitätsnahe Daten des Produkts zur Verhaltensanalyse aufzunehmen.

Zur Erstellung von Analysemodellen werden in der Praxis häufig CAx-Systeme verwendet. Hierbei handelt es sich um rechnergestützte Unterstützungsverfahren, mit denen MKS, FEM oder CFD-Modelle erstellt werden können¹⁴⁶. Ausgangspunkt ist

¹⁴⁵ Vgl. Lindemann (2007), S. 22.

¹⁴⁶ Vgl. u. a. Vajna et al. (2009), S. 159ff.; Anderl, Binde (2010), S. 25ff.

hierbei stets ein CAD-Modell des zu untersuchenden Produkts, das die Gestalt abbildet. Die enthaltenen Informationen des CAD-Modells werden im Hinblick auf die zu untersuchende Fragestellung gefiltert und in ein entsprechendes Modell, beispielsweise ein MKS, FEM, oder CFD Modell, übertragen. Auf deren Basis werden anschließend notwendige Randbedingungen wie Kräfte, Momente oder Volumenströme festgelegt, die zur weiteren Untersuchung notwendig sind.

Die Erstellung eines FE-Modells wird im Folgenden am Beispiel einer Halterung für eine Linearführung erläutert, die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 666 an der TU Darmstadt entwickelt wurde, vergleiche Abbildung 2-18.

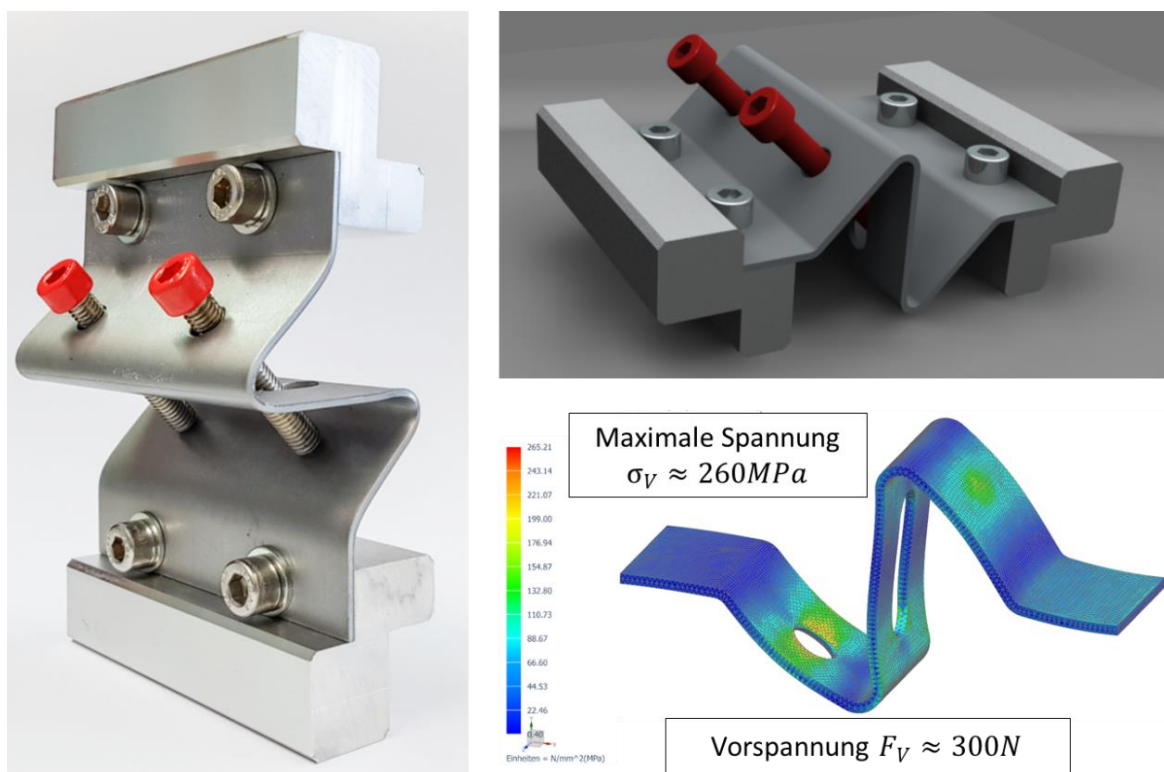


Abbildung 2-18: Prototyp, CAD-Modell und FE-Modell einer Halterung¹⁴⁷

Linearführungen werden beispielsweise an Hochhausfassaden eingesetzt, um daran Reinigungssysteme befestigen zu können. Um deren Rolleigenschaften an den Linearführungen zu verbessern, wurde eine Halterung entwickelt, mit der variable Vorspannkräfte auf die Schiene aufgebracht werden können. Um die sich einstellenden Spannungen in der Halterung bei vorgegebener Vorspannkraft untersuchen zu können, wurde ein FE-Modell entwickelt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass sich bei einer aufgetragenen Vorspannkraft von 30 N eine maximale Spannung

¹⁴⁷ Vgl. Roos et al. (2017), S. 8.

in der Halterung von 260 MPa einstellt. Mit Hilfe der hier vorgenommenen Untersuchungen wurde anschließend untersucht, ob sich an der Halterung plastische Verformungen einstellen, da diese per Anforderung nicht auftreten dürfen.

Mit Hilfe eines MKS-Modells hingegen lassen sich u. a. Bewegungssimulationen von Industrierobotern durchführen, um damit beispielsweise deren Reichweiten bestimmen zu können. Hierzu wird zunächst das Produktmodell *Freikörperbild* erstellt, das alle Freiheitsgrade des Industrieroboters beinhaltet, siehe Abbildung 2-19. Das *Freikörperbild* wird anschließend mit relevanten Daten eines CAD-Modells unter Verwendung einer entsprechenden Software verknüpft, wodurch das MKS-Modell entsteht und für die Bewegungssimulation verwendet werden kann.

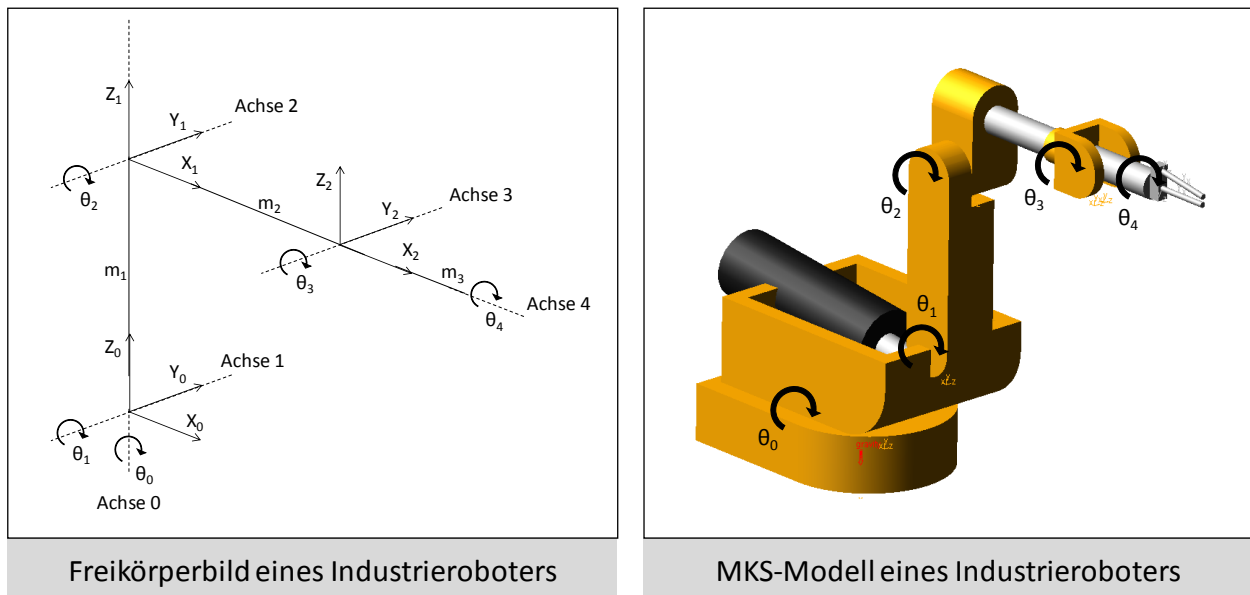


Abbildung 2-19: Erstellung eines MKS-Modells

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass jeder Produktmodelltyp einen bestimmten Zweck verfolgt, auf dessen Basis eine Vielzahl an konkreten Ausprägungen in Form von Produktmodellen zugeordnet werden können. Hierbei wird ersichtlich, dass Produktmodelle unterschiedliche Bedeutungen in den einzelnen Entwicklungsphasen aufweisen und somit auch mehreren Modelltypen zugeordnet werden können.¹⁴⁸ So lässt sich beispielsweise in einem *Funktionsmodell* die Konkretisierung von Anforderungen darstellen, wodurch es als Entwicklungsmodell verwendet wird. Andererseits kann ein *Funktionsmodell* auch zur Abstraktion eines

¹⁴⁸ Vgl. Meerkamm, et al. (2009), S. 33.

bestehenden oder zu entwickelnden Systems im Sinne eines Problemmodells dienen. Es kann daher keine eindeutige Zuordnung von Produktmodellen zu den Modelltypen vorgenommen werden. Entscheidend ist somit, dass Produktmodelle stets auf den zugrunde liegenden Zweck abgestimmt sind, weshalb eine umfassende Modellplanung unabdingbar ist.

3 Verwendung von Produktmodellen

Auf Basis der in Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen werden an dieser Stelle die Bausteine *Produktentwicklungsprozess*, *Produktmodell* und *Unsicherheit* zueinander in Beziehung gesetzt. Zunächst werden die Ansätze zur Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses aus Abschnitt 2.3 im Hinblick auf durchzuführende Tätigkeiten des Entwicklers konsolidiert. Darauf aufbauend werden die Produktmodelltypen aus Abschnitt 2.4 den Tätigkeiten zugeordnet, um zu verdeutlichen, welcher Produktmodelltyp für welchen Vorgehensschritt im Produktentwicklungsprozess benötigt wird.

Im nächsten Schritt wird in Abschnitt 3.2 die Verarbeitung von Informationen bei der Erstellung von Produktmodellen durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produktmodells thematisiert. Dies stellt eine notwendige Vorarbeit für Abschnitt 3.3 dar, um die Entstehung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen zu verdeutlichen.

3.1 Verortung von Produktmodellen im Entwicklungsprozess

Produktentwicklungsprozesse sind stets durch festlegende und überprüfende Tätigkeiten geprägt, die im Folgenden anhand der vorgestellten Vorgehensmodelle aus Abschnitt 2.3 erläutert werden.

In der *VDI 2221* beispielsweise wird der iterative Charakter eines Produktentwicklungsprozesses betont, vergleiche Unterabschnitt 2.3.1. Es findet somit kein starrer Ablauf der vorgeschlagenen Arbeitsabschnitte statt, sondern sie werden teils mehrfach oder in angepasster Reihenfolge durchlaufen, was die aufgestellte These festlegender und überprüfender Tätigkeiten unterstützt. Dadurch wird eine schrittweise Optimierung der Arbeitsergebnisse und somit des zu entwickelnden Produkts vorgenommen.¹⁴⁹

Im Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung wird die Notwendigkeit einer parallelen Betrachtung zweier Prozessketten in den Fokus gestellt, vergleiche Unterabschnitt 2.3.2. Ziel ist es, relevante Lebenslaufprozesse für eine Aufgabe im Entwicklungsprozess zu antizipieren, was einer festlegenden Tätigkeit entspricht. Diese werden anschließend im Hinblick auf notwendige Anpassungen des Produkts ausgewertet, was wiederum eine überprüfende Tätigkeit darstellt und

¹⁴⁹ Vgl. VDI-Richtlinie 2221 (1993), S. 11

die Prozesskette des Lebenslaufs beeinflussen kann. So ist beispielsweise denkbar, dass durch das Antizipieren eines Lebenslaufprozesses eine sehr hohe Feuchtigkeitsbelastung erkannt wird, die auf das Produkt in Nutzungsprozessen wirkt. Hieraus lässt sich beispielsweise die Notwendigkeit ableiten, eine Beschichtung auf dem Produkt vorzusehen, um es vor Korrosion zu schützen. Dies hat zur Folge, dass ein weiterer Arbeitsschritt in der Produktion benötigt wird und somit die Prozesskette des Produkts beeinflusst wird.

Im Axiomatic Design wird die fortschreitende Konkretisierung des zu entwickelnden Produkts mit Hilfe von vier Domains beschrieben. Auf Grundlage des *Independence Axiom* und des *Information Axiom* wird eine Optimierung der angedachten Produktrealisierung angestrebt, wofür permanente Sprünge zwischen den einzelnen Domains erforderlich sind und somit ebenfalls festlegende und überprüfende Tätigkeiten erkennbar sind, siehe Abbildung 2.3.3.

Konsolidieren lassen sich die beschriebenen Tätigkeiten der Vorgehensmodelle mit Hilfe der in der Konstruktionslehre ständig wiederkehrenden, methodischen Grundbegriffe *Analyse* und *Synthese*. Unter einer Analyse wird hierbei eine Informationsgewinnung durch Zerlegen oder Aufgliedern sowie durch Untersuchung von deren Eigenschaften und Zusammenhänge¹⁵⁰ verstanden. Im Rahmen einer Synthese hingegen werden durch Suchen, Finden, Zusammensetzen und Kombinieren Informationen verarbeitet, wodurch neue Verbindungen oder Verknüpfungen entstehen¹⁵¹. *Analyse* und *Synthese* sind somit durch ein Festlegen bzw. Überprüfen von etwas gekennzeichnet, wobei je nach Fokus des zugrundeliegenden Vorgehensmodells unterschiedliche Ausprägungen der hierfür notwendigen Tätigkeiten existieren.

Einen expliziten Fokus auf die konsolidierenden Grundbegriffe *Analyse* und *Synthese* legt WEBER im CPM/PDD Ansatz. Die *Synthese* bezieht sich auf das Festlegen von Merkmalen des Produkts, während in der *Analyse* eine Überprüfung der daraus entstehenden Eigenschaften stattfindet. Sie stellen wesentliche Tätigkeiten in der Produktentwicklung dar und tragen somit auch maßgeblich zum Erfolg bei¹⁵².

¹⁵⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 74f.

¹⁵¹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 75f.

¹⁵² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 189f.

Für die angestrebte Zuordnung von Produktmodelltypen in den Entwicklungsprozess eignet sich der CPM/PDD Ansatz, da sich zum einen die herausgestellten Tätigkeiten der übrigen Vorgehensmodelle in diesen Ansatz einordnen lassen¹⁵³. Somit können die auf diesem Vorgehensmodell basierenden Erkenntnisse zum Umgang mit Unsicherheit bei der Produktmodellerstellung prinzipiell auch auf die anderen Vorgehensmodelle übertragen werden.

Zum anderen verknüpft der CPM/PDD Ansatz festlegende Tätigkeiten im Rahmen einer *Synthese* und überprüfende Tätigkeiten bei der *Analyse* durch die Tätigkeiten der *Abhängigkeitsidentifikation* und *Evaluation*. Der sich hieraus ergebende Zyklus ist prädestiniert für die angestrebte Zuordnung, da anhand des Tätigkeitsinhalts und der jeweils im Anschluss folgenden Tätigkeit deutlich erkennbar ist, wofür Produktmodelle gebraucht werden. Somit wird im Folgenden anhand des CDM/PDD Ansatzes eine Verortung der Produktmodelltypen aus Abschnitt 2.4 vorgenommen, siehe Abbildung 3-1.

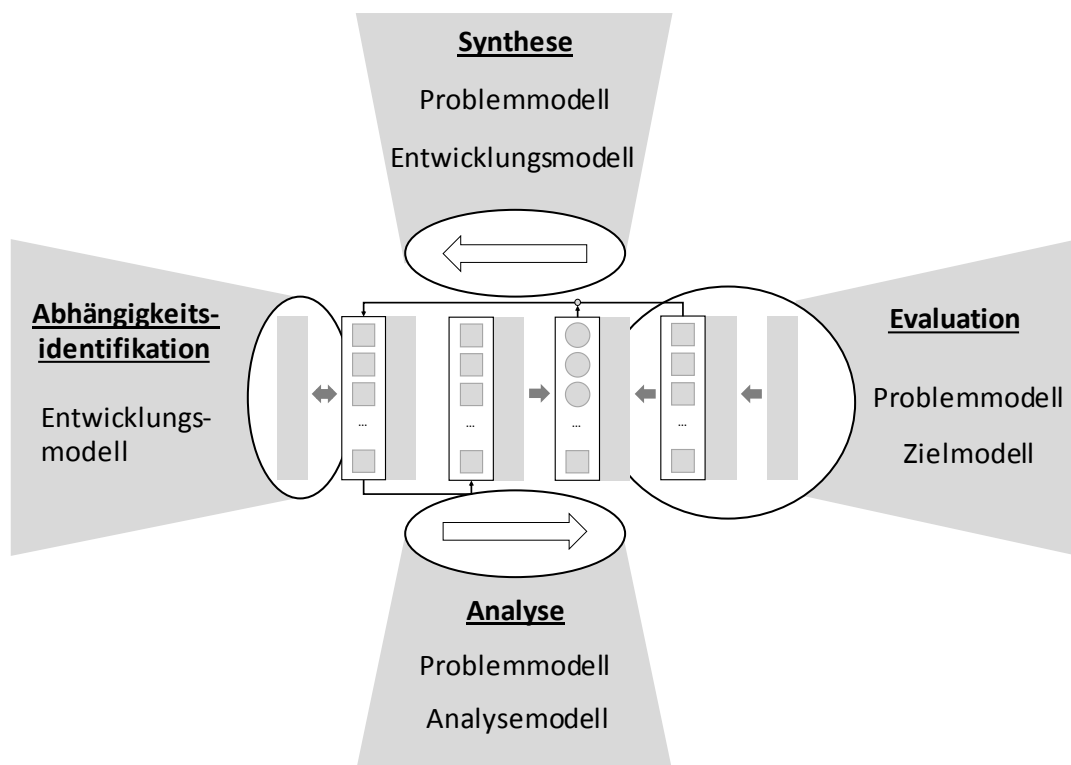


Abbildung 3-1: Verortung von Produktmodelltypen im CPM/PDD Modell

Der Konkretisierungsgrad der Ausprägungen einzelner Produktmodelltypen orientiert sich an den zur Verfügung stehenden Informationen sowie dem jeweiligen

¹⁵³ Vgl. Weber (2012), S. 49ff.

Zweck des Modells, wobei der Konkretisierungsgrad in der Regel im Laufe der Entwicklung zunimmt, beispielsweise beginnend bei analytischen Modellen bis hin zu detaillierten FE-Modellen.

Die Tätigkeit *Synthese* kann durch die Produktmodelltypen Problemmodell und Entwicklungsmodell unterstützt werden, da diese die Festlegung von Merkmalen und somit die Konkretisierung des Produkts unterstützen. Hilfreich ist hier neben der bereits in Unterabschnitt 2.3.4 erwähnten Verwendung von Lösungsmustern u. a. die Verwendung eines integrierten Produktmodells, das dem Entwickler aufgrund der enthaltenen *Funktionsmodelle*, *Modelle physikalischer Effekte* sowie *Wirkprinzipmodelle* Gedankenanstöße zur Synthese liefern kann. Empfehlenswert ist weiterhin eine Kombination der beiden Produktmodelltypen, da häufig zu Beginn der Synthese erst das Ziel des jeweiligen Syntheseschrittes mit Hilfe von Problemmodellen klar formuliert werden muss, ehe mit Hilfe von Entwicklungsmodellen Lösungsvarianten erstellt werden können¹⁵⁴.

Im Rahmen der *Identifikation von Abhängigkeiten* ist ebenfalls eine Anwendung von Entwicklungsmodellen sinnvoll. Hierfür eignet sich insbesondere die Anwendung von *CAD-Modellen*, die mit Hilfe von systeminternen Regeln, so genannten Constraints, die das Produkt auf Konsistenz prüfen und somit im Hinblick auf bestehende Abhängigkeiten zwischen Merkmalen hinweisen¹⁵⁵.

Der Tätigkeit *Analyse* hingegen lassen sich die Produktmodelltypen Problemmodell und Analysemodell zuordnen. Problemmodelle dienen an dieser Stelle hauptsächlich einem besseren Systemverständnis und unterstützen somit die Erstellung eines Analysemodells. Analysemodelle beschreiben hingegen den Zusammenhang zwischen festgelegten Merkmalen und entstehenden Eigenschaften. Mit zunehmender Konkretisierung des Produkts nehmen auch die festgelegten Merkmale zu, sodass die Erstellung von Analysemodellen auch immer komplizierter und deren Ergebnis komplexer wird. Die unterstützende Rolle von Problemmodellen zur *Analyse* nimmt somit insbesondere in den späten Phasen der Entwicklung eine wichtige Rolle ein, um damit u. a. wesentliche Eingangsparameter für ein Analysemodell identifizieren zu können.

¹⁵⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 18.

¹⁵⁵ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 508f.

Die *Evaluation* hingegen zielt auf die Identifikation von Treibern des Entwicklungsprozesses ab. Hierfür ist ein Abgleich mit Zielmodellen zwingend erforderlich, weiterhin kann der Einsatz von Problemmodellen aufgrund der steigenden Komplexität erforderlich sein, um den Abgleich zwischen Soll- und Ist Eigenschaften durchführen zu können.

Im Folgenden werden am Beispiel der Entwicklung eines Auslegers für eine Hubvorrichtung mögliche Ausprägungen von Produktmodelltypen für die einzelnen Tätigkeiten verdeutlicht. Ausgangspunkt der Entwicklung sind Anforderungen in Bezug auf die maximal zulässige Durchbiegung des Auslegers und der zu hebenden Last, die im Zielmodell *Anforderungsliste* festgehalten sind, siehe Abbildung 3-2.

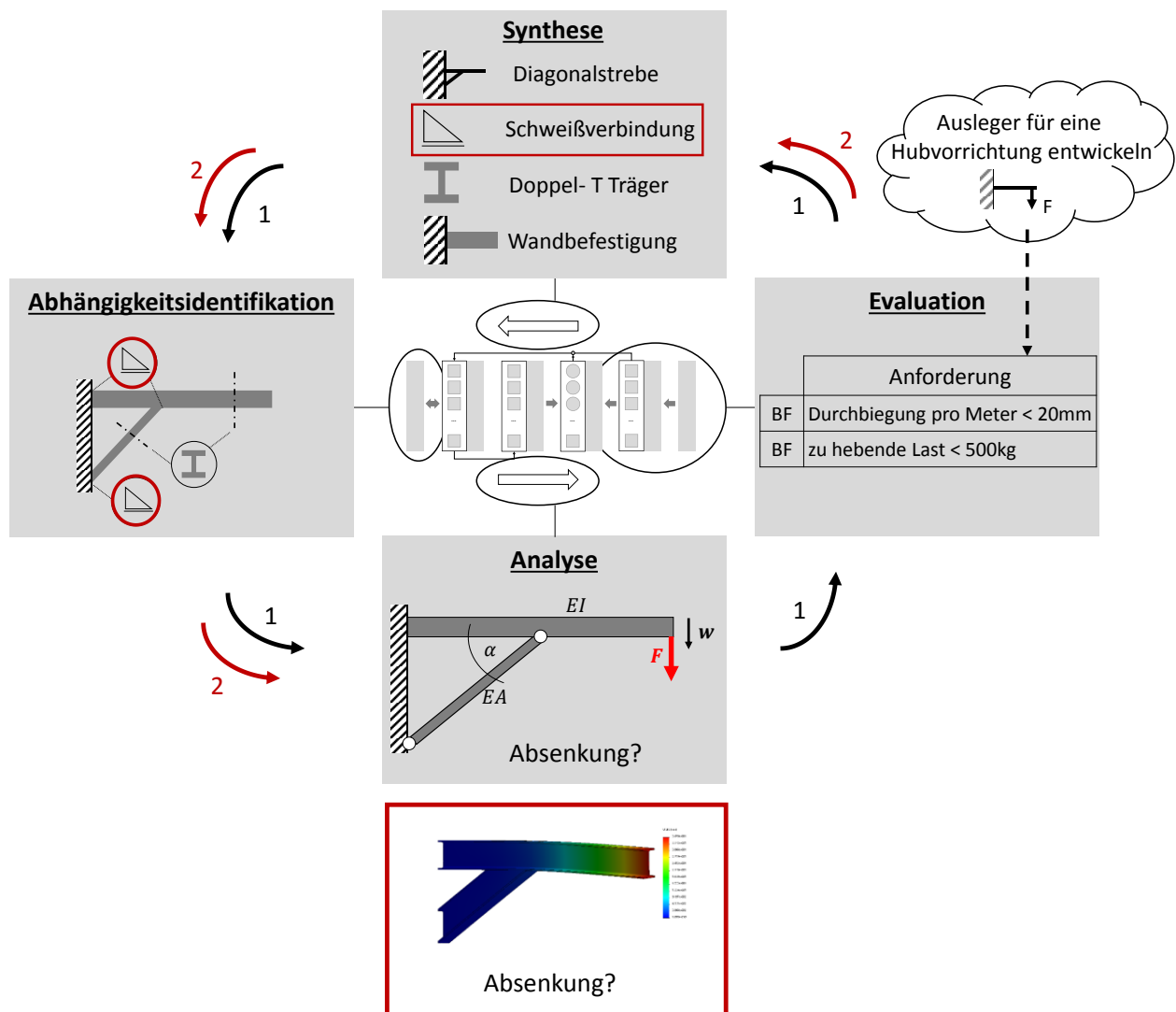


Abbildung 3-2: Produktmodelle am Beispiel der Entwicklung eines Auslegers

Davon ausgehend wird im Rahmen einer *Synthesetätigkeit* eine erste Gestalt des Auslegers unter Verwendung eines Doppel-T Trägers und einer Diagonalstrebe festgelegt, die an der Wand befestigt werden sollen.

Anschließend werden bei der Tätigkeit *Abhängigkeitsidentifikation* die in der *Synthese* festgelegten Elemente in einem *CAD Modell* zu einem ersten Gestaltentwurf des Auslegers zusammengefügt und die sich ergebenden Constraints zwischen dem Träger und der Diagonalstrebe untersucht. Hierbei lässt sich feststellen, dass das System mehrfach statisch überbestimmt ist.

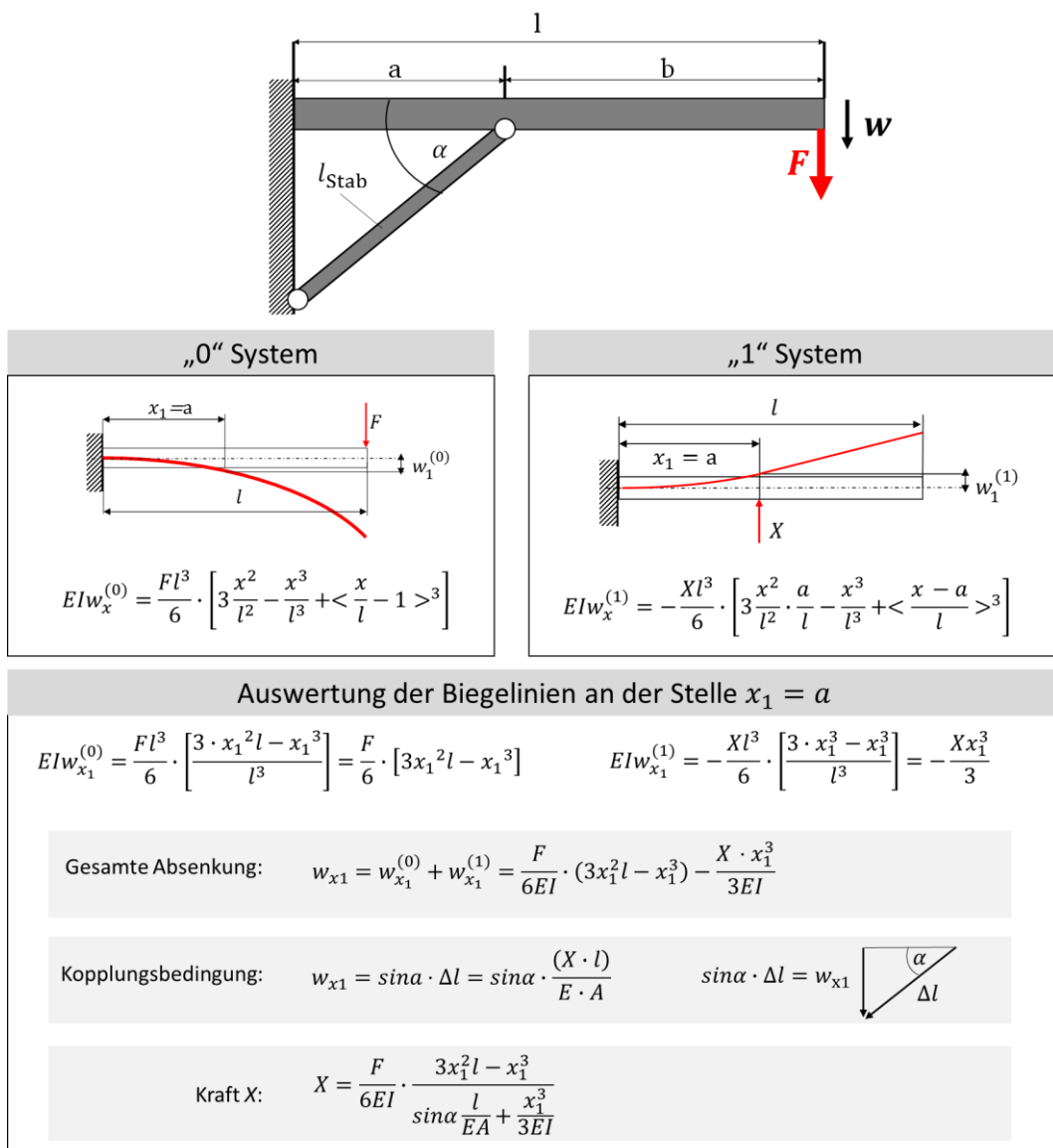


Abbildung 3-3: Analytisches Produktmodell zur Absenkungsbestimmung

Im nächsten Schritt wird im Rahmen einer *Analyse* untersucht, welche Absenkung sich am Ausleger einstellt, wenn die zu hebende Last von 500 kg aufgebracht wird.

Da zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung noch viele auslegungsrelevante Informationen über den Ausleger, wie das verwendete Material und die Toleranzen, die Kopplung zwischen dem Träger und der Diagonalstrebe oder auch das spätere Fertigungs- oder Montageverfahren fehlen, kann die sich einstellende Absenkung in einer ersten Annäherung nur abgeschätzt werden, siehe Abbildung 3-3.

Hierzu wird das überbestimmte System zunächst vereinfacht, u. a. durch die Betrachtung der Diagonalstrebe als Druckstab sowie deren Anbindung an den Träger als Gelenk, um es mit Hilfe des analytischen Produktmodells *Biegelinie* untersuchen zu können.

Basierend auf den getroffenen Vereinfachungen kann ein *0-System* und ein *1-System* definiert werden, deren Absenkungen zunächst getrennt berechnet und anschließend unter Berücksichtigung der Kopplungsbedingung beider Systeme überlagert werden, indem der senkrechte Anteil der Längung des Druckstabes mit der Absenkung des Balkens an der Angriffsstelle des Stabs gleichgesetzt wird. Damit lässt sich zunächst die unbekannte Kraft X des *1-Systems* berechnen. Anschließend kann mit einem identischen Vorgehen, der Auswertung der *Biegelinien* an der Stelle $x=1$, unter Verwendung von konkreten Ausprägungen der Parameter eine Absenkung des Balkens berechnet und der Anforderung gegenüber gestellt werden, siehe Abbildung 3-4 .

Ausprägungen von Parametern	
$a = 350\text{mm}$	} $w_l \approx 38\text{mm}$
$l_{\text{Stab}} = 390\text{ mm}$	
$E = 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
$A = 1000\text{mm}^2$	
$I_Y = 1,63 \cdot 10^6\text{mm}^4$	
$l = 2\text{m}$	
$F = 5000\text{N}$	
$\alpha = 30^\circ$	

Abbildung 3-4: Festlegung von Ausprägungen des analytischen Produktmodells

Im konkreten Fall liegt die berechnete Absenkung von $w_l \approx 38\text{ mm}$ unterhalb der zulässigen Absenkung von 20 mm pro Meter. Sollten große Differenzen zwischen der überschlägig berechneten und der maximal zulässigen Absenkung bestehen,

gilt es in einer weiteren *Synthesetätigkeit* konstruktive Anpassungen vorzunehmen, beispielsweise durch die Anpassung des Profils des Auslegers oder durch die Erhöhung der Anzahl der Diagonalstrebe, um die Absenkung zu reduzieren und somit den Anforderungen zu entsprechen.

In weiteren Durchläufen des Zyklus wird der Ausleger weiter konkretisiert, u. a. durch die Wahl einer Schweißverbindung zwischen Diagonalstrebe und Träger, wodurch sich die Produktmodelle der jeweiligen Tätigkeiten anpassen, siehe Abbildung 3-2. Im Rahmen einer weiteren *Analyse* lässt sich dann auch die Absenkung des Auslegers genauer bestimmen. Die Schweißverbindungen können u. a. zu Eigenspannungen im Träger führen, wodurch dieser sich verdrehen kann. Weiterhin ist die im analytischen Produktmodell getroffene Annahme eines Gelenks zwischen Träger und Diagonalstrebe nicht mehr haltbar. Um diese beiden Einflüsse in die Analyse zu integrieren, eignet sich eine numerische Berechnung der Absenkung mit Hilfe eines detaillierteren *FE-Modells*, siehe Abbildung 3-5.

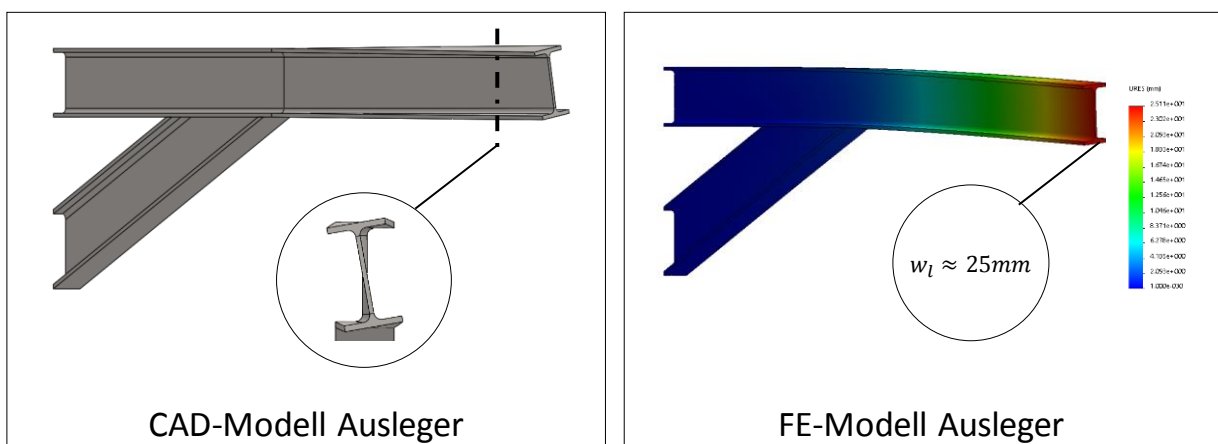


Abbildung 3-5: CAD- und FE-Modell zur Absenkungsbestimmung

Unter Berücksichtigung einer angenommenen Verdrehung von 5° entlang der horizontalen Schwerpunktschwerachse des Trägers, was einer sehr konservativen Vereinfachung der sich einstellenden Verdrehungen entspricht, sowie einer festen Kopplung zwischen Diagonalstrebe und Träger, stellt sich unter sonst gleichbleibenden Parameterausprägungen wie in Abbildung 3-4 eine Absenkung am Ende des Trägers von $w_l \approx 25\text{mm}$ ein. Anhand der neu berechneten Absenkung können Erkenntnisse für die weiteren Durchläufe des Zyklus in Bezug auf eine Optimierung der Form des Trägerquerschnitts abgeleitet werden, bis die finale Gestalt des Auslegers festgelegt worden ist.

Anhand dieses Beispiels lässt sich erkennen, dass die Wahl der Ausprägung eines Produktmodelltyps sehr stark davon abhängig ist, welche Einflüsse im Produktmodell abgebildet werden sollen bzw. welche Informationen zur Verfügung stehen. Es gilt stets zu überprüfen, ob sich das Produktmodell eignet und ob die damit verbundenen Vereinfachungen noch dem Zweck der Analyse dienen.

In der industriellen Praxis ist, wie bereits in Abschnitt 1.1 dargelegt, die Bestimmung bzw. die Vorhersage von Eigenschaften mit hinreichender Sicherheit und Genauigkeit ein bedeutendes Thema¹⁵⁶, sodass die Erstellung von Analysemodellen im Rahmen einer *Analyse* eine wichtige Rolle einnimmt.

Dies kann anhand der Tatsache belegt werden, dass die überwiegende Mehrheit von Produktentwicklungsprozessen auf bereits bekannten Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukten basieren¹⁵⁷. Es handelt sich somit hauptsächlich um Anpassungs- und Variantenkonstruktionen, die neben Neukonstruktionen die drei am häufigsten durchgeführten Produktentwicklungen der klassischen Konstruktionsmethodik darstellen¹⁵⁸.

Unterstützt wird diese These von ALBERS. Er stellt im Rahmen von Forschungsaktivitäten zum Thema *Produktgenerationenentwicklung* u. a. mit Hilfe empirischer Untersuchungen fest, dass bei der Entwicklung eines Nachfolgeprodukts sowohl die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation zum Vorgängerprodukt als auch eine Neuentwicklung von Teilsystemen möglich ist¹⁵⁹. Die Konstruktionsarten werden somit stets in Kombination verwendet, wobei auch hier der Anteil an neuen Lösungen eher gering ist¹⁶⁰.

Zusammenfassend lässt sich ein Bestreben erkennen, bestehende Produkte zu verbessern oder aus diesen für Folgeentwicklungen zu lernen. Dies lässt sich ebenfalls der Analysetätigkeit und somit auch der Erstellung von Analysemodellen zuordnen, was deren Bedeutung in der Praxis ebenfalls verdeutlicht. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher auch eine Fokussierung auf Analysemodelle vorgenommen¹⁶¹.

¹⁵⁶ Vgl. Weber (2012), S. 49.

¹⁵⁷ Vgl. Wyatt et al. (2009), S. 167f.; Deubzer, Lindemann (2009), S. 371ff.; Eckert et al. (2011), S. 811ff.; Albers et al. (2005), S. 2f.

¹⁵⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 94.

¹⁵⁹ Vgl. Albers et al. (2015), S. 4f.

¹⁶⁰ Vgl. Albers et al. (2015), S. 8.

¹⁶¹ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Problemmodelle, die ebenfalls der Tätigkeit *Analyse* zugeordnet wurden, eine sehr individuelle Sicht auf ein Problem darstellen und somit sehr stark vom Verständnis und Knowhow des Entwicklers abhängen. Da der Einfluss des Entwicklers selbst auf die Erstellung von Produktmodellen nicht untersucht wird, wird auf eine Thematisierung von Problemmodellen im Rahmen des weiteren Verlaufs dieser Arbeit verzichtet.

3.2 Lebenszyklus eines Produktmodells

Nachdem Produktmodelle in den Entwicklungsprozess eingeordnet und eine Fokussierung auf *Analysemodelle* gelegt wurde, gilt es das Verständnis von Unsicherheit einzuordnen.

Grundsätzlich unterliegt ein Modell einem Lebenszyklus¹⁶², das heißt es durchläuft, ähnlich wie ein Produkt im Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung, verschiedene Prozesse, siehe Abschnitt 2.3.2.

In Abschnitt 2.1.1 wurde festgehalten, dass Unsicherheit stets in Prozessen auftritt. Es besteht zunächst die Notwendigkeit eines Verständnisses darüber, welche Prozesse im Detail bei der Erstellung von Produktmodellen durchlaufen werden. Im Folgenden wird daher ein Überblick über bestehende Ansätze zur Beschreibung des Lebenszyklus eines Modells gegeben, auf deren Basis dann eine konsolidierte Sichtweise abgeleitet und eine Verortung von Unsicherheit vorgenommen wird.

3.2.1 Bestehende Ansätze in der Literatur

In Abhängigkeit von der Fachdisziplin, in der ein Modell verwendet wird, existieren in der Literatur unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung des zugrundeliegenden Lebenszyklus. Diese unterscheiden sich anhand der Anzahl und des Detaillierungsgrads durchzuführender Tätigkeiten des Entwicklers und werden im Folgenden auszugsweise dargestellt.

Einen umfassenden Überblick über Tätigkeiten gibt NANCE. Er bezieht sich auf die Entwicklung von Simulationsmodellen, wie sie auch in der Produktentwicklung vor allem zur Analyse von Eigenschaften häufig verwendet werden. Es wird zwischen den Phasen *Problemdefinition*, *Modellentwicklung* und *Entscheidungsunterstützung*¹⁶³ unterschieden, wobei jede Phase nochmals weiter unterteilt werden kann, siehe Abbildung 3-6. Diese Einteilung wird in der Literatur in ähnlicher Form auch von weiteren Autoren¹⁶⁴ verwendet. Die hieraus resultierenden Erkenntnisse werden bei der folgenden Beschreibung der einzelnen Phasen nach NANCE mit berücksichtigt.

¹⁶² Vgl. Nance (1988), S. 3f.

¹⁶³ Vgl. Nance (1988), S. 4.

¹⁶⁴ Vgl. u. a. Page et al. (2005), S. 12f.; Buede (2009), S. 6; ASME (2006), S. 5; Negele (2006), S. 65; Kerley et al. (2009), S. 219ff. Fernandez-Lopez, Gomez-Perez, Juristo (1997), S. 35.

In der *Problemdefinitionsphase* wird das kommunizierte Problem vom Kunden formalisiert sowie eine Technik zur deren Lösung festgelegt. Hierunter wird die Festlegung des prinzipiellen Produktmodelltyps verstanden, wie beispielsweise eine analytische, numerische oder experimentelle Betrachtung des Problems. Anschließend wird das zu untersuchende System analysiert und es werden relevante Bereiche festgelegt, die einen Einfluss auf die Lösung der Problemstellung haben.

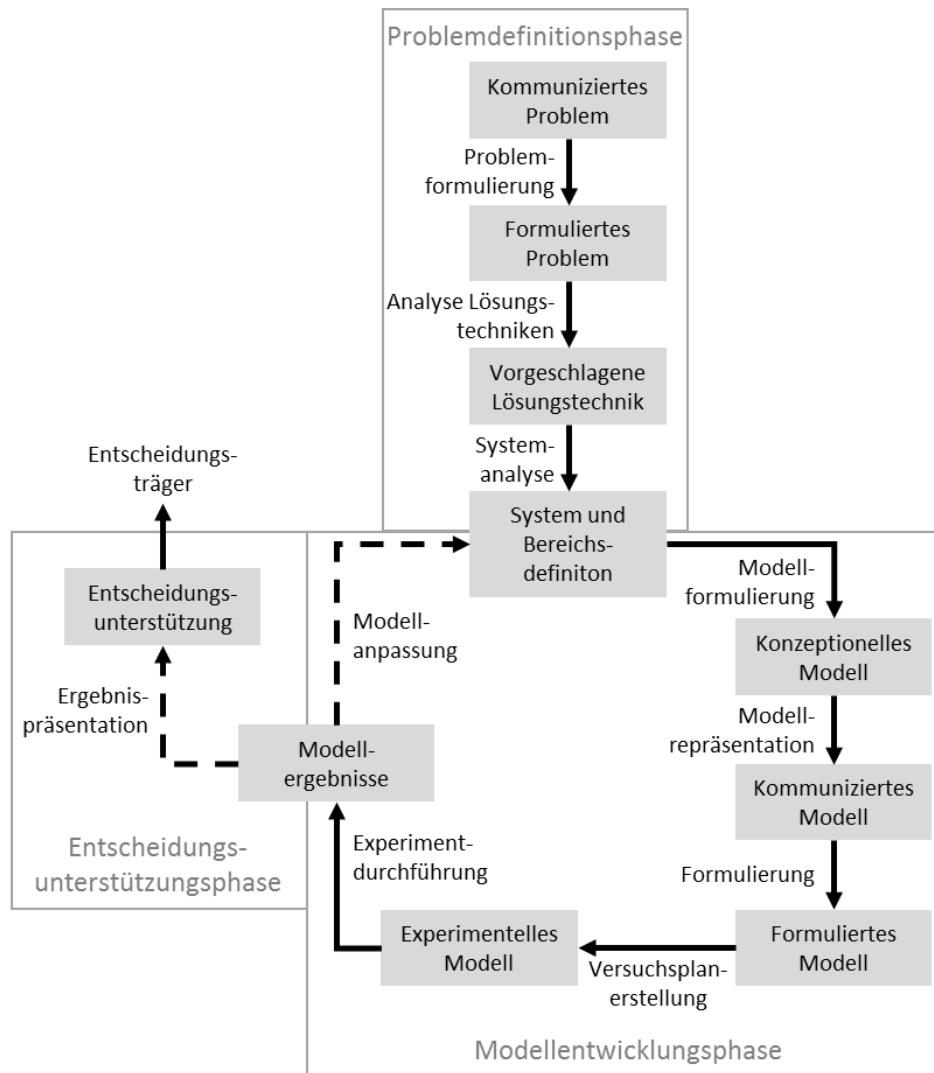


Abbildung 3-6: Lebenszyklusphasen eines Modells nach NANCE¹⁶⁵

Anhand der System- und Bereichsdefinition wird in der *Modellentwicklungsphase* ein konzeptionelles Modell erstellt, das zunächst formalisiert wird, um es nach außen kommunizieren zu können. Anschließend erfolgt der schrittweise Übergang zu einem formulierten Modell, auf dessen Basis ein Versuchsplan zur Generierung von

¹⁶⁵ Vgl. Nance et al. (1984), S. 577.

Modellergebnissen erstellt werden kann. Diese werden abschließend validiert. Falls die Modellergebnisse nicht den erwarteten Ergebnissen entsprechen, wird eine Anpassung des abgebildeten Bereichs des Systems vorgenommen oder das formulierte Modell selbst wird angepasst. Die *Modellentwicklungsphase* ist somit als iterativer Prozess zu verstehen, bei dem der Entwickler die durchgeführten Modellierungsschritte so lange evaluiert, bis er deren Ergebnisse für belastbar hält. Die Modellergebnisse werden zum Schluss in der *Entscheidungsunterstützungsphase* vom Entwickler verwendet, um das Problem zu lösen.

Die von NANCE erkannten Phasen lassen sich auch bei der beispielhaften Erstellung eines Analysemodells aus Abschnitt 3.1 erkennen, das bei der Entwicklung des Auslegers benötigt wurde. Im Rahmen der *Problemdefinitionsphase* wurde hierbei festgelegt, die Absenkung des Auslegers zu bestimmen, um diese mit den Anforderungen abgleichen zu können. In diesem Kontext stellt das kommunizierte Problem die Problematik dar, dass das zu entwickelnde Produkt stets dem Zweck dienen muss, eine Last heben zu können. Durch die Fokussierung auf die sich einstellende Absenkung, die eine wichtige Anforderung zur Funktionserfüllung darstellt, wurde das kommunizierte Problem in ein formuliertes Problem überführt. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums wurde eine analytische Untersuchung der Absenkung durchgeführt, was dem Festlegen einer Lösungstechnik entspricht. Im Rahmen der *Modellentwicklungsphase* wurde bei der Bereichsdefinition der gesamte Ausleger betrachtet und es wurden eine Reihe von Vereinfachungen getroffen, wie die Betrachtung der Diagonalstrebe als Druckstab und die Anbindung der Diagonalstrebe als Gelenk, und in einem konzeptionellen Modell abgebildet, siehe Skizze im oberen Bereich von Abbildung 3-3. Die getroffenen Vereinfachungen wurden bei der Erstellung einer *Biegelinie* formalisiert und zueinander in Beziehung gesetzt, wodurch das eigentliche Produktmodell formuliert wurde. Auf dessen Basis konnte eine Absenkung bestimmt werden, was dem Modellergebnis entspricht.

Die berechnete Absenkung wurde in einer *Entscheidungsunterstützungsphase* der zulässigen Absenkung aus den Anforderungen gegenübergestellt, um damit zu überprüfen, ob im Rahmen von weiteren Syntheseschritten festgelegte Merkmale des Auslegers angepasst werden müssen.

Auch bei rechnergestützten Analysemodellen, die im Rahmen der Verwendung von CAx-Systemen erstellt werden, lassen sich die Phasen nach NANCE erkennen. Im

Folgendes wird die Einordnung am Beispiel eines CAD-FEM Systems erläutert, dessen Erkenntnisse sich analog auf andere Systeme, wie CAD-MKS oder CAD-CFD, übertragen lassen.

Ausgangspunkt eines CAD-FEM Systems ist zunächst eine Fragestellung, für die ein FE-Modell benötigt wird. Auf dessen Basis wird in vorbereitenden Arbeitsschritten die Aufgabenstellung geklärt. Hierbei wird geprüft, ob eine FE-Berechnung überhaupt durchgeführt werden kann, ob die für die Aufgabenstellung relevante Geometrie sowie zugehörige Werkstoffinformationen vorliegen und ob Möglichkeiten zur Plausibilisierung der FE-Ergebnisse zur Verfügung stehen¹⁶⁶. Alle vorbereitenden Schritte lassen sich der *Problemdefinitionsphase* nach NANCE zuordnen, wobei insbesondere die Formulierung des Problems im Vordergrund steht. Die Analyse von Lösungstechniken hingegen wird nicht thematisiert, da diese bereits durch die im Rahmen der Erstellung eines FE-Modells festgelegt wird.

Anschließend wird bei der Erstellung des CAD-FEM Systems ein Gedankenmodell¹⁶⁷ entwickelt, das relevante Bereiche des CAD-Modells definiert und innerhalb des relevanten Bereichs Vereinfachungen vornimmt, beispielsweise durch die Approximation der Geometrie durch Vernachlässigung von Toleranzen oder Oberflächenrauheiten. Dieser Arbeitsschritt entspricht der Erstellung eines konzeptionellen Modells, das ein wesentlicher Schritt in der *Modellentwicklungsphase* darstellt. Im Anschluss wird das Gedankenmodell, analog zum formalisierten Modell nach NANCE, in ein FE-Modell übertragen, in dem alle getroffenen Vereinfachungen des Gedankenmodells formalisiert werden.

Abschließend wird das FE-Modell mit Hilfe eines Solvers¹⁶⁸ gelöst und dessen Ergebnisse dargestellt und interpretiert. Auch hier lassen sich Parallelen zum experimentellen Modell und dessen Auswertung erkennen, vergleiche Abbildung 3-6. Bei Auffälligkeiten wird, analog zu den Iterationsschleifen nach NANCE, die Implementierung des FE-Modells überprüft und erneut durch den Solver gelöst, bis der Entwickler die Ergebnisse für plausibel hält. Erst dann werden die Ergebnisse zur Lösung der Aufgabe im Rahmen der *Entscheidungsunterstützungsphase* verwendet.

NANCE hebt bei der Beschreibung des Lebenszyklus explizit Zwischenzustände des Simulationsmodells hervor, die selbst Modelle sind, aufeinander aufbauen und so-

¹⁶⁶ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 261f.

¹⁶⁷ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 259ff.

¹⁶⁸ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 262.

mit die schrittweise Entwicklung des eigentlichen Simulationsmodells dokumentieren. Die Zwischenzustände werden durch Tätigkeiten wie *Problemformulierung* oder *Modellformulierung* ineinander überführt. Die Überführung eines Zwischenzustandes in den nächsten kann als Transformation verstanden werden, da das Ergebnis jeder Überführung eine aus der Tätigkeit abgeleitete, zweckmäßige Beschreibung des Ausgangszustands darstellt. Somit lassen sich die einzelnen, durchzuführenden Tätigkeiten nach NANCE in Anlehnung an HUBKA jeweils als Entwicklungsprozesse auffassen, vergleiche hierzu Unterabschnitt 2.2.5. Dies stellt eine notwendige Voraussetzung zur Verortung von Unsicherheit dar, siehe Unterabschnitt 2.1.1. Ausgangspunkt der Entwicklungsprozesse sind jedoch keine übergeordneten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt, wie sie HUBKA definiert hat, sondern Anforderungen an ein Produktmodell, die sich aus Problemen oder Aufgaben im Rahmen von Analysetätigkeiten ableiten lassen. Wie bereits in Unterabschnitt 2.3.4 erwähnt, besteht in der Analyse eine wesentliche Tätigkeit zur Erfüllung von Anforderungen an das Produkt, sodass die hier vorgenommene Übertragung des Entwicklungsprozessverständnisses auf den Lebenszyklus eines Produktmodells auch HUBKAs übergeordnetem Konkretisierungsgedanken entspricht¹⁶⁹.

3.2.2 Konsolidierte Beschreibung des Produktmodelllebenszyklus

Abgeleitet aus den Phasen nach NANCE, die aufgrund ähnlicher Auffassungen weiterer Autoren und der Wiedererkennung bei der Anwendung von CAx Systemen als repräsentativ für die Produktentwicklung angesehen werden können, lassen sich vier Entwicklungsprozesse zur Beschreibung des Lebenszyklus eines Produktmodells festlegen, auf deren Basis eine Verortung von Unsicherheit im nächsten Unterabschnitt vorgenommen wird, siehe Abbildung 3-7.

Im Rahmen der *Modellplanung* wird der Zweck des benötigten Modells festgelegt und in Form von Anforderungen beschrieben. Da in dieser Arbeit der Fokus auf die Verwendung von Produktmodellen im Rahmen einer Analyse gelegt wurde, bezieht sich die Zweckfestlegung hauptsächlich auf die Fragestellung, welche Eigenschaften in dem jeweiligen Analyseschritt untersucht werden sollen. Hierzu werden neben dem Zweck des Modells auch das betrachtete System selbst, Grenzen der Be-

¹⁶⁹ Vgl. Hubka, Eder (1988), S. 215.

trachtung sowie inhaltliche und organisatorische Rahmenbedingungen in die Formulierung der Anforderungen mit einbezogen. Anschließend wird auf deren Basis die Durchführbarkeit der Modellerstellung sowie deren Nutzung abgeschätzt und gegebenenfalls Anpassungen an den formulierten Anforderungen vorgenommen¹⁷⁰. Die Modellplanung umfasst somit im Wesentlichen die Problemformulierung nach NANCE. Zur möglichst vollständigen Klärung der Anforderungen an das Modell kann sich der Entwickler an Leitfragen orientieren, wie sie beispielsweise VAJNA et. al formuliert haben¹⁷¹:

- Was ist das zu untersuchende System?
- Welche Fragestellungen sollen behandelt werden?
- Welche Sichtweisen auf das zu untersuchende System sind für den Modellzweck notwendig?
- Welche Details müssen berücksichtigt oder können vernachlässigt werden?
- Welche Ergebnisse sind zur Klärung der Fragestellungen erforderlich und in welcher Form sollen die Ergebnisse aufbereitet und dokumentiert werden?

Diese lassen sich für alle erwähnten Analysemodelle in Abschnitt 2.4 verwenden, inklusive der rechnergestützten Umsetzung mit Hilfe von CAx-Systemen.

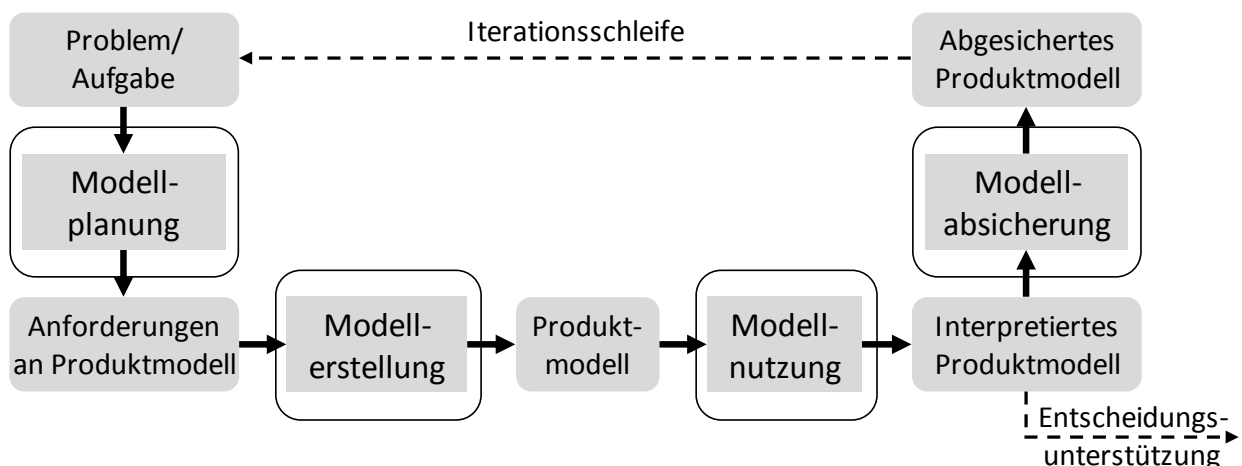


Abbildung 3-7: Konsolidierter Lebenszyklus eines Produktmodells

Auf Basis einer erstellten Anforderungsliste findet die eigentliche *Modellerstellung* statt. Im Wesentlichen wird hierbei *eine System- und Bereichsdefinition* sowie die

¹⁷⁰ Vgl. Wenzel et al. (2008), S. 118.

¹⁷¹ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 140f.

Erstellung eines *konzeptionellen Modells* bzw. bei der Verwendung von CAx-Systemen eines *Gedankenmodells* und deren Umsetzung in ein programmiertes Modell wie beispielsweise ein *FE-Modell* vorgenommen. Der Entwickler bildet Attribute des betrachteten Systems auf Attribute des Produktmodells ab. Hierbei trifft er eine Reihe von Annahmen¹⁷², die sich mit Hilfe der Modellmerkmale nach STACHOWIAK in Annahmen bezüglich des zugrunde gelegten Pragmatismus, Abbildung und Verkürzung strukturieren lassen, vergleiche Unterabschnitt 2.2.4. Er externalisiert somit seine Gedanken und formalisiert sie unter Berücksichtigung der Anforderungen¹⁷³, bis die Modellerstellung abgeschlossen ist. Das Verständnis des Begriffs Externalisierung wird auf Basis der Erkenntnisse der Detaillierung des Modellerstellungsprozesses in Abschnitt 5.1 noch weiter präzisiert. Die im Rahmen dieser Informationsverarbeitung notwendigen Tätigkeiten werden in der Literatur auch als Modellieren bezeichnet, dessen Ergebnis ein Modell ist¹⁷⁴. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird im Rahmen der Modellerstellung die System- und Bereichsdefinition sowie die Formalisierung von getroffenen Annahmen aufgrund besonderer Relevanz betrachtet, siehe hierzu Abschnitt 4.1. Daher wird im weiteren Verlauf unter einem Produktmodell stets ein *konzeptionelles Modell* nach NANCE verstanden, welches die Gedankengänge des Entwicklers formalisiert darstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse gelten analog auch für ein Gedankenmodell, wie es bei der Verwendung von CAx-Systemen verwendet wird.

Nach der Modellierung wird das Produktmodell in der *Modellnutzung* für den vorgesehenen Zweck verwendet. Mit Hilfe des Produktmodells werden Ergebnisse erzeugt, wie beispielsweise das Auswerten des Produktmodells *Biegelinie* an einer bestimmten Stelle oder die Verwendung eines Solvers für ein *FE-Modell*, vergleiche hierzu Abbildung 2-18 oder Abbildung 3-4. Die Ergebnisse werden anschließend interpretiert, dokumentiert und zur Entscheidungsunterstützung verwendet.

Aufgrund der Tatsache, dass ein Modell die Realität verkürzt darstellt und auf Annahmen beruht, sind alle Modelle stets unvollständig und nie exakt¹⁷⁵. Der Entwickler muss somit in Iterationsschleifen, wie sie NANCE beschrieben hat, stets überprüfen, ob das erstellte Produktmodell und deren Ergebnisse auch den Anfor-

¹⁷² Vgl. Falkenberg et al. (1998), S. 56; Dremont et al. (2011), S. 176.

¹⁷³ Vgl. Falkenberg et al. (1998), S. 55.

¹⁷⁴ Vgl. Falkenberg et al. (1998), S. 56.

¹⁷⁵ Vgl. Box (1976), S. 792.

derungen entsprechen und somit für den erforderlichen Zweck erfolgreich eingesetzt werden kann. Diese Beurteilung erfolgt in der *Modellabsicherung*. Hierbei spielen die Tätigkeiten *Verifikation* und *Validierung* eine wesentliche Rolle, deren zugrunde gelegten Definitionen und durchzuführender Tätigkeitsumfang sich in Abhängigkeit von der Fachdisziplin unterscheiden¹⁷⁶. Gemeinsam ist das Verständnis, dass im Rahmen einer Verifikation stets ein Abgleich der Gedanken des Entwicklers mit den Ergebnissen der einzelnen Modellierungsschritte vorgenommen wird. Daraus lässt sich für den weiteren Verlauf dieser Arbeit das folgende Verständnis von Verifikation ableiten:

*Verifikation ist eine Tätigkeit, in der überprüft wird, ob die definierten Anforderungen an das Produktmodell, das erstellte Produktmodell sowie das interpretierte Produktmodell die Vorstellungen des Entwicklers ausreichend genau repräsentieren.*¹⁷⁷

Verifikationstätigkeiten werden somit begleitend zum Lebenszyklus, beginnend bei der Formulierung von Anforderungen bis hin zur Interpretation eines Produktmodells, durchgeführt und finden in der Modellwelt¹⁷⁸ des Entwicklers statt, vergleiche Abschnitt 6.1 und siehe Abbildung 3-8.

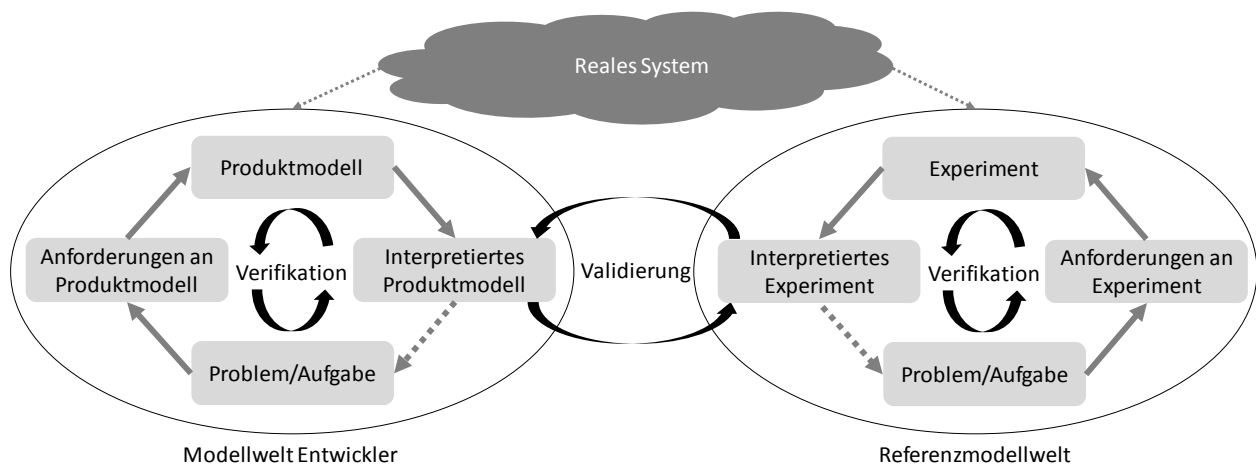


Abbildung 3-8: Verifikation und Validierung bei der Modellabsicherung¹⁷⁹

¹⁷⁶ Vgl. u. a. Albers et al. (2016), S. 543ff; Page et al. (2005), S. 199ff.; Sargent (2010), S. 167ff.; Kleindorfer et al. (1998), S. 1088ff.; ASME (2006), S. 7f.; Oberkampf, Trucano (2002), S. 11ff.

¹⁷⁷ In Anlehnung an Oberkampf, Trucano (2002), S. 17f.

¹⁷⁸ Der Begriff Modellwelt wird in Unterabschnitt 6.1.1 detailliert erläutert.

¹⁷⁹ In Anlehnung an Sargent (2010), S. 170; ASME (2006), S. 9; Page et al. (2005), S. 200.

Bei einer Validierung hingegen findet ein Abgleich des Ergebnisses des interpretierten Produktmodells mit der realen Welt statt¹⁸⁰. Da die reale Welt von jedem Individuum unterschiedlich wahrgenommen und stets mit Hilfe von Modellen beschrieben und interpretiert wird, kann der angestrebte Abgleich auch nur mit einem adäquaten Repräsentanten der realen Welt in Form eines Referenzmodells durchgeführt werden. In der Praxis häufig eingesetzte Referenzmodelle sind Experimente oder auch bereits bestehende, ausreichend verifizierte und validierte Produktmodelle¹⁸¹. Alle Referenzmodelle unterliegen ebenfalls einem Lebenszyklus, für die wiederum Verifikationstätigkeiten durchzuführen sind, siehe Abbildung 3-8.

Validierung wird wie folgt definiert:

*Validierung ist eine Tätigkeit in der überprüft wird, ob die Modellierungsergebnisse die reale Welt, repräsentiert durch ein Referenzmodell, ausreichend genau abbilden.*¹⁸²

Anhand dieser Definition wird deutlich, dass der Abgleich zwischen der Modellwelt des Entwicklers und einer Referenzmodellwelt nur auf Basis der jeweils interpretierten Ergebnisse erfolgen kann. Hierbei wird angenommen, dass das Referenzmodell die reale Welt genauer als das zu validierende Produktmodell beschreibt und somit auch zur Validierung der Modellierungsergebnisse des Entwicklers dienen kann¹⁸³. Bestehen zwischen den Ergebnissen der beiden Modellwelten Abweichungen, lassen sich hieraus noch keine Indizien im Hinblick auf deren Ursache ableiten. Der Entwickler muss entscheiden, ob er die Abweichung akzeptiert oder als Anlass für eine Verifikationsschleife innerhalb der eigenen Modellwelt nimmt, um deren Ursachen zu identifizieren und das Produktmodell im Hinblick auf die Zielsetzung zu optimieren.

Das Verständnis von Verifikation und Validierung wird am Beispiel einer Tellerfeder erläutert. Weiterhin sei an dieser Stelle auf Unterabschnitt 7.1.1. verwiesen, in dem der Unterschied anhand eines ausführlichen Evaluationsbeispiels ebenfalls

¹⁸⁰ Vgl. u.a. Albers et al. (2016), S. 543ff.; Albers et al. (2016), S. 543ff.; Page et al. (2005), S. 199ff.; Sargent (2010), S. 167ff.; Kleindorfer et al. (1998), S. 1088ff.; ASME (2006), S. 7f.; Oberkampf, Trucano (2002), S. 11ff.; Albers et al. (2016), S. 543ff.

¹⁸¹ Vgl. Page et al. (2005), S. 200; Oberkampf, Trucano (2002), S. 20f.; ASME (2006), S. 9

¹⁸² In Anlehnung an Albers et al. (2016), S. 543ff.; Oberkampf, Trucano (2002), S. 19f.

¹⁸³ Vgl. Oberkampf, Trucano (2002), S. 20.

verdeutlicht wird. Aufgabe ist es, den Federweg s einer Tellerfeder bei einer vorgegebenen Federkraft von $F = 7 \text{ kN}$ abzuschätzen, der für ein übergeordnetes System benötigt wird, siehe Abbildung 3-9.

Der Entwickler entscheidet sich hierbei für eine analytische Bestimmung des Federwegs und nimmt zunächst eine bei Tellerfedern typische, degressive Federsteifigkeit an, um den Zusammenhang zwischen Federkraft und Federweg zu beschreiben. Diese Annahme wird durch das Aufstellen einer mathematischen Gleichung formalisiert und an der gesuchten Stelle $F = 7 \text{ kN}$ interpretiert, wodurch der Entwickler einen Federweg von 3 mm erhält.

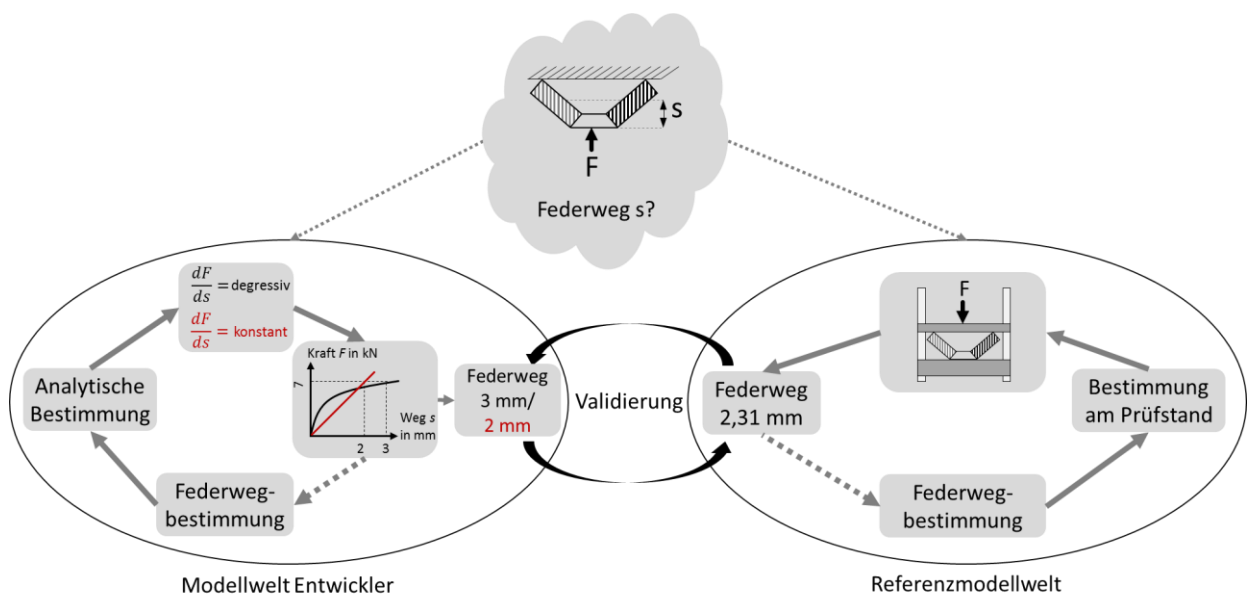


Abbildung 3-9: Validierung am Beispiel einer Schraubenfeder

Um diesen Wert zu validieren, wird in einer Referenzmodellwelt die Federwegbestimmung an einem Prüfstand vorgenommen und ein Federweg von $2,31 \text{ mm}$ gemessen. Durch einen Abgleich der beiden Werte kann, ausgehend von dem berechneten Wert, eine Abweichung von 23% festgestellt werden.

Anhand dieses Abgleichs im Rahmen einer Validierung kann der Entwickler zunächst noch kein Indiz erkennen, was die Ursache für die Abweichung ist.

Zur Minimierung der Abweichung muss der Entwickler im Rahmen einer Verifizierung seine getroffenen Annahmen überprüfen. Hierzu kann er eine Expertenbefragung durchführen und eine erneute Analyse der betrachteten Tellerfeder durchführen. Es wird davon ausgegangen, dass der Entwickler das Verhältnis von Höhe und Dicke der zugrundeliegenden Tellerfeder überprüft und anschließend deren Quotient Steifigkeitswerten vergleichbarer Tellerfedern gegenüberstellt. Hierbei lässt

sich feststellen, dass eine lineare Federkennlinie den Zusammenhang zwischen Kraft und Weg deutlich genauer beschreibt, wodurch der anfangs angenommene, degressive Zusammenhang im Produktmodell entsprechend angepasst wird, siehe rote Ergänzungen in Abbildung 3-9. Mit Hilfe des angepassten Produktmodells lässt sich ein Federweg von 2 mm berechnen. Wird dieser Wert erneut mit Hilfe des Prüfstandswerts validiert, lässt sich eine deutlich geringere Abweichung erkennen. Anhand des Beispiels wird der Zusammenhang zwischen den Tätigkeiten Validierung und Verifizierung nochmals verdeutlicht, da die Validierung bei einer nicht hinnehmbaren Abweichung eine Verifizierung auslöst, in dessen Rahmen eine Anpassung des Produktmodells vorgenommen wird. Dennoch können beide Tätigkeiten auch losgelöst voneinander durchgeführt werden, um das Modell abzusichern.

3.3 Unsicherheit bei der Verwendung von Produktmodellen

Im Folgenden wird das erarbeitete Verständnis von Unsicherheit aus Unterabschnitt 2.1.3 in der konsolidierten Beschreibung des Lebenszyklus eines Produktmodells verortet.

Während der ersten drei Entwicklungsprozesse trifft der Entwickler eine Vielzahl von aufeinander aufbauenden Annahmen, die das reale System schrittweise eingrenzen sowie einen Schwerpunkt auf einzelne Elemente des eingegrenzten Bereichs legen, siehe Abbildung 3-10.

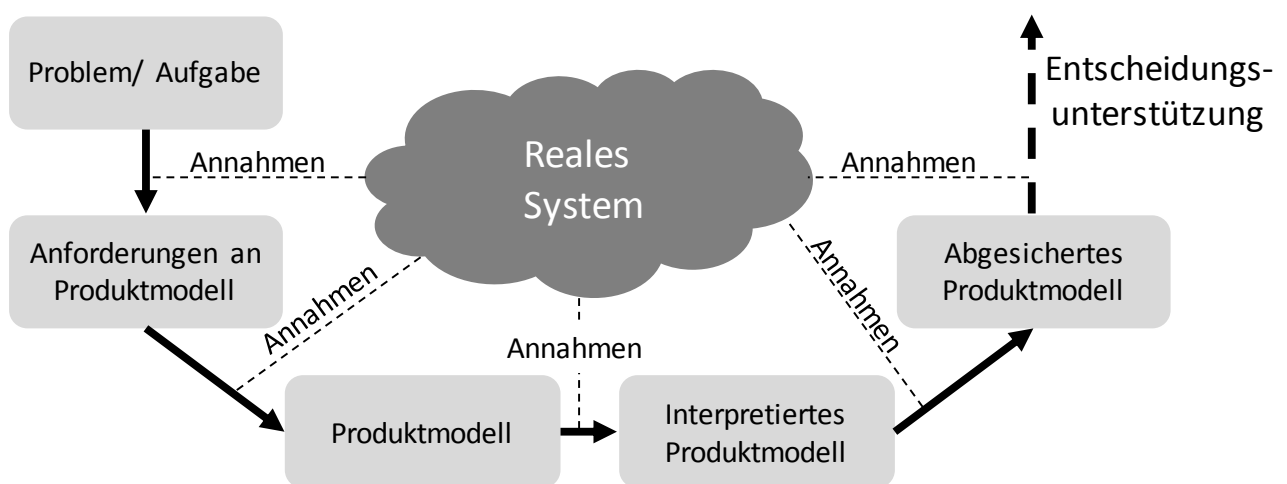


Abbildung 3-10: Treffen von Annahmen im Lebenszyklus eines Produktmodells¹⁸⁴

Beim Treffen einer Annahme verarbeitet der Entwickler Informationen, die ihm zur Verfügung stehen. Eine Annahme lässt sich somit wie folgt definieren:

¹⁸⁴ Vgl. Radhakrishnan, McAdams (2005), S. 379; Oberkampff et al. (2002), S. 337.

Eine Annahme beschreibt aus Sicht des Entwicklers eine Festlegung und / oder Generierung von als relevant erachteten Informationen, auf deren Basis der Entwickler ein Produktmodell erstellt.

Aufgrund einer unvollständigen, komplexen und sich ständig ändernden Informationslage besteht zwangsläufig die Gefahr, dass relevante Aspekte für eine Aufgabe unwissentlich vernachlässigt, fälschlicherweise als irrelevant angesehen oder nicht detailliert genug abgebildet werden. Durch die Verkettung summiert sich die Auswirkung von ungünstig getroffenen Annahmen und resultiert in einem Produktmodell mit hoher Unsicherheit. Somit kann festgehalten werden, dass während der ersten drei Entwicklungsprozesse Unsicherheit entsteht, von deren Ausprägung der Entwickler zunächst aber noch keine Kenntnis hat.

Erst durch eine Validierung der Ergebnisse des interpretierten Produktmodells mit einem Referenzwert lässt sich erkennen, mit welcher Ausprägung das Modell unsicherheitsbehaftet ist. Dies gilt sowohl für *Analysemodelle* als auch für deren rechnergestützte Umsetzung mit Hilfe von CAx Systemen, da in beiden Fällen ein Abgleich von Ergebnissen mit realen bzw. experimentellen Werten vorgenommen wird. Die Abweichung dieser beiden Werte stellt somit ein Maß dar, um die Wirkung von Unsicherheit zu beschreiben.

Durch die Validierung ist aber noch nicht bekannt, welche getroffene Annahme ursächlich für die vorliegende Unsicherheit im Modell ist. Es stellt sich somit die Frage, welche Annahme für den weiteren Verlauf der Untersuchung bestehen bleiben kann und welche angepasst werden muss. Dies kann der Entwickler im Rahmen einer Verifikation überprüfen.

Unsicherheit ist somit etwas, das in der Modellwelt des Entwickler ungewollt entsteht und erst durch den Abgleich mit einer Referenzmodellwelt beschreibbar gemacht werden kann. Um diesen Ursache-Wirkungszusammenhang von Unsicherheit zu verdeutlichen, wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit der Begriff Produktmodellierungsunsicherheit eingeführt:

Produktmodellierungsunsicherheit entsteht, wenn im jeweiligen Produktmodell beim Treffen von Annahmen nicht alle relevanten Einflüsse des betrachteten Systems für eine

gegebene Aufgabenstellung erfasst sind und während des Modellierungsprozesses zweckmäßig wiedergegeben werden.¹⁸⁵

Das Erkennen von Produktmodellierungsunsicherheit bei einer Validierung hingegen wird im Folgenden als Produktmodellunsicherheit bezeichnet und wie folgt definiert:

*Produktmodellunsicherheit liegt vor, wenn das Produktmodell das Realsystem unter Berücksichtigung der gegebenen Aufgabenstellung nicht ausreichend genau beschreibt.*¹⁸⁶

Bezugnehmend auf das Beispiel in Abschnitt 3.1 wird der Unterschied zwischen Produktmodell- und Produktmodellierungsunsicherheit erläutert, siehe Abbildung 3-11.

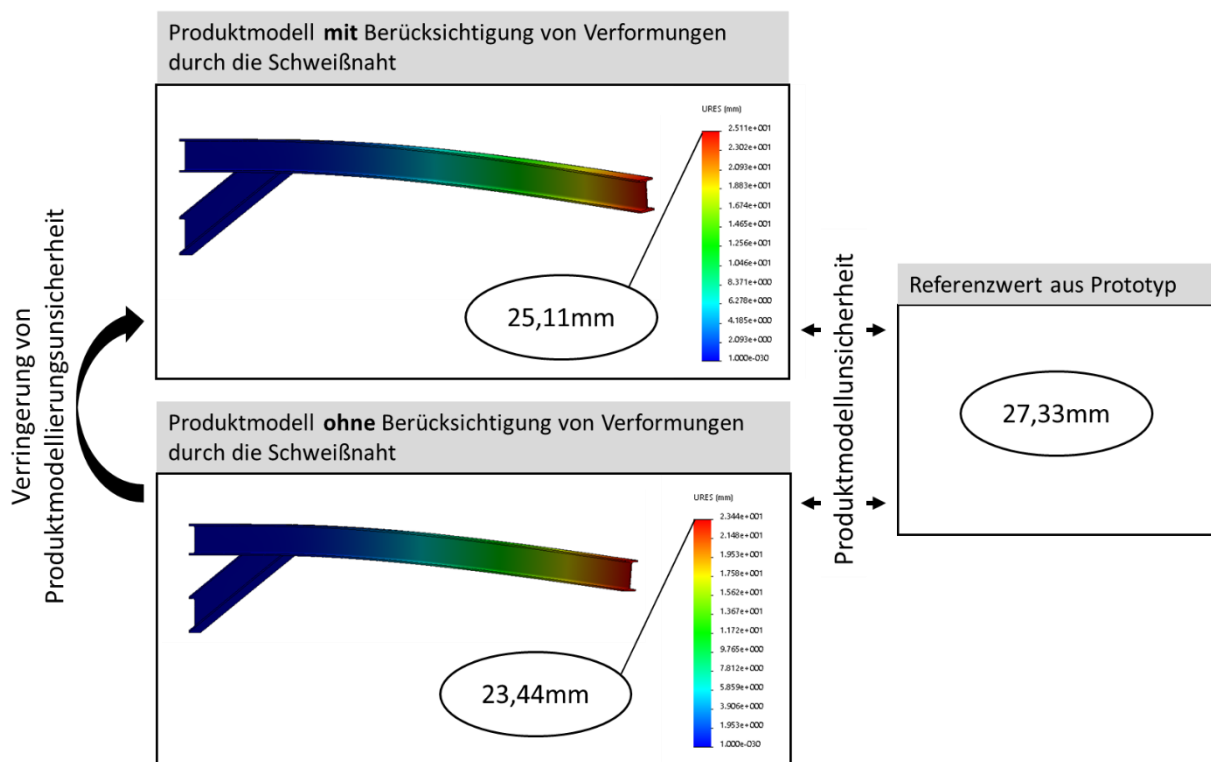


Abbildung 3-11: Unsicherheit am Beispiel der Entwicklung eines Auslegers

¹⁸⁵ In Anlehnung an Siu, Apostolakis (1985), S. 375; Knetsch (2006), S. 14.

¹⁸⁶ In Anlehnung an Hofer (1994), S. 3ff.; Knetsch (2006), S. 14.

Wird bei der Erstellung des *FE-Modells* zur Bestimmung der Absenkung fälschlicherweise davon ausgegangen, dass die Verformung zwischen Träger und Diagonalstrebe durch die Schweißnähte vernachlässigbar ist, lässt sich eine Absenkung von 23,44 mm berechnen. Wird dieser Einfluss durch eine Berücksichtigung der Verdrehung des Trägers von 5° in das *FE-Modell* integriert, ergibt sich eine Absenkung des Balkens von 25,11 mm. Zwischen dem Ausgangsmodell und dem angepassten Modell besteht *Produktmodellierungsunsicherheit*, da der relevante Effekt der Verdrehung nicht berücksichtigt wurde. Durch einen Vergleich der beiden Absenkungen lässt sich die *Produktmodellierungsunsicherheit* somit quantifizieren, durch eine prozentuale Abweichung beschreiben und durch eine entsprechende Berücksichtigung im Modell, wie oben gezeigt, auch verringern.

Vergleicht man hingegen die Ergebnisse der beiden FE-Modelle mit dem Referenzwert eines Prototyps des Auslegers, lässt sich *Produktmodellunsicherheit* erkennen, die anhand der prozentualen Abweichung zwischen Modellwert und Referenzwert quantifiziert werden kann.

4 Grundidee einer methodischen Unterstützung zur Beherrschung von Unsicherheit

Anhand der systematischen, schrittweise vorgenommenen Konsolidierung der Auffassungen, wie ein Produktentwicklungsprozess abläuft, wofür Produktmodelle gebraucht werden und wie sich der Lebenszyklus eines Produktmodells beschreiben lässt, ist eine Verortung des erarbeiteten Unsicherheitsverständnisses vorgenommen worden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Unsicherheit aufgrund der sich ständig verändernden Informationslage in den ersten drei Prozessen des Lebenszyklus zwangsläufig entsteht, im Rahmen einer Validierung erkannt, durch eine anschließende Verifikation beschreibbar gemacht wird und bei Bedarf durch Anpassung der Annahmen reduziert werden kann. Damit sind wesentliche Stell-schrauben dargelegt worden, auf deren Basis eine methodische Unterstützung abgeleitet wird. Unsicherheit lässt sich dadurch bei der Verwendung von Produktmodellen zwar nicht vermeiden, sie leistet aber einen wesentlichen Beitrag zu deren Beherrschung.

4.1 Defizite bestehender, methodischer Ansätze

In der Literatur existieren bereits methodische Ansätze zur Unterstützung des Entwicklers bei der Verwendung von Produktmodellen, die im Rahmen eines Modellabsicherungsprozesses angewendet werden. Diese lassen sich auf die in Abschnitt 2.4 erwähnten Ausprägungen von Analysemodellen inklusive derer Umsetzung in CAx-Systemen anwenden. Erwähnenswert sind die Richtlinien der American Society of Mechanical Engineers *ASME* und der American Institute of Aeronautics and Astronautics *AIAA*, die beide Verifikations- und Validierungsmethoden enthalten wie beispielsweise Konvergenztests, der Markov-Chain-Monte-Carlo-Methode, Einheitenbetrachtungen, Benchmarks zu bestehenden Lösungen, Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie oder auch System- bzw. Subsystemüberprüfungen¹⁸⁷. Alle Richtlinien beziehen sich ausschließlich auf den Übergang des konzeptionellen Modells in ein rechnergestütztes Modell bzw. auf einen Vergleich der Ergebnisse der Modellierung mit experimentellen Untersuchungen, siehe Abbildung 4-1.

¹⁸⁷ Vgl. u. a. ASME (2006), S. 10ff.; Oberkampff, Trucano (2002), S. 24ff.; Soize (2017), S. 17ff.

Mit Hilfe solcher Methoden können somit lediglich Annahmen zur Umsetzung des konzeptionellen Modells, welches im Rahmen dieser Arbeit einem Produktmodell entspricht, in eine rechnergestützte Form überprüft werden. Annahmen, die bei der Erstellung des konzeptionellen Modells getroffen werden, werden bisher kaum methodisch unterstützt, wodurch sich beispielsweise die festgelegte Systemgrenze bei der Modellierung nicht hinterfragen lässt.

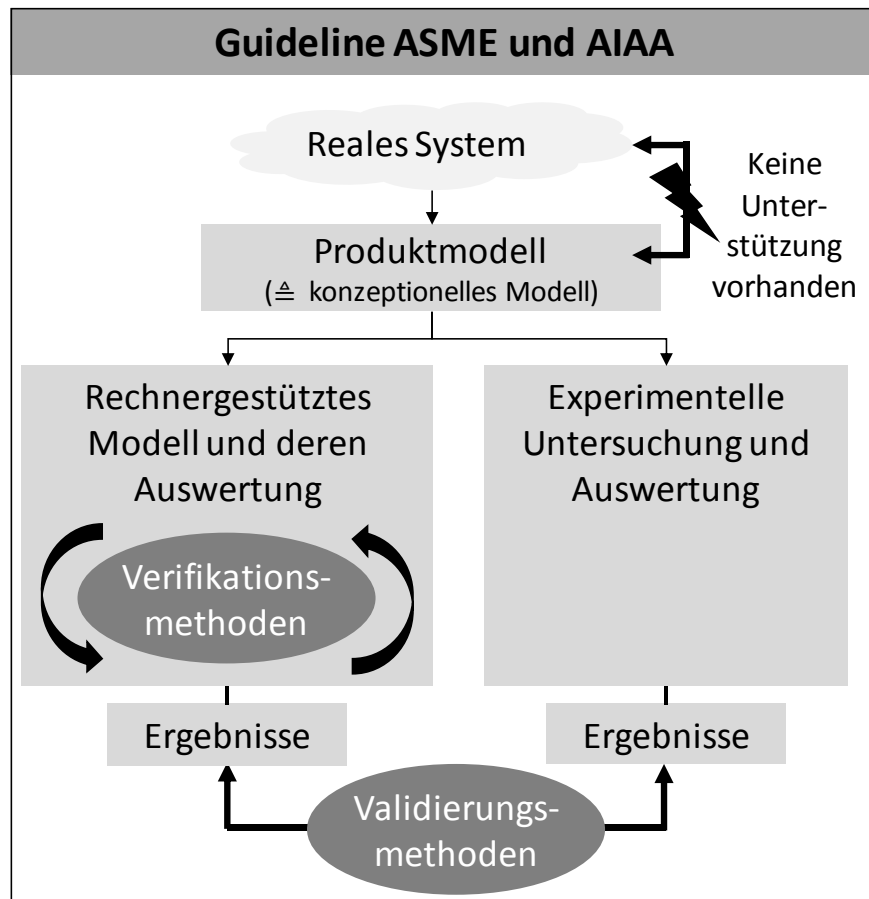


Abbildung 4-1: Verifikation und Validierung der ASME und der AIAA¹⁸⁸

Zur Unterstützung der Erstellung des konzeptionellen Modells schlagen PAGE und BALCI vor, mit Hilfe von Experteninterviews sowie Plausibilisierungsmethoden, wie Abhängigkeitsgraphen oder Ursache-Wirkungsdiagrammen, Annahmen des Produktmodells zu überprüfen.¹⁸⁹ ALBERS et al. hingegen empfehlen u. a. die Anwendung einer Failure Mode and Effects Analysis oder ein Design of Experiments.¹⁹⁰ Diese Methoden werden jedoch stets auf das Modellierungsergebnis angewendet.

¹⁸⁸ In Anlehnung an ASME (2006), S. 10ff.; Oberkampf, Trucano (2002), S. 24ff.

¹⁸⁹ Vgl. Page (1991), S. 149ff.; Balci (2007), S. 358ff.

¹⁹⁰ Vgl. Albers et al. (2016), S. 547ff.

Annahmen, die zu dem Modell führen, werden hingegen nicht explizit hinterfragt, wodurch Vorfixierungen des Entwicklers bei der eigentlichen Modellerstellung nicht berücksichtigt werden. Es wird somit nicht geprüft, ob im Modell relevante Informationen fehlen bzw. ob diese ausreichend detailliert abgebildet werden, was laut Definition zu Produktmodellierungsunsicherheit führt, vergleiche Abschnitt 3.3.

Somit lässt sich feststellen, dass insbesondere die methodische Unterstützung zur Erstellung eines konzeptionellen Modells bzw. eines Produktmodells sehr begrenzt ist, hierbei wird hauptsächlich auf die Erfahrung und Intuition des Entwicklers vertraut¹⁹¹. Dies gilt neben der Erstellung von klassischen Analysemodellen auch für deren Umsetzung in CAx-Systemen, da auch hier vor der rechnergestützten Umsetzung ein konzeptionelles Modell erstellt wird. Gleichzeitig werden gerade in dieser Phase viele Annahmen mit hoher Tragweite für die Analyse¹⁹² getroffen, was einen großen Einfluss auf die sich einstellende Produktmodellierungsunsicherheit hat, vergleiche Abbildung 3-10. Die Defizite bestehender, methodischer Ansätze beziehen sich somit auf eine mangelnde Anwendbarkeit in den frühen Phasen des Lebenszyklus eines Produktmodells.

4.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den Entwickler aufgrund des erkannten Defizits beim Treffen von Annahmen bei der Erstellung eines Produktmodells zur Beherrschung von Unsicherheit zu unterstützen. Hierzu soll eine Methodik entwickelt werden, um die Vorteile eines regelbasierten Vorgehens nutzen zu können und somit ein definiertes Ergebnis zu erzielen, das auf die Prozesse der Modellerstellung abgestimmt ist, vergleiche Unterabschnitt 2.2.6.

Mit Hilfe der Methodik soll der Entwickler unterstützt werden, die von ihm als relevant erachteten Informationen für eine Aufgabenstellung gezielt zu überprüfen und gegebenenfalls zu vervollständigen. Er wird somit dahingehend sensibilisiert, welche Informationen zur Erstellung eines Produktmodells im Rahmen einer Analyse tatsächlich relevant sind. Die Methodik selbst wird im Rahmen einer Verifikationstätigkeit bei erkannter Produktmodellunsicherheit angewendet. Um die bestehende Produktmodellierungsunsicherheit reduzieren zu können, wird zunächst

¹⁹¹ Vgl. u. a. Radhakrishnan, McAdams (2005), S. 386; Page et al. (2005), S. 212ff.

¹⁹² Vgl. u. a. Nance (1988), S. 577; Radhakrishnan, McAdams (2005), S. 380ff.

eine gezielte Vervollständigung von relevanten Informationen vorgenommen, um darauf aufbauend ggf. Vorfixierungen erkennen zu können sowie getroffene Annahmen zu hinterfragen und bei Bedarf anzupassen. Dadurch wird ein Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen geleistet. Der Aufbau der Methodik basiert auf dem Kerngedanken des Modells der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung aus Unterabschnitt 2.3.2, siehe Abbildung 4-2.

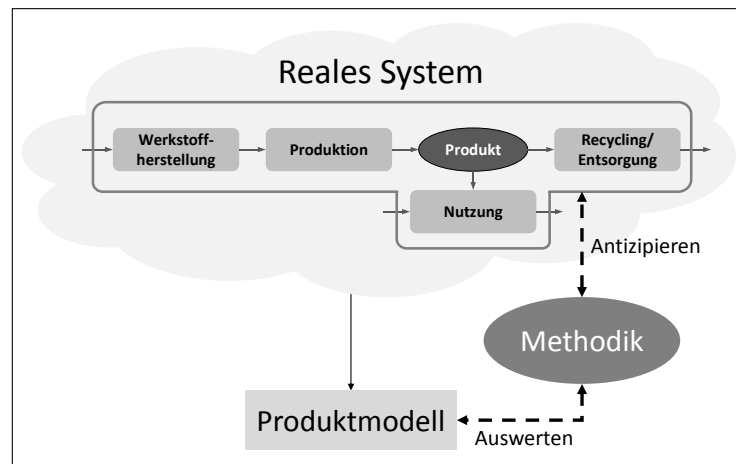


Abbildung 4-2: Kerngedanke der methodischen Unterstützung

Dieser eignet sich besonders gut zu der getroffenen Fokussierung der Untersuchung auf Analysemodelle, da hier zur Abschätzung einer Eigenschaft stets Merkmale und Umwelteinflüsse betrachtet werden und somit ebenfalls eine kombinierte Betrachtung einer Produkt- und Prozesssicht notwendig ist. Im Rahmen der Methodik werden relevante Lebenslaufprozesse für eine Analyseaufgabe antizipiert und im Hinblick auf Relevanz für das Produktmodell ausgewertet.

4.3 Forschungsansatz

Basierend auf den Erkenntnissen des Verständnisses von Unsicherheit bei der Verwendung von Produktmodellen aus Kapitel 3 lassen sich aus der Zielsetzung die folgenden Forschungsfragen ableiten:

Forschungsfrage 1: Welche Annahmen trifft der Entwickler bei der Erstellung eines Produktmodells?

Forschungsfrage 2: *Wie kann der Entwickler bei der Identifikation von relevanten Informationen unterstützt werden, um damit getroffene Annahmen eines Produktmodells verifizieren zu können?*

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird auf dem konsolidierten Verständnis des Produktentwicklungsprozesses aus Kapitel 2 und des Lebenszyklus eines Produktmodells aus Kapitel 3 mit vorgenommener Fokussierung auf Analysemodelle aufgebaut und in Kapitel 5 der Modellerstellungsprozess mit Hilfe von vier Subprozessen detailliert. Damit lassen sich die zu treffenden Annahmen und somit auch die zu verarbeitenden Informationen identifizieren und systematisieren, siehe Abbildung 4-3.

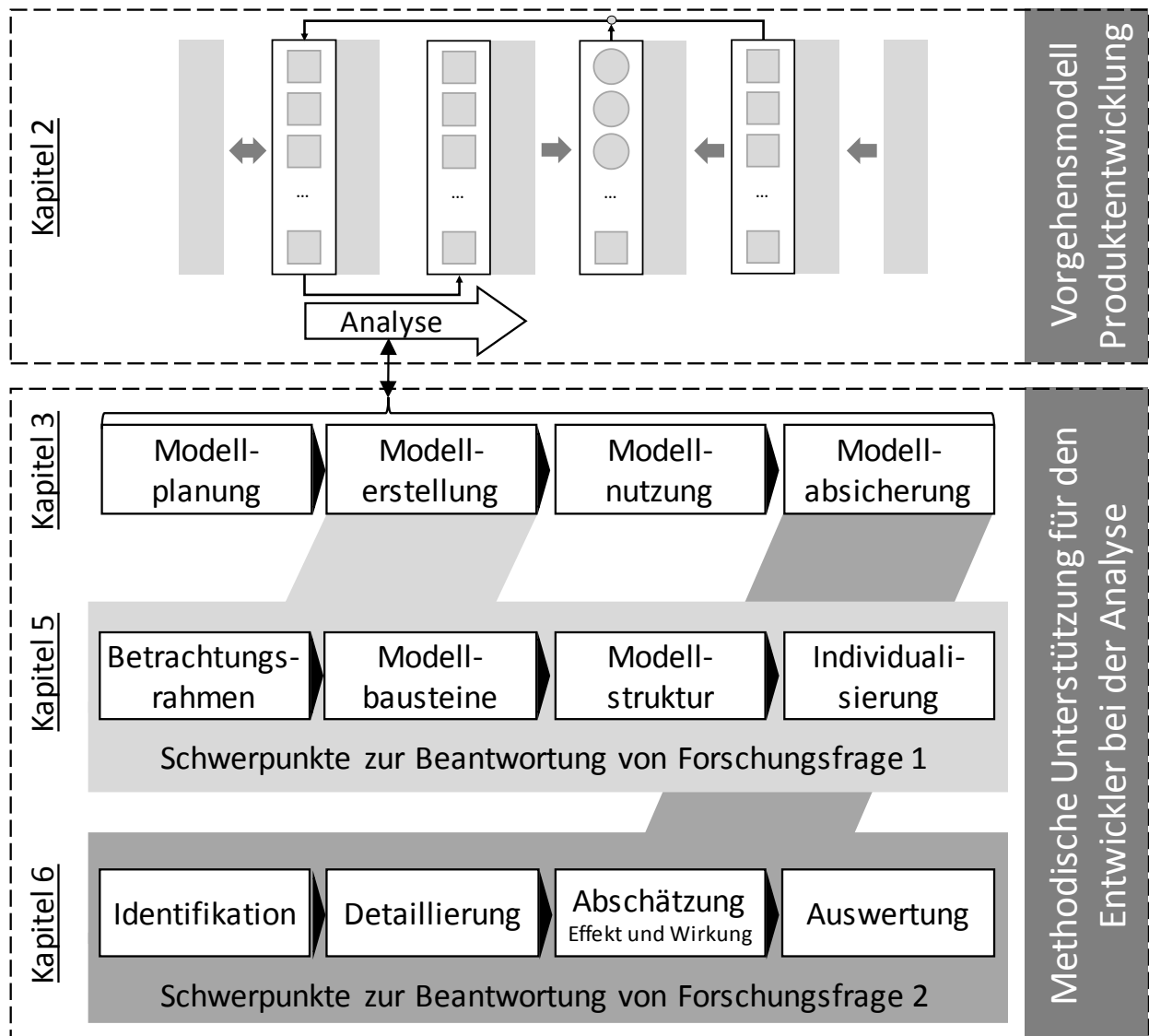


Abbildung 4-3: Vorgehen zum Entwickeln einer methodischen Unterstützung

Anschließend werden die Erkenntnisse der Detaillierung zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage genutzt, um im Rahmen eines Modellabsicherungsprozesses in Kapitel 6 eine vierstufige Methodik zu entwickeln, die ein schrittweises Antizipieren und Auswerten von Lebenslaufprozessen ermöglicht. Dadurch wird somit eine aufeinander abgestimmte Detaillierung der Lebenszyklusphasen *Modellerstellung* und *Modellabsicherung* vorgenommen, womit erklärt wird, was der Entwickler macht und wie ihm dabei zur Beherrschung von Unsicherheit geholfen werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann in Kapitel 7 an Beispielen angewendet.

5 Detaillierung des Modellerstellungsprozesses

In diesem Kapitel wird auf Basis von bestehenden Ansätzen eine konsolidierte Vorstellung erarbeitet, wie ein Modellerstellungsprozess abläuft. Ziel ist es, zentrale zu treffende Annahmen herauszuarbeiten, die zu einem Produktmodell führen. Dies stellt eine notwendige Vorarbeit dar, um in Abschnitt 6.2 eine methodische Unterstützung zu entwickeln. Die gewonnenen Erkenntnisse der Detaillierung des Modellerstellungsprozesses werden anschließend in Abschnitt 5.3 anhand des Zündschlossbeispiels aus Unterabschnitt 1.1.1 verdeutlicht.

5.1 Grundlegende Aspekte zur Detaillierung

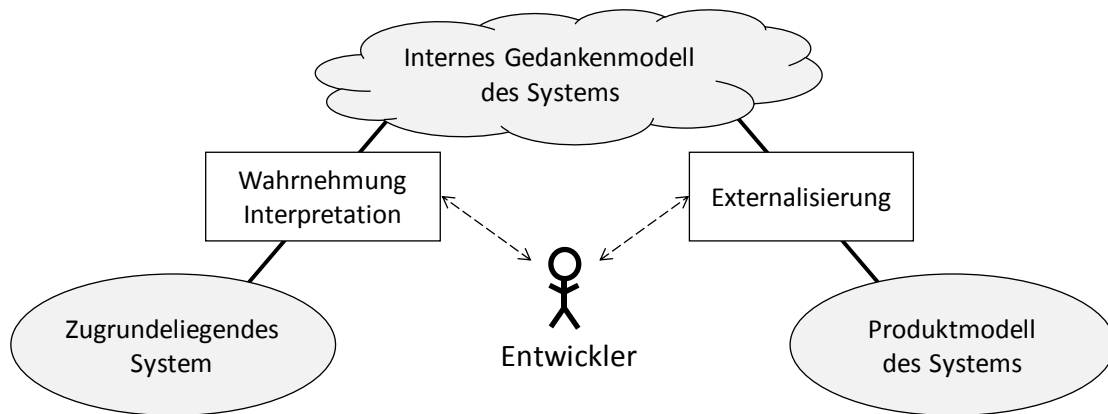
An dieser Stelle wird zunächst auf die Externalisierung von Gedanken des Entwicklers eingegangen. Anschließend werden bestehende Ansätze zur Detaillierung vorgestellt, auf deren Basis unter Berücksichtigung des konsolidierten Verständnisses der Produktentwicklung aus Unterabschnitt 3.2.2 ein eigener Ansatz entwickelt wird.

5.1.1 Externalisierungsprozess des Entwicklers

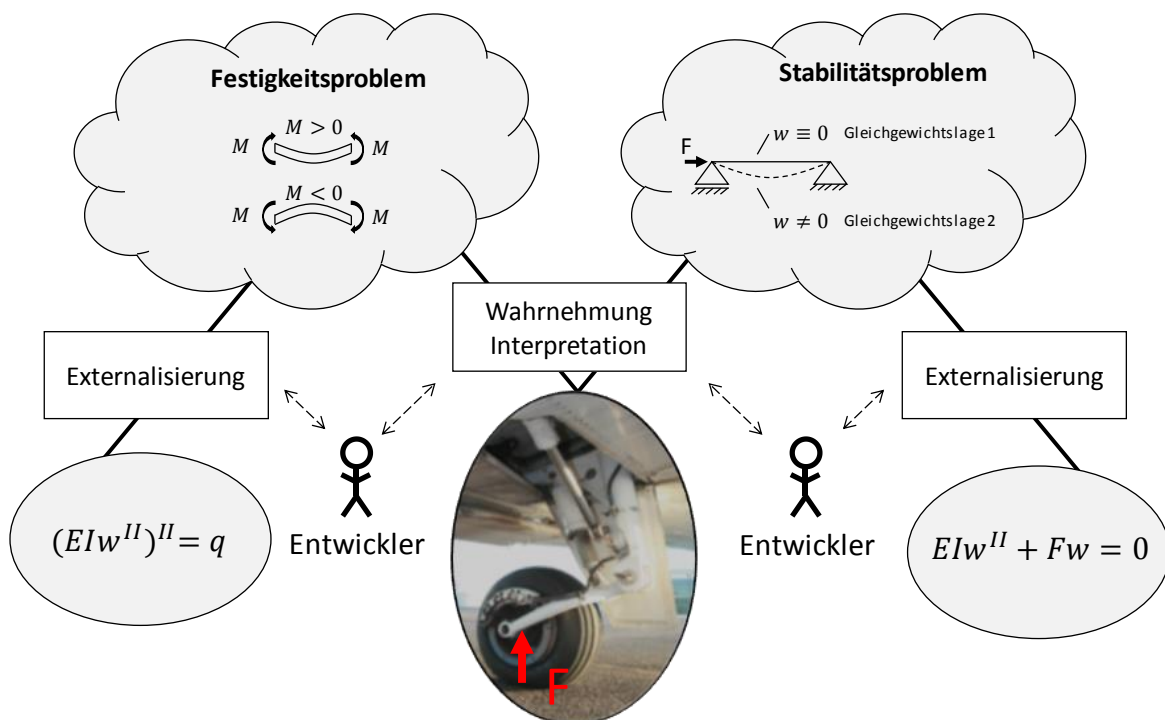
Zu Beginn des Lebenszyklus eines Produktmodells liegt ein Problem oder eine Aufgabe vor, auf deren Basis der Entwickler das zu untersuchende System zunächst wahrnimmt und interpretiert¹⁹³. Hierbei entstehen im Kopf des Entwicklers erste Ideen oder Vermutungen, die zur Lösung der Aufgabe oder des Problems beitragen. Alle Ideen und Wahrnehmungen werden zu einem internen Gedankenmodell zusammengefasst, das eine aufgabenspezifische Wahrnehmung und Interpretation des Entwicklers vom zugrundeliegenden System darstellt und alle von ihm als relevant erachteten Informationen enthält, siehe Abbildung 5-1.

Das Gedankenmodell weist in der Regel noch keinen bzw. einen nur gering ausgeprägten Formalismus auf, es dient vielmehr der Sammlung aller Gedanken. Basierend auf dem internen Gedankenmodell durchläuft der Entwickler den Lebenszyklus eines Produktmodells und externalisiert seine Gedanken. Während der Externalisierung werden die Gedanken des Entwicklers formalisiert und somit greifbar für seine Umwelt gemacht. Das Verständnis dieses Externalisierungsprozesses stellt die notwendige Grundlage für die Detaillierung des Modellerstellungsprozesses dar.

¹⁹³ Vgl. Falkenberg et al. (1998), S. 55.

Abbildung 5-1: Externalisierungsprozess des Entwicklers¹⁹⁴

Am Beispiel eines Flugzeugfahrwerks und der Aufgabe, dessen Verhalten beim Aufsetzen auf die Landebahn abzuschätzen, wird der Übergang eines Gedankenmodells in ein formalisiertes Produktmodell verdeutlicht, siehe Abbildung 5-2.

Abbildung 5-2: Externalisierungsprozess am Beispiel eines Fahrwerks¹⁹⁵

Der Entwickler beginnt mit der Wahrnehmung des Systems *Fahrwerk* und interpretiert es. Hierbei legt er zum Beispiel fest, ob das System unter Berücksichtigung der

¹⁹⁴ In Anlehnung an Kohn (2014), S. 33; Falkenberg et al. (1998), S. 55ff.; Bauert (1991), S. 13f.

¹⁹⁵ Fahrwerksbild entnommen aus YSSYguy (2014).

zugrundeliegenden Fragestellung als allgemeines Festigkeitsproblem oder als Stabilitätsproblem aufgefasst wird. Er fasst die identischen Streben des Fahrwerks je nach Interpretation beispielsweise als Biegebalken oder als Knickstäbe auf. Darauf aufbauend leiten sich für den Entwickler die Fragestellungen der Bestimmung der maximalen Durchbiegung der Balken bzw. der kritischen Knicklast der Stäbe ab. Anschließend findet die eigentliche Externalisierung statt, deren Ergebnisse unterschiedliche Produktmodelle sind. Zielt der Entwickler auf eine analytische Beschreibung des Systems ab, liegen nach Vollendung des Externalisierungsprozesses beispielsweise die formalisierten Produktmodelle der *allgemeinen Differentialgleichung der Biegelinie* oder deren Sonderfall der *Knickgleichung* vor.

5.1.2 Übersicht bestehender Ansätze zur Detaillierung

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze, die die Externalisierung des internen Gedankenmodells eines Entwicklers im Rahmen des Modellerstellungsprozesses beschreiben und dokumentieren.

NANCE beispielsweise unterscheidet zwischen zwei Sub-Prozessen. Im *Umweltmodellierungsprozess* wird, basierend auf den festgelegten Anforderungen, zunächst die Umwelt des Systems betrachtet¹⁹⁶, siehe Abbildung 5-3.

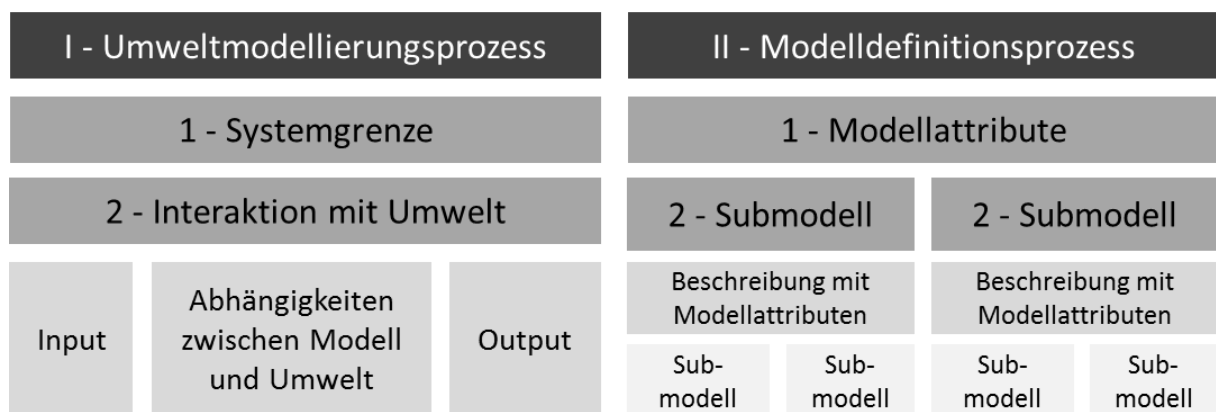


Abbildung 5-3: Modellerstellungsprozess nach NANCE¹⁹⁷

Es wird eine Systemgrenze festgelegt und darauf aufbauend die Interaktion mit der abgegrenzten Umwelt untersucht. Hierbei werden relevante Inputs und erwartete Outputs festgelegt sowie potentielle Beeinflussungen zwischen Umwelt und dem zu erstellenden Modell mittels Annahmen festgehalten. Anschließend erfolgt im

¹⁹⁶ Vgl. Nance (1988), S. 7.

¹⁹⁷ In Anlehnung an Nance (1988), S. 7.

Modelldefinitionsprozess zunächst das Festlegen der Modellattribute. Diese entsprechen der Darstellungsform, die vorgibt, in welcher Art und Weise das System im Modell abgebildet wird. Unterschieden werden hierbei beispielsweise zwischen graphisch 2-dimensionalen, 3-dimensionalen oder auch semantischen Abbildungsformen¹⁹⁸. Bei der Verwendung von CAx-Systemen hingegen lässt sich eine Unterscheidung in MKS, FEM oder CFD Abbildungen finden.

Darauf aufbauend findet die Modellerstellung statt. Zunächst werden Submodelle festgelegt und jeweils als Black-Box dargestellt. So wird beispielsweise bei der Erstellung eines MKS-Modells festgelegt, welche Bauteile sowie Kopplungen des betrachteten Systems an der zu untersuchenden Bewegungsanalyse beteiligt sind, die anschließend mit Hilfe von Submodellen abgebildet werden.

Im Sinne eines Top-Down Ansatzes werden dann die Submodelle unter Berücksichtigung der Modellattribute schrittweise detailliert und gegebenenfalls in weitere Submodelle untergliedert. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass das gesamte Modell einen zur Lösung der Aufgabe angemessenen Detaillierungsgrad besitzt. In Bezug auf das MKS-Modellbeispiel erfolgt in der Detaillierung der Submodelle eine Verknüpfung mit Geometriedaten eines CAD-Modells.

Eine Gliederung der Modellerstellung in zwei übergeordnete Prozesse verfolgt auch NEGELE. Der Entwickler führt zunächst einen *Strukturierungsprozess* durch, in dem er das reale System untersucht, siehe Abbildung 5-4.

Ziel ist es, unter Berücksichtigung der gestellten Modellanforderungen das System mit Hilfe möglichst weniger Strukturierungskomponenten so aufzubereiten, damit die relevanten, komplexen Zusammenhänge eindeutig dargestellt werden können¹⁹⁹. Dadurch werden gleichzeitig alle Elemente des Systems, die im Modell abgebildet werden sollen, identifiziert und formalisiert. NEGELE sieht im Rahmen der Strukturierung vor, das System durch eine Systemgrenze von seiner Umwelt abzugrenzen. Innerhalb der Systemgrenze werden relevante Elemente festgelegt, die mit Hilfe von Attributen wie Eigenschaften, Funktionen, Inputs und Outputs beschrieben werden. Abschließend werden Relationen festgelegt, die zwischen den festgelegten Elementen sowie zwischen Elementen und der Umwelt bestehen. Im Rahmen der Strukturierung werden alle relevanten Informationen des Systems für die gestellte Aufgabe gefiltert und formalisiert abgebildet. NEGELE sieht diese

¹⁹⁸ Vgl. Stachowiak (1973), S. 122.

¹⁹⁹ Vgl. Negele (2006), S. 64.

zweckmäßige Aufbereitung von Informationen als notwendige Vorbereitung für die anschließende Modellerstellung an, um das betrachtete System möglichst exakt und widerspruchsfrei erfassen zu können²⁰⁰.

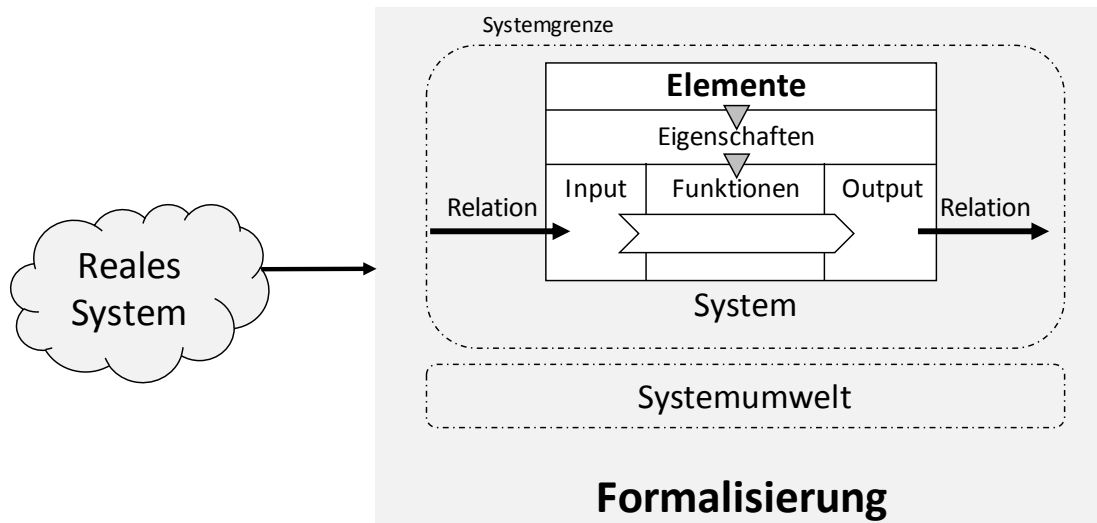


Abbildung 5-4: Formalisierung des Systems nach NEGELE²⁰¹

Im Anschluss erfolgt die *Modellerstellung*, die sich in drei Sub-Prozesse gliedert, siehe Abbildung 5-5. Im ersten Schritt werden generische Grundkonstrukte festgelegt. Sie stellen die formale Sprache des Produktmodells dar und geben somit Regeln vor, nach denen sie auf ein Problem angewendet und untereinander verbunden werden können²⁰². Hierbei gilt es stets zu überprüfen, dass alle erkannten Abhängigkeiten der Elemente aus dem Strukturierungsprozess prinzipiell abbildbar sind.

Anschließend werden auf der partiellen Modellebene unter Anwendung der generischen Grundkonstrukte die in der Strukturierung festgelegten, relevanten Elemente und Abhängigkeiten des Systems in die Sprache des Produktmodells übersetzt, wodurch eine Modellstruktur entsteht.

Im letzten Schritt wird die Modellstruktur unter Berücksichtigung der Modellanforderungen wie beispielsweise durch die Berücksichtigung von lösungsbezogenen Randbedingungen oder Startwerten bzw. dem Festlegen der Ausprägung von Massen oder Steifigkeiten zum Produktmodell individualisiert.

²⁰⁰ Vgl. Negele (2006), S. 64ff.; Walther (1994), S. 51.

²⁰¹ In Anlehnung an Negele (2006), S. 77.

²⁰² Vgl. Negele (2006), S. 60.

Anhand der Unterteilung der Modellerstellung in drei Sub-Prozesse mit zugehöriger generischer, partieller und individueller Ebene ist eine aufgabenabhängige Spezialisierung der Grundkonstrukte erkennbar.²⁰³ Hierdurch lassen sich die bei der Modellerstellung getroffenen Annahmen besser nachvollziehen und bei gegebenenfalls notwendigen Iterationsschleifen auch anpassen. Weiterhin können entwickelte Modellstrukturen beispielsweise durch Anpassung der Individualisierung auch auf andere Probleme übertragen werden²⁰⁴. Die Idee der schrittweisen Spezialisierung von Grundkonstrukten wird in Abschnitt 5.2 wieder aufgegriffen und anhand eines Beispiels in Abschnitt 5.3 erläutert.

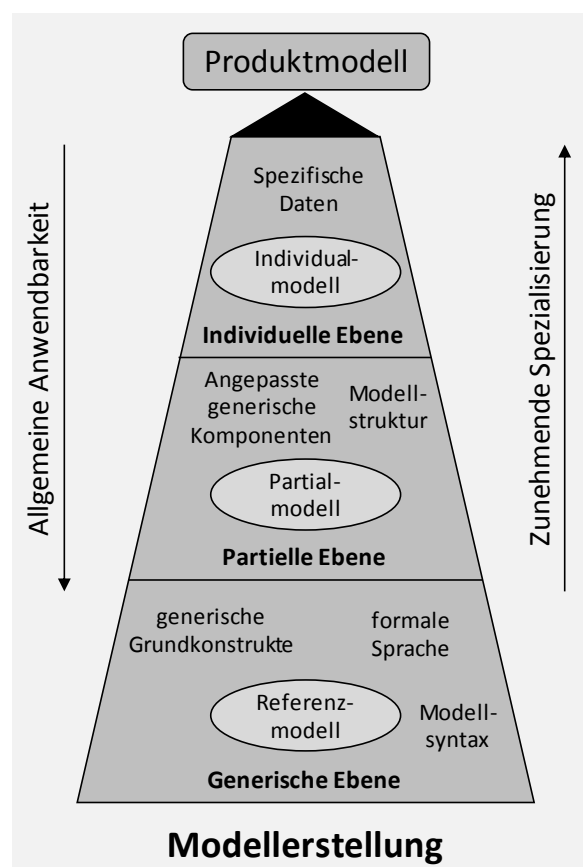


Abbildung 5-5: Stufenweises Vorgehen bei der Modellerstellung nach NEGELE²⁰⁵

²⁰³ Vgl. Negele (2006), S. 60.

²⁰⁴ Vgl. Negele (2006), S. 62.

²⁰⁵ In Anlehnung an Negele (2006), S. 77

5.2 Ansatz zur detaillierten Beschreibung des Modellerstellungsprozesses

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse bestehender Ansätze wird der Modellerstellungsprozess in die Sub-Prozesse *Festlegen Betrachtungsrahmen*, *Festlegen Modellbaukasten*, *Festlegen Modellstruktur* und *Individualisierung* detailliert²⁰⁶, die im Folgenden erläutert und anhand eines begleitenden Beispiels verdeutlicht werden, siehe Abbildung 5-6. Das Ziel der Detaillierung besteht darin, auf dem bestehenden Modellverständnis aus Kapitel 2 aufzubauen und die im Rahmen der Externalisierung zu treffende Annahmen explizit hervorzuheben.

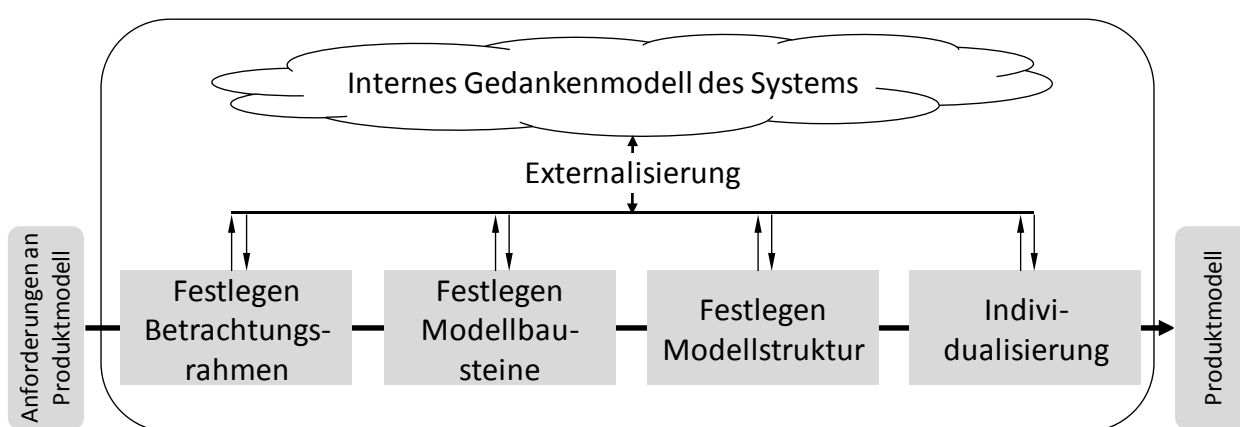


Abbildung 5-6: Detaillierung des Modellerstellungsprozesses

5.2.1 Festlegen des Betrachtungsrahmens

Im Zuge der Festlegung des Betrachtungsrahmens grenzt der Entwickler das zu untersuchende, technische System mit Hilfe seines internen Gedankenmodells ein, siehe Abbildung 5-7.

Basierend auf dem Systemverständnis aus Unterabschnitt 2.2.3 legt er hierbei fest, welche Merkmale des Produkts und welche Umwelteinflüsse aus Prozessen des Systems zur Analyse der jeweiligen Eigenschaft relevant sind. Hierdurch wird in diesem Sub-Prozess eine Systemgrenze festgelegt, dessen Ergebnis ein abgegrenztes Produkt ist.

Die getroffene Unterteilung der abzubildenden Elemente des Systems in Merkmale und Umwelteinflüsse hat den Vorteil, dass sie der Forderung nach einer einfachen

²⁰⁶ Vgl. Würtenberger et al. (2015), S. 92ff.

und übersichtlichen Darstellungsweise nachkommt, um damit auch komplexe Zusammenhänge untersuchen zu können, vergleiche hierzu Unterabschnitt 5.1.2. Bestehende Abhängigkeiten der Elemente können durch das Eintragen von Verbindungspfeilen kenntlich gemacht und bei Bedarf auch beliebig erweitert werden, die beispielsweise für die Erstellung eines MKS-Modells bei der Festlegung von Freiheitsgraden eine notwendige Voraussetzung sind.

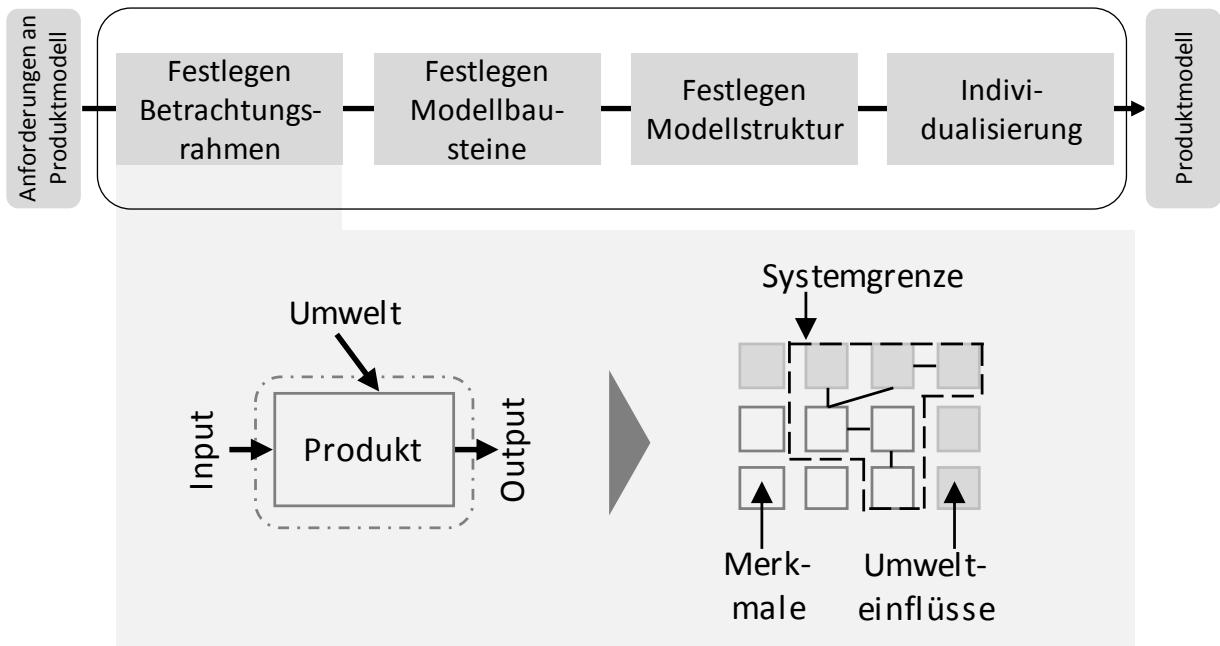


Abbildung 5-7: Festlegen des Betrachtungsrahmens

Das Festlegen eines Betrachtungsrahmens wird im Folgenden am Beispiel der Analyse des Fahrkomforts eines Kraftfahrzeugs verdeutlicht, siehe Abbildung 5-8.

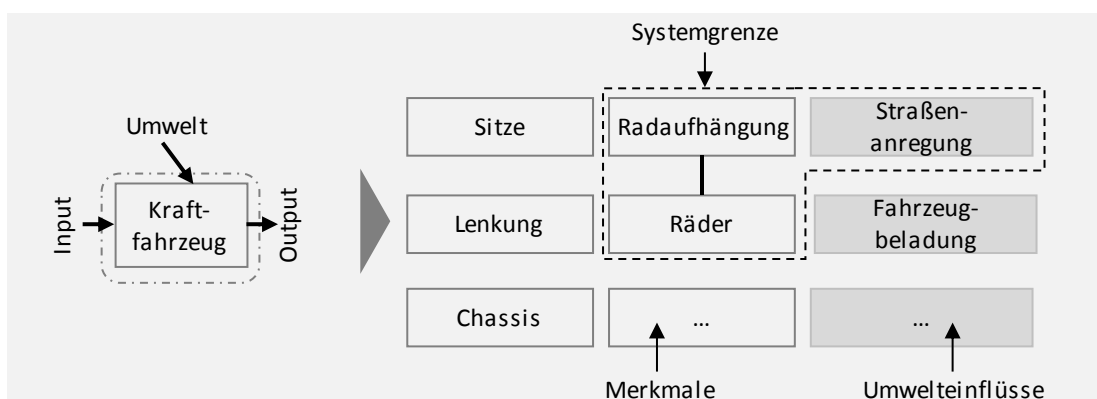


Abbildung 5-8: Betrachtungsrahmen zur Analyse des Fahrkomforts

Der Entwickler muss entscheiden, auf welche Bestandteile des Kraftfahrzeugs er sich zunächst konzentriert. Neben Aspekten wie den Fahrersitzen oder der Lenkung hat das Schwingungsverhalten des Fahrzeugs bei Straßenanregungen einen großen Einfluss auf den Fahrkomfort. U. a. durch eine geschickte Auslegung der kinematischen Struktur der Radaufhängung kann hierauf gezielt Einfluss genommen werden²⁰⁷, weshalb dieser Aspekt im Folgenden weiter thematisiert wird. Neben der Radaufhängung werden daher das Rad selbst sowie Straßenanregungen als Umwelteinfluss zur weiteren Untersuchung mit in den Betrachtungsrahmen aufgenommen, wodurch die Systemgrenze festgelegt worden ist.

5.2.2 Festlegen von Modellbausteinen

Im nächsten Sub-Prozess wählt der Entwickler Modellbausteine aus, bei denen es sich um bestehende Modellvorstellungen mit entsprechenden Annahmen handelt, die Erkenntnisse zur Beschreibung von Phänomenen aus der Natur oder Technik beinhalten²⁰⁸, siehe Abbildung 5-9.

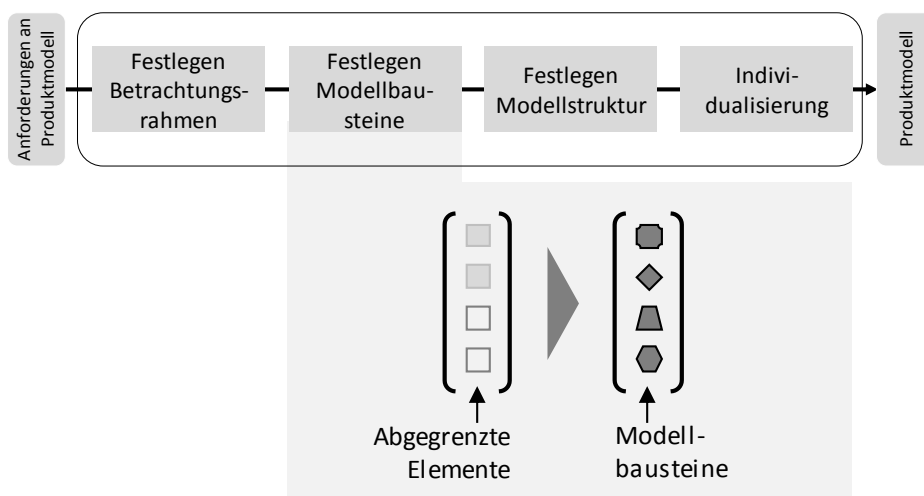


Abbildung 5-9: Festlegen von Modellbausteinen

Sie entsprechen dem Verständnis eines Submodells nach NANCE, können als generisch angesehen werden und lassen sich zur Untersuchung einer Eigenschaft des Produkts verwenden. In der Literatur existieren eine Vielzahl von Modellbausteinen, die sich anhand von Fragestellungen einzelner Fachdisziplinen des Maschinenbaus²⁰⁹ sowie anhand der abbildbaren Einflüsse gliedern lassen.

²⁰⁷ Vgl. Schramm et al. (2013), S. 101ff.

²⁰⁸ Vgl. Schubert (1984), S. IX.

²⁰⁹ Zur Auswahl von Modellbausteinen bietet u. a. Grote, Feldhusen (2014) umfassende Übersicht.

So wird zum Beispiel bei der Erstellung eines MKS-Modells im Rahmen eines CAx-Systems zwischen *kinematischen* und *dynamischen* Analysen unterschieden, die sich wiederum aufteilen in Betrachtungen zur *Statik* und zur *Kinetik*. Hierzu wird u. a. der Modellbaustein *Freikörperbild* verwendet, mit der zunächst Freiheitsgrade und Bewegungsrichtungen des betrachteten Systems untersucht werden, um es anschließend in ein MKS-Modell überführen zu können, siehe Abbildung 2-19.

Im Bereich der Mechanik hingegen ist eine Gliederung in statische und dynamische Modellbausteine sinnvoll, die mit Hilfe mathematischer Gleichungen beschrieben werden. Im Bereich der Statik unterscheidet man u. a. zwischen Fragestellungen bezüglich der *Balkenbiegung*, der *Torsionsbeanspruchung* von Bauteilen und der *Knickung* druckbelasteter Stäbe und Balken, siehe Abbildung 5-10.

Frage	Modellbaustein	Annahmen
Balkenbiegung	Biegelinie nach Bernoulli: $EIw'' = M$ w = Absenkung Balken M = Moment EI = Biegesteifigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Keine Winkeländerungen durch Querkraft - schubstarrer Balken Balkenlänge \gg Querschnitt Kleine Verformungen Keine Verwölbung Eindim. Spannungszustand ...
	Biegelinie nach Timoshenko: $EI(w'' - \gamma') = M$ γ = Verdrehung Querschnitt	<ul style="list-style-type: none"> Identische Annahmen wie bei Biegelinie nach Bernoulli Annahme schubstarrer Balken wird aufgehoben ...
Torsion	Dünnwandiger, geschlossener Querschnitt: $\tau(s) = \frac{M_T}{2A_m z(s)}$ τ = Schubspannung A_m = umschlossene Fläche z = Wanddicke	<ul style="list-style-type: none"> Konstante Schubspannungsverteilung über Wanddicke Querschnittsgestalt bleibt bei Verformung erhalten ...
Knickung	Knickgleichung elast. Stäbe: $(EIw'') + Fw = 0$ F = Kraft	<ul style="list-style-type: none"> Keine Winkeländerungen durch Querkraft Vorkrümmung nicht betrachtet ...

Abbildung 5-10: Beispielhafte Modellbausteine aus der Statik²¹⁰

²¹⁰ Vgl. Gross et al. (2014), S. 89ff.

Reicht eine quasi-statische Betrachtung des zu untersuchenden Systems nicht aus, können die Modellbausteine um eine dynamische Betrachtung erweitert oder durch geeignetere Bausteine ausgetauscht werden. So kann bei einer Betrachtung von Schwingungen am Balken der Baustein $(EI(x)w''(x,t))'' + b\dot{w}(x,t) + m\ddot{w}(x,t) = q(x,t)$ verwendet werden, der eine Massenverteilung m und Strukturdämpfung b in Abhängigkeit von der Zeit betrachtet und eine Erweiterung des Bausteins *Balkenbiegung* unter einem dynamischen Aspekt darstellt.

Die Dynamik hingegen differenziert beispielsweise zwischen Fragestellungen nach der Bewegung eines starren Körpers, das Verhalten schwingungsfähiger Systeme oder der Relativbewegung von Massepunkten. Auch hier lassen sich analog zu Modellbausteinen der Statik Fragestellungen in Bezug auf eine Erweiterung des Gültigkeitsbereichs der zugehörigen Bausteine ableiten.

Ziel ist es, für alle abgegrenzten Elemente des Systems passende Bausteine zu finden und festzulegen, in welcher Form diese miteinander verknüpft werden. So wird beispielsweise zur Analyse des Crashverhaltens eines Fahrzeugs u. a. ein Modellbaustein zur Abbildung der geometrischen Verformung in Kombination mit einem Baustein zur Berücksichtigung des elastisch-plastischen Materialverhaltens benötigt. Neben der Auswahl und Überprüfung einzelner Modellbausteine gilt es weiterhin zu untersuchen, ob zur Darstellung eines Elements mehrere Bausteine notwendig sind.

Liegt beispielsweise an einem *Biegebalken* eine exzentrische Last F vor, wird der Balken sowohl auf Biegung als auch auf Torsion beansprucht. Für beide Aspekte muss der Entwickler je einen Modellbaustein zur Untersuchung definieren. Alternativ dazu lassen sich mit Hilfe des Modellbausteins *Arbeitssatz* auch beide Belastungen in einer Gleichung untersuchen.

Ergebnis dieses Sub-Prozesses ist eine Übersicht aller Modellbausteine, die der Entwickler zur Abbildung der Elemente des Systems als notwendig erachtet. Die Wahl der Modellbausteine lässt sich auch auf deutlich komplexere Systeme übertragen, wie die Betrachtung von mehreren hundert Freiheitsgraden in einem FE-Modell in Vergleich zu einem analytischen Modell mit nur zwei Freiheitsgraden. Auch hier ist entscheidend, dass alle vorher festgelegten Elemente des betrachteten Systems mit den Modellbausteinen prinzipiell abbildbar sind.

Am Beispiel der Komfortuntersuchung des Fahrzeugs lassen sich die Elemente *Rad-
aufhängung*, *Räder* und *Anregung durch die Fahrbahn* aus der festgelegten System-

grenze mit Hilfe der Modellbausteine *Trägheit*, *Elastizität*, *Reibung*, und *Kraft/Moment* abbilden, um das Schwingungsverhalten untersuchen zu können, siehe Abbildung 5-11. Dies entspricht gängiger Analysepraxis²¹¹ und stellt ein Rahmenwerk dar, auf deren Basis der Entwickler seine Gedanken bzw. sein internes Modell externalisieren kann.

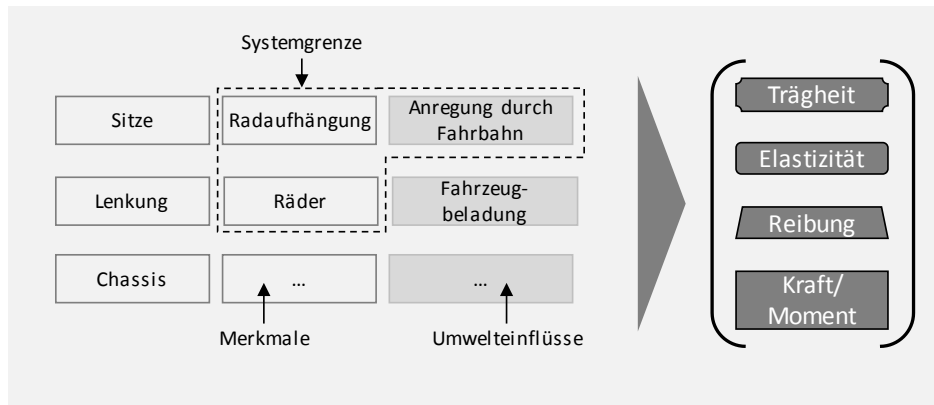


Abbildung 5-11: Modellbausteine zur Analyse des Fahrkomforts

5.2.3 Festlegen der Modellstruktur

Im nächsten Sub-Prozess erstellt der Entwickler durch Anpassung und Verknüpfung der festgelegten Modellbausteine eine Modellstruktur, siehe Abbildung 5-12.

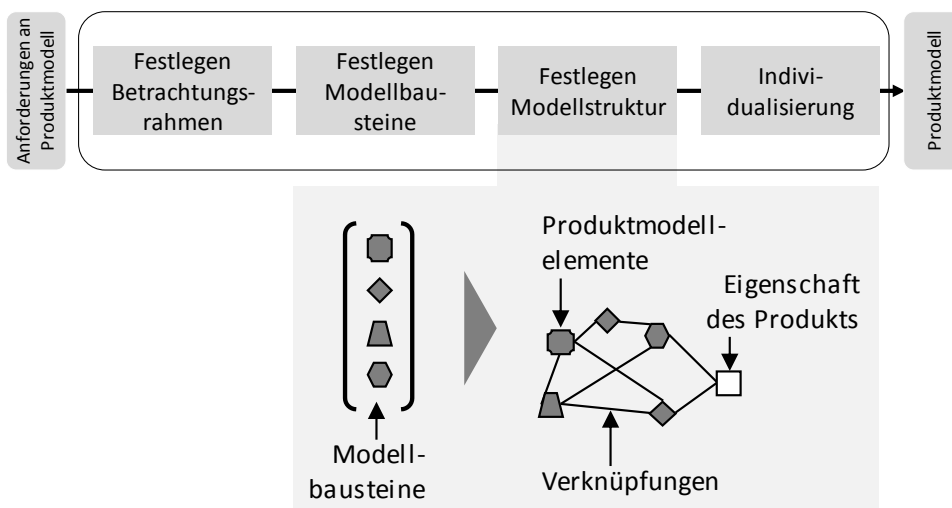


Abbildung 5-12: Festlegen der Modellstruktur

Dadurch werden die generischen Modellbausteine in Produktmodellelemente überführt und somit an die zu untersuchende Aufgabe angepasst. Das Ergebnis dieses

²¹¹ Vgl. Schramm et al. (2013), S. 101ff.; Bolton, Pahlkötter (2004), S. 256.

Arbeitsschrittes ist ein prinzipielles Produktmodell, das die Gedanken des Entwicklers strukturiert zusammenfasst.

Am Beispiel der Analyse des Fahrkomforts eines Kraftfahrzeugs wird auf Basis der festgelegten Modellbausteine eine erste Modellstruktur erstellt, siehe Abbildung 5-13. Das Fahrzeug wird hierbei als ebenes Viertelfahrzeugmodell dargestellt und die Radaufhängung als gedämpfter Zweimassenschwinger modelliert²¹². Die Dämpfung des Reifens kann hierbei aufgrund eines geringen Einflusses auf die Schwingungen vernachlässigt werden. Mit Hilfe der beiden Differentialgleichungen *Aufbau* und *Rad* ist das System *Radaufhängung des Fahrzeuges* zunächst komplett beschrieben und es lassen sich Schwingungen in vertikaler z-Richtung analysieren und daraus Aussagen bezüglich des Fahrkomforts ableiten.

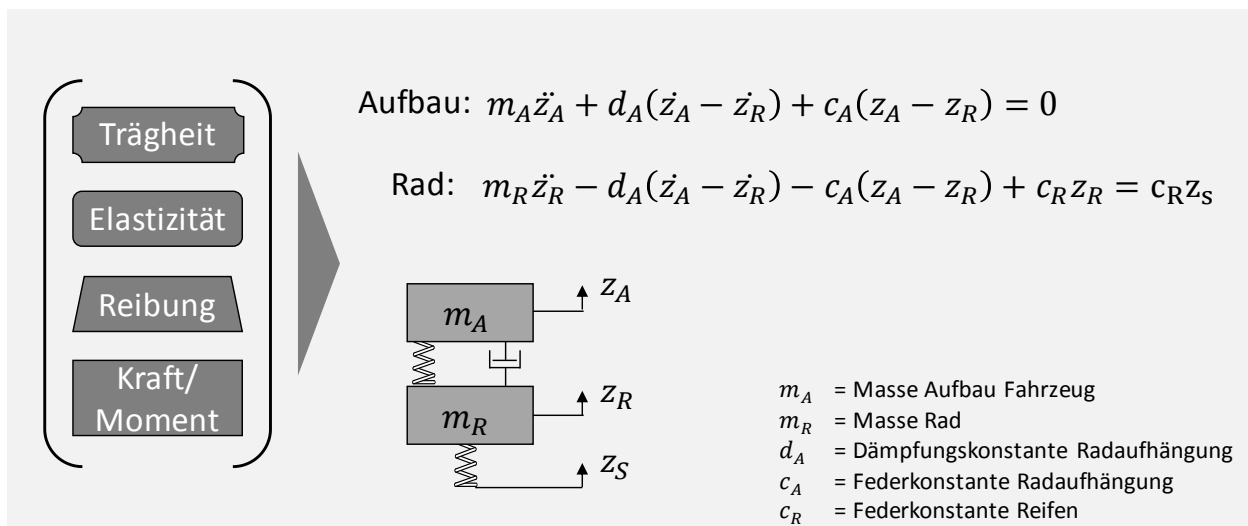


Abbildung 5-13: Modellstruktur zur Analyse der Radaufhängung

5.2.4 Individualisierung der Modellstruktur

Im letzten Schritt wird die erstellte Modellstruktur individualisiert. Hierbei werden den verwendeten Produktmodellelementen Ausprägungen zugewiesen, wodurch das prinzipielle Produktmodell individualisiert wird und somit nur noch für einen konkreten Anwendungsfall verwendet werden kann, siehe Abbildung 5-14.

²¹² Vgl. Schramm et al. (2013), S. 116ff.

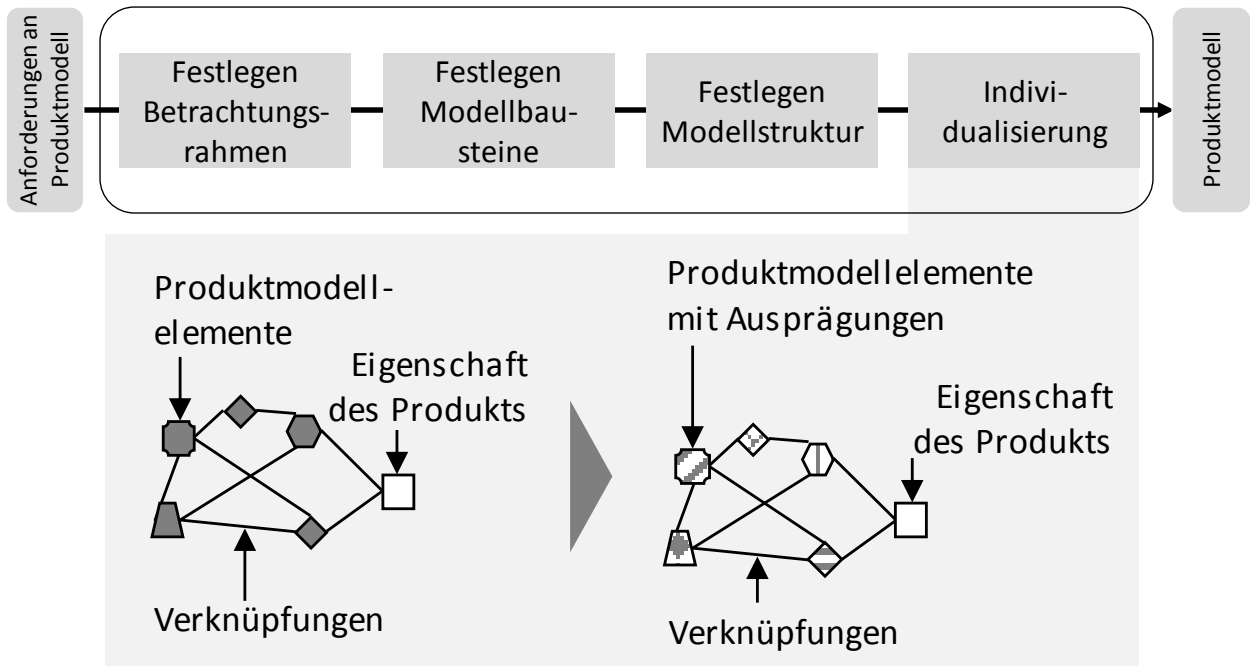


Abbildung 5-14: Individualisierung der Modellstruktur

Die Individualisierung erfolgt beispielsweise durch die Festlegung der Ausprägung von Massen, geometrischen Größen, Dämpfungskonstanten, Steifigkeiten, Integrationskonstanten oder Anregungen sowie Start- und Randbedingungen für Simulationen. Damit ist der Modellerstellungsprozess abgeschlossen, dessen Ergebnis ein individualisiertes Produktmodell ist, das im Nutzungsprozess für seinen Zweck verwendet werden kann.

Am Beispiel der Analyse des Fahrkomforts wird in diesem Sub-Prozess auf Basis der beiden Differentialgleichungen zunächst eine harmonische Fußpunkterregung festgelegt, siehe Abbildung 5-15. Weiterhin werden durch die Festlegung der Massen, Feder- und Dämpfungskonstanten verschiedene Dämpfungsgrade bestimmt, auf deren Basis das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges für verschiedene Anregungen untersucht werden kann. Im Beispiel wird das Verhältnis der Frequenz der Fußpunkterregung zur Eigenfrequenz der Radaufhängung vorgegeben und untersucht, wie sich darauf aufbauend das Verhältnis der Amplituden des Fahrzeugaufbaus zur Amplitude der Erregung verhält. Hierbei kann festgestellt werden, dass sich u. a. ein Maximum bei der Aufbauresonanz des Systems einstellt, deren Amplitude sich mit steigendem Dämpfungsgrad deutlich verringert.

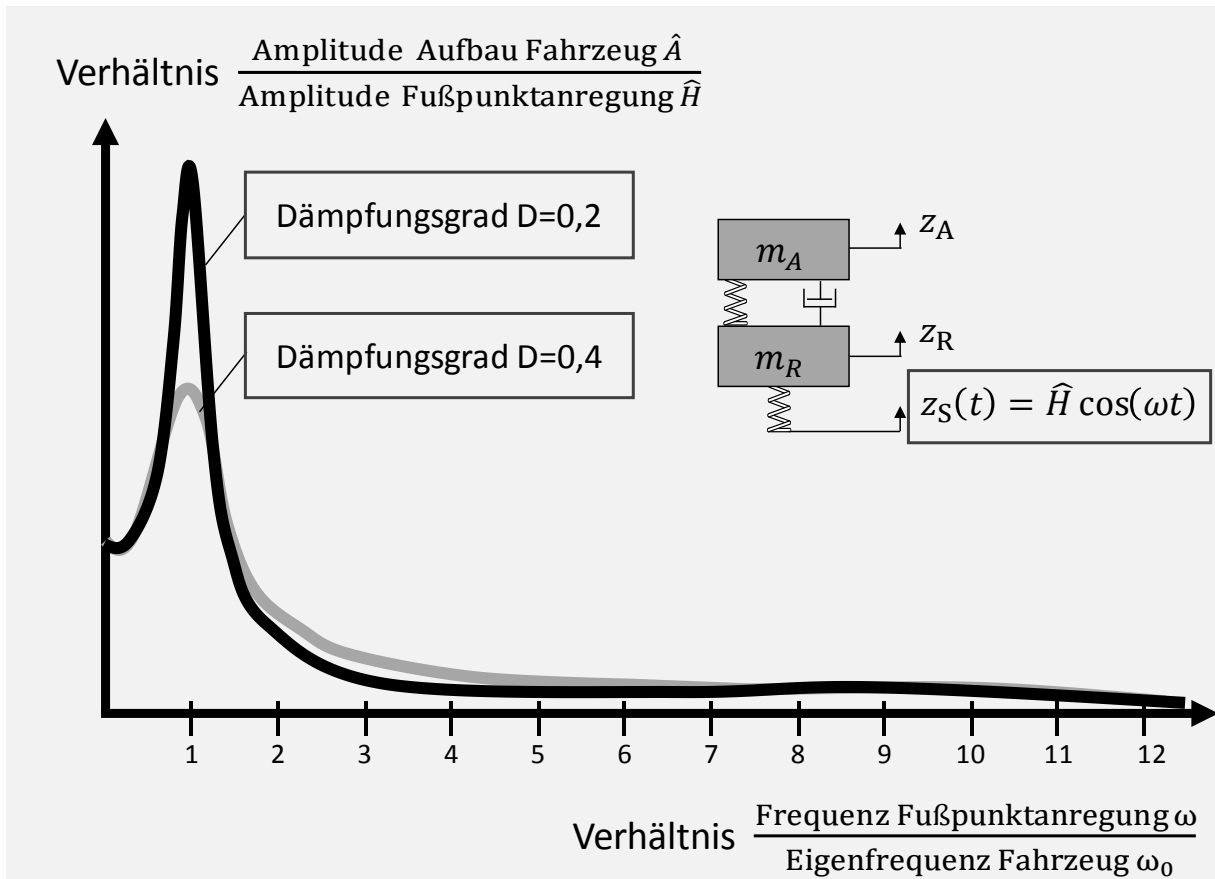


Abbildung 5-15: Individualisierung am Beispiel der Analyse des Fahrkomforts

Die Analyse des Fahrkomforts steht im Zielkonflikt mit der Fahrsicherheit des Fahrzeugs²¹³. Es gilt daher im Folgenden, die Radlastschwankungen als Maß für die Fahrsicherheit in ähnlicher Weise zu untersuchen und mit in die Komfortbetrachtung einzubeziehen. Aus der kombinierten Betrachtung beider Aspekte kann dann ein für das Fahrzeug optimierter Dämpfungsgrad abgeleitet werden. In Abhängigkeit vom angestrebten Fahrkomfort eignet sich beispielsweise für PKWs ein Dämpfungsgrad von $D=0,3$ bis $0,4$, für Sportwagen ein Wert von $D=0,5$ und für Rennwagen ein Wert von $D=0,7$.²¹⁴

5.3 Beispielhafte Anwendung der Detaillierung

Im Folgenden wird der Modellerstellungsprozess am Zündschlossbeispiel aus Unterabschnitt 1.1.1 angewendet. Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der vorangegangenen Modellplanung die Analyse der Eigenschaft *Federkraft* festgelegt wurde, die zum Halten des Zündschlüssels in der AN-Position benötigt wird. Zur

²¹³ Vgl. Trzesniowski (2014), S. 325ff.

²¹⁴ Vgl. Trzesniowski (2014), S. 327.

Bestimmung dieser Eigenschaft wird zunächst ein internes Modell erstellt, das die Wahrnehmung des Entwicklers vom zugrundeliegenden System abbildet. Dabei wird zunächst, analog zum durchgeführten Vorgehen der Zündschlossauslegung bei General Motors, von einem statischen Kräftegleichgewicht zur Bestimmung der Federkraft ausgegangen, siehe Abbildung 5-16.

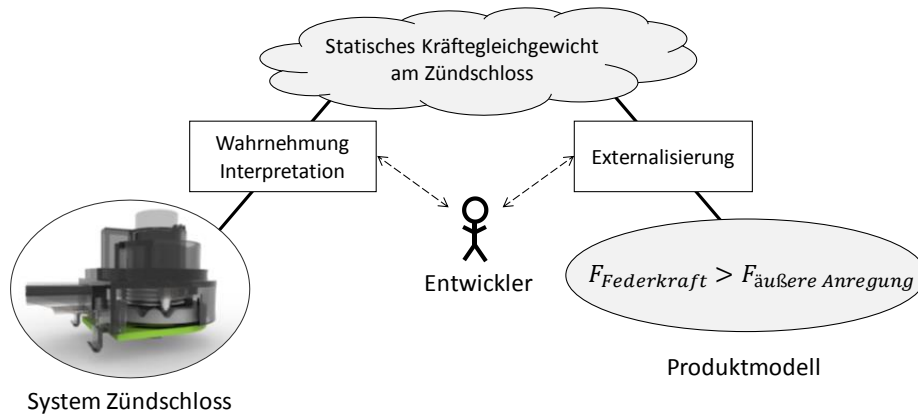


Abbildung 5-16: Internes Modell des Zündschlosses

Im ersten Sub-Prozess wird der Betrachtungsrahmen festgelegt. Hierzu wurde ein Demonstrator gefertigt, um die relevanten Elemente des Zündschlosses zu verdeutlichen, siehe Abbildung 5-17.

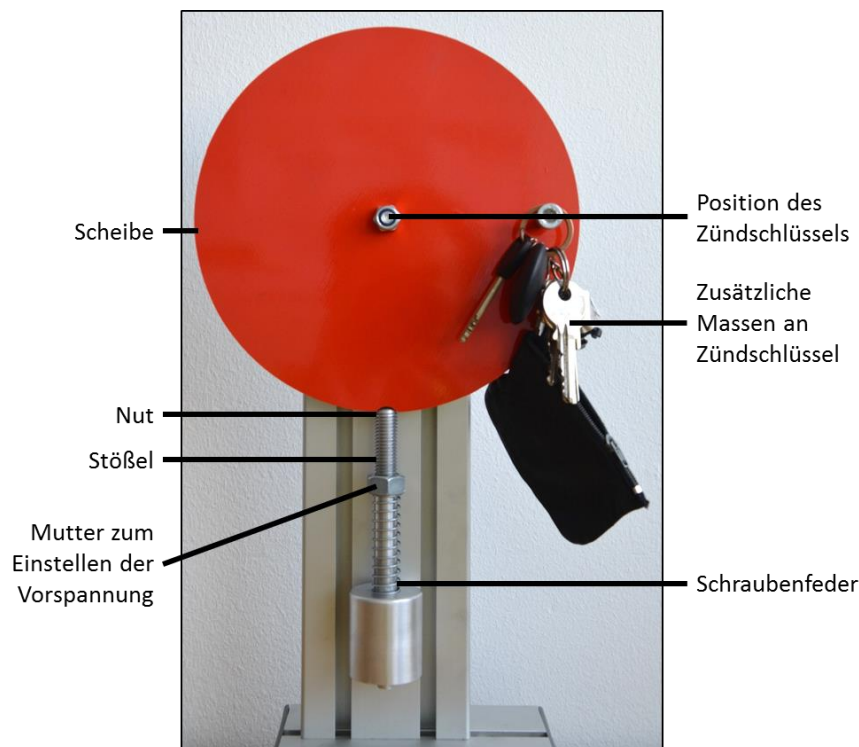


Abbildung 5-17: Demonstrator des Zündschlosses

Als relevant wird die Scheibe des Zündschlosses sowie der Stößel mit einstellbarer Vorspannung der Schraubenfeder festgelegt und als Umwelteinfluss zusätzliche Massen am Zündschlüssel betrachtet, siehe Abbildung 5-18.

Im nächsten Sub-Prozess werden Modellbausteine festgelegt, um alle Elemente innerhalb der sich ergebenden Systemgrenze in einem Produktmodell beschreiben zu können.

Benötigt werden zum einen die Bausteine *Kräftegleichgewicht*, *Federkraft* und *Coulomb'sche Reibung*, um die Abhängigkeit zwischen Stößel und Schreibe abbilden zu können. Zum anderen wird der Modellbaustein *Momentengleichgewicht* festgelegt, um den Zündschlüssel mit zusätzlichen Massen und der Federkraft in Beziehung zu setzen, siehe Abbildung 5-18.

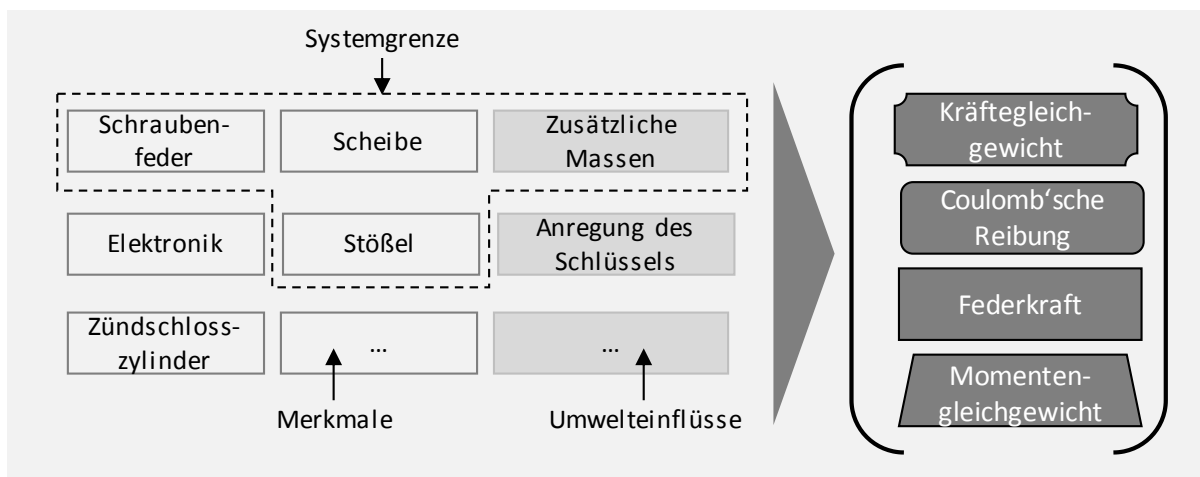


Abbildung 5-18: Modellbausteine zur Abbildung des Zündschlosses

Anschließend wird im nächsten Sub-Prozess eine Modellstruktur erstellt. Im ersten Schritt werden durch Freischneiden die Reaktionskräfte zwischen Stößel und Scheibe betrachtet, siehe Abbildung 5-19.

Am Stößel selbst wirken die radialen Komponenten der Normalkraft und der Reibkraft der Federkraft F_F entgegen, während an der schiefen Ebene deren tangentielle Komponenten der Haltekraft F_H entgegenwirken. Durch das Bilden von Kräftegleichgewichten unter Berücksichtigung der Coulomb'schen Reibung lässt sich damit die Haltekraft F_H in Abhängigkeit von der Federkraft F_F ausdrücken.

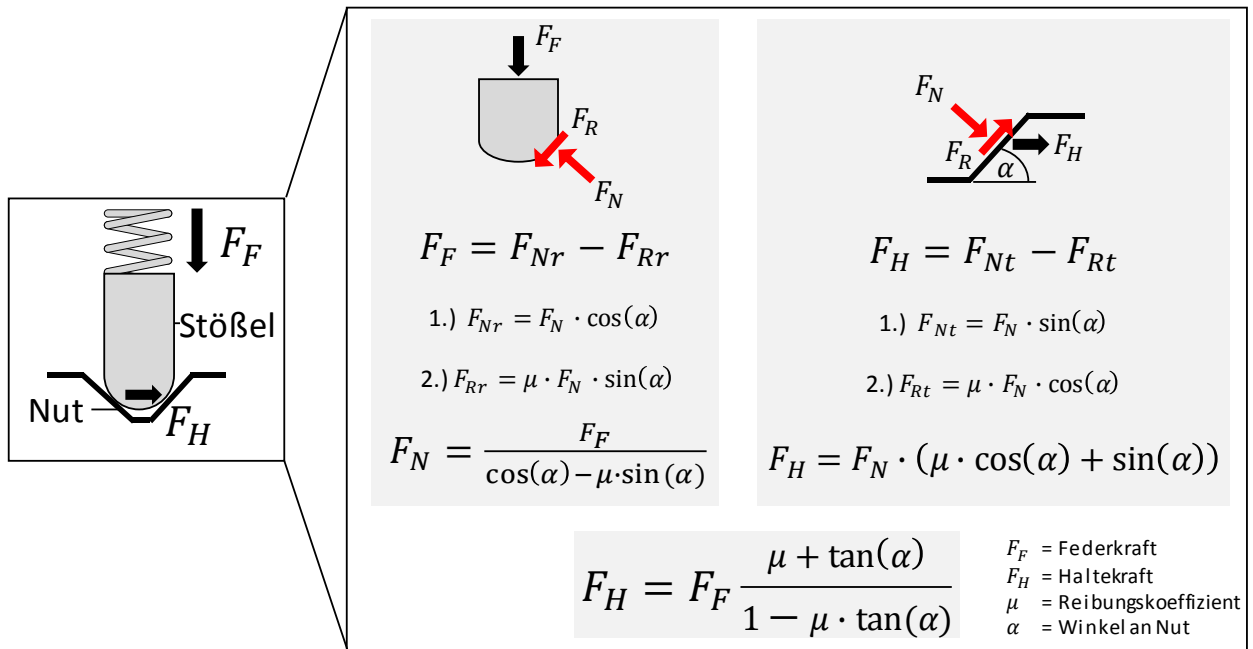


Abbildung 5-19: Reaktionskräfte am Stößel des Zündschlosses

Anschließend wird ein Momentengleichgewicht um die Drehachse der Scheibe aus der Haltekraft F_H und der Gewichtskraft F_G der Masse des Zündschlüssels unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Radien und der variierenden Federkraft F_F aufgestellt und nach dem Federweg x umgeformt, siehe Abbildung 5-20.

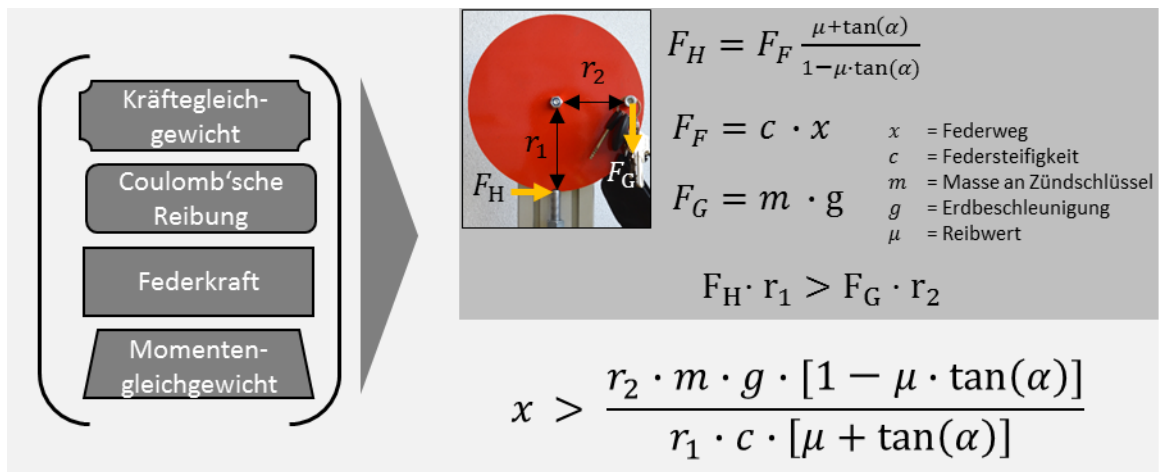


Abbildung 5-20: Modellstruktur des Produktmodells

Im letzten Sub-Prozess werden die Parameter der Modellstruktur individualisiert. Dies wurde mit Hilfe des Demonstrators durchgeführt und zur Bestimmung des benötigten Federwegs x die in Abbildung 5-21 angegebenen Ausprägungen der Produktmodellelemente ermittelt.

$$\left. \begin{array}{l}
 r_1 = 8\text{cm} \\
 r_2 = 10\text{cm} \\
 m = 0,5\text{kg} \\
 \mu = 0,2 \\
 \alpha = 40^\circ \\
 c = 0,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}}
 \end{array} \right\} x > 10,47\text{mm}$$

Abbildung 5-21: Ausprägungen der Produktmodellelemente

Hieraus lässt sich ein Federweg von $10,47\text{mm}$ berechnen. Dieser gibt die notwendige Vorspannung der Feder und somit die benötigte Federkraft an, damit das Zündschloss in der *An*-Position gehalten werden kann.

5.4 Erkenntnisse bei der Produktmodellerstellung

Im folgenden Abschnitt werden gewonnene Erkenntnisse bei der Anwendung der Detaillierung des Produktmodellerstellungsprozesses auf konkrete Aufgaben zusammengefasst und erläutert. Anschließend werden die zu treffenden Annahmen zusammengefasst, das Verständnis von Produktmodellierungsunsicherheit weiter geschärft und die Schwerpunkte des weiteren Vorgehens abgeleitet.

5.4.1 Anwendung des Produktmodellerstellungsprozesses

Wie bereits in Unterabschnitt 3.2.2 erwähnt, unterliegt der gesamte Lebenszyklus eines Produktmodells mehreren Iterationsschleifen, die sich insbesondere bei komplexen Aufgaben deutlich bemerkbar machen. Sie sind Bestandteil von Modellierungsstrategien wie der *Black-Box*, *White-Box* oder *Grey-Box Modellierung*, die in der Praxis verwendet werden, um die Komplexität der untersuchten Systeme zu beherrschen.

Bei einer *Black-Box Modellierung* betrachtet man nur die Ein- und Ausgänge eines Systems, innere Systemmerkmale werden ignoriert. Das Gegenstück hierzu ist eine *White-Box Modellierung*, bei der versucht wird, das gesamte System in Bezug auf Abhängigkeiten innerhalb des Systems als auch in Bezug zur Umwelt so genau wie möglich in einem Modell abzubilden²¹⁵.

²¹⁵ Vgl. Buede (2009), S. 362ff.

Eine Kombination aus beiden Ansätzen stellt die *Grey-Box Modellierung* dar, die u. a. auch bei der Erstellung von CAx-Systemen häufig verwendet wird²¹⁶. Hierbei wird mit Hilfe von Iterationsschleifen versucht, einen Kompromiss aus notwendigem Detaillierungsgrad und geringem Modellierungsaufwand zu finden.²¹⁷ Dieser stellt in der Praxis der Produktentwicklung aufgrund der unvollständigen Informationslage auch der am häufigsten verwendete Ansatz dar²¹⁸. Übertragen auf das erarbeitete Verständnis des Lebenszyklus eines Produktmodells aus Unterabschnitt 3.2.2 und Abschnitt 5.2 wird somit u. a. der Modellerstellungsprozess bei Anwendung dieser Modellierungsstrategie mehrfach durchlaufen, siehe Abbildung 5-22.

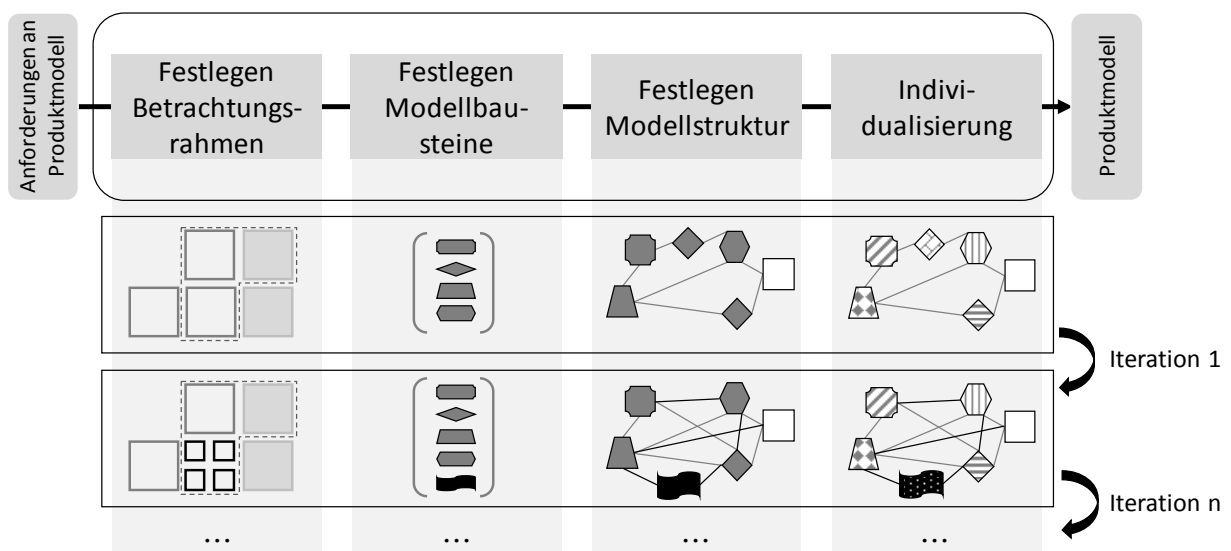


Abbildung 5-22: Iterationsschleifen bei der Produktmodellerstellung

Beim erstmaligen Durchlaufen des Sub-Prozesses *Festlegen des Betrachtungsrahmens* legt der Entwickler eine für ihn sinnvoll erscheinende Detaillierungsstufe der Elemente des betrachteten Systems fest. Diese werden während der sich anschließenden Sub-Prozesse schrittweise in ein Produktmodell übersetzt. Anschließend erfolgt in weiteren Iterationsschleifen eine Detaillierung der betrachteten Elemente sowie im Rahmen der weiteren Sub-Prozesse eine Anpassung bzw. Erweiterung der Modellbausteine, Modellstruktur und deren Individualisierung. Unabhängig davon können durch Verifikationstätigkeiten weitere Anpassungen entlang der Prozesskette zur Erstellung eines Produktmodells vorgenommen werden.

²¹⁶ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 107ff.

²¹⁷ Vgl. Hauth (2008), S. 4f.

²¹⁸ Vgl. Hauth (2008), S. 4; Isermann (2006), S. 27ff.

Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis der Entwickler den in den Anforderungen festgehaltenen Detaillierungsgrad des Produktmodells zur Lösung der Aufgabe erreicht hat.

Das schrittweise Detaillieren von Elementen des Systems im ersten Sub-Prozess entspricht dem hierarchischen Konzept von ROPOHL aus Unterabschnitt 2.2.3 und ist somit mit dem Modellverständnis dieser Arbeit kompatibel. Ein ähnliches Vorgehen findet sich auch bei der Erstellung von CAx-Systemen durch die Verwendung von Top-Down oder Bottom-Up Ansätzen wieder²¹⁹.

5.4.2 Annahmen im Produktmodellerstellungsprozess

Basierend auf der vorgenommenen Unterteilung der Modellerstellung in vier Sub-Prozesse lassen sich die zentralen, zu treffenden Annahmen gliedern. Sie beziehen sich auf das Festlegen....

- ... von abzubildenden Elementen des Systems,
- ... von Modellbausteinen,
- ... der Modellstruktur,
- ... von Ausprägungen der Produktmodellelemente.

Hierbei lässt sich eine Verkettung von getroffenen Annahmen entlang des gesamten Modellerstellungsprozesses erkennen. Da von Sub-Prozess zu Sub-Prozess stets eine Weiterverarbeitung der zuvor gefilterten Informationen des betrachteten Systems vorgenommen wird, führt eine unsicherheitsbehaftete Annahme insbesondere im ersten Sub-Prozess *Festlegung des Betrachtungsrahmens* zu einer hohen Ausprägung von Produktmodellierungsunsicherheit.

Diese Problematik verschärft sich mit zunehmenden Konkretisierungsgrad des Produkts, da die Anzahl an Iterationsschleifen zur Erstellung eines Produktmodells aufgrund der steigenden Anzahl an Merkmalen ebenfalls zunimmt, wodurch auch das Fehlerpotential falsch oder ungünstig getroffener Annahmen steigt.

Anhand der vorgenommenen Strukturierung von Annahmen sind Stellschrauben identifiziert worden, die zu Unsicherheit in einem Produktmodell führen. Dies stellt

²¹⁹ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 205ff.

eine wesentliche Vorarbeit für die Methodik dar, um die Auswertung von Lebenslaufprozessen darauf abzustimmen und somit einen Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit leisten zu können.

6 Methodik IDEA

Im folgenden Kapitel werden zunächst Vorüberlegungen zur Umsetzung der Methodik vorgestellt. Im Anschluss wird die eigentliche Methodik IDEA erarbeitet und deren vier Vorgehensschritte *Identifikation*, *Detaillierung*, *Effekt- und Wirkungsabschätzung* und *Auswertung* erläutert. Die Anwendung der Methodik wird an begleitenden Beispielen verdeutlicht. Anschließend wird der Nutzen der Methodik bewertet und am erstellten Produktmodell zur Untersuchung des Zündschlosses aus Abschnitt 5.3 angewendet.

6.1 Vorüberlegungen zur Umsetzung der Methodik

Die Methodik zielt darauf ab, mit Hilfe eines gezielten Antizipierens von Lebenslaufprozessen und deren Auswertung die vom Entwickler als relevant erachteten Informationen zu vervollständigen, um damit bei erkannter *Produktmodellunsicherheit* Annahmen zu verifizieren und dadurch *Produktmodellierungsunsicherheit* zu verringern. Daher wird zunächst erläutert, in welcher Form die Verifikation abläuft und wie darauf aufbauend das gezielte Antizipieren vorgenommen wird.

6.1.1 Informationslage in der Produktentwicklung

Grundsätzlich trifft der Entwickler Annahmen auf Basis der zum Zeitpunkt t verfügbaren Informationen, die sich im Zeitverlauf der Produktentwicklung ständig ändern, vergleiche Abschnitt 3.3. Die verfügbaren Informationen sind Bestandteil einer Gesamtmenge an Informationen, die im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses existiert und von der objektiv betrachtet auch nur eine bestimmte Menge an Informationen für eine Aufgabe relevant ist, siehe Abbildung 6-1.

Mit Hilfe der relevanten Informationsmenge lässt sich das untersuchte System unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse und Systemelemente beschreiben, wodurch es dessen Verhalten in der Realität sehr genau abbildet. Da sich der Entwickler jedoch stets nur Bilder von der Realität machen kann, kann er selbst bei vollkommener Informationslage nie die komplette Menge an relevanten Informationen kennen und somit alle relevanten Einflüsse in einem Produktmodell beschreiben.²²⁰ Es besteht nur die Möglichkeit, sich der tatsächlich relevanten Menge an Informationen so exakt wie möglich zu nähern.

²²⁰ Vgl. Hertz (1894), S. 2f.

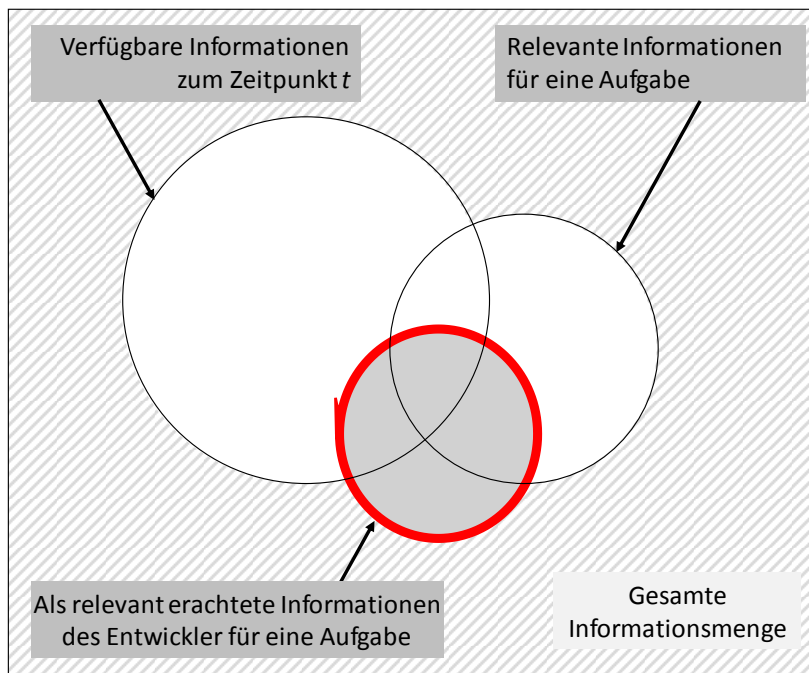


Abbildung 6-1: Informationslage in der Produktentwicklung

Auf Basis der verfügbaren Informationsmenge zum Zeitpunkt t legt der Entwickler eine Menge an Informationen fest, die er zur Analyse für eine bestimmte Aufgabe als relevant erachtet. Diese Informationen müssen nicht zwangsläufig verfügbar sein und sind auch nicht immer für die Aufgabe tatsächlich relevant. Nicht verfügbare, aber als relevant erachtete Informationen müssen durch zusätzliche Annahmen generiert werden, ehe die Gesamtmenge an relevant erachteten Informationen entsprechend dem Vorgehen des Lebenszyklus eines Produktmodells verarbeitet wird, vergleiche hierzu Abschnitt 5.2. Hierbei entsteht zwangsläufig eine Abweichung zwischen den als relevant erachteten und den objektiv relevanten Informationen.

Die als relevant erachteten Informationen repräsentieren somit die Modellwelt des Entwicklers zum Lösen einer Aufgabe. Hierbei ist davon auszugehen, dass die Festlegung im Rahmen der Möglichkeiten des Entwicklers bestmöglich vorgenommen wurde.

Damit getroffene Annahmen bei erkannter Unsicherheit verifiziert werden können, gilt es die Informationsmenge zu hinterfragen, um damit die Überschneidung der als relevant erachteten Informationen mit den tatsächlich relevanten Informationen zu vergrößern, vergleiche Abschnitt 4.2.

Da die tatsächlich relevante Menge an Informationen unbekannt und auch nicht komplett identifizierbar ist, kann die Hinterfragung der Modellwelt des Entwicklers

in Analogie zum Validierungsgedanken aus Unterabschnitt 3.2.2 nur durch den Abgleich mit einer Referenzmodellwelt durchgeführt werden. Diese muss bereits validiert sein, damit davon ausgegangen werden kann, dass diese eine größere Menge an tatsächlich relevanten Informationen enthält, siehe Abbildung 6-2.

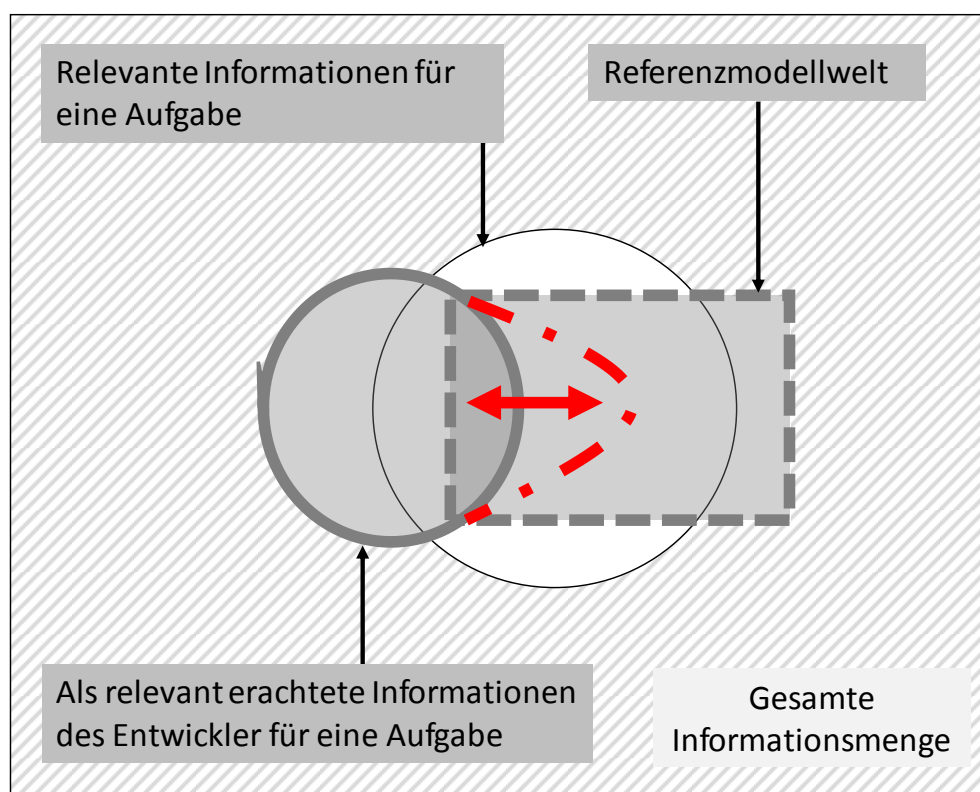


Abbildung 6-2: Informationslage in der Produktentwicklung

Durch den Abgleich beider Modellwelten kann der Entwickler die als relevant erachtete Informationsmenge hinterfragen, bei Bedarf erweitern und damit wiederum die getroffenen Annahmen verifizieren, wodurch die Referenzmodellwelt als eine gedankliche Anregung für den Entwickler fungiert. Die Erweiterung der als relevant erachteten Informationsmenge wird am Zündschlossbeispiel in Abschnitt 6.4 erläutert.

6.1.2 Transformation von Perspektiven auf das System

Die für die Verifikation notwendige Referenzmodellwelt wird mit Hilfe der Methodik erzeugt. Hierzu wird der Kerngedanke des Modells der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung aufgegriffen und ein von den zugrundeliegenden Anforderungen an das Produktmodell abhängiges, gezieltes Antizipieren von Lebenslauf-

prozessen vorgenommen. Bei den Lebenslaufprozessen handelt es sich um technische Prozesse, siehe Unterabschnitt 2.2.5. Dadurch wird neben der bestehenden Produktmodellperspektive noch eine weitere, prozessbezogene Perspektive auf das betrachtete System gelegt, siehe Abbildung 6-3.

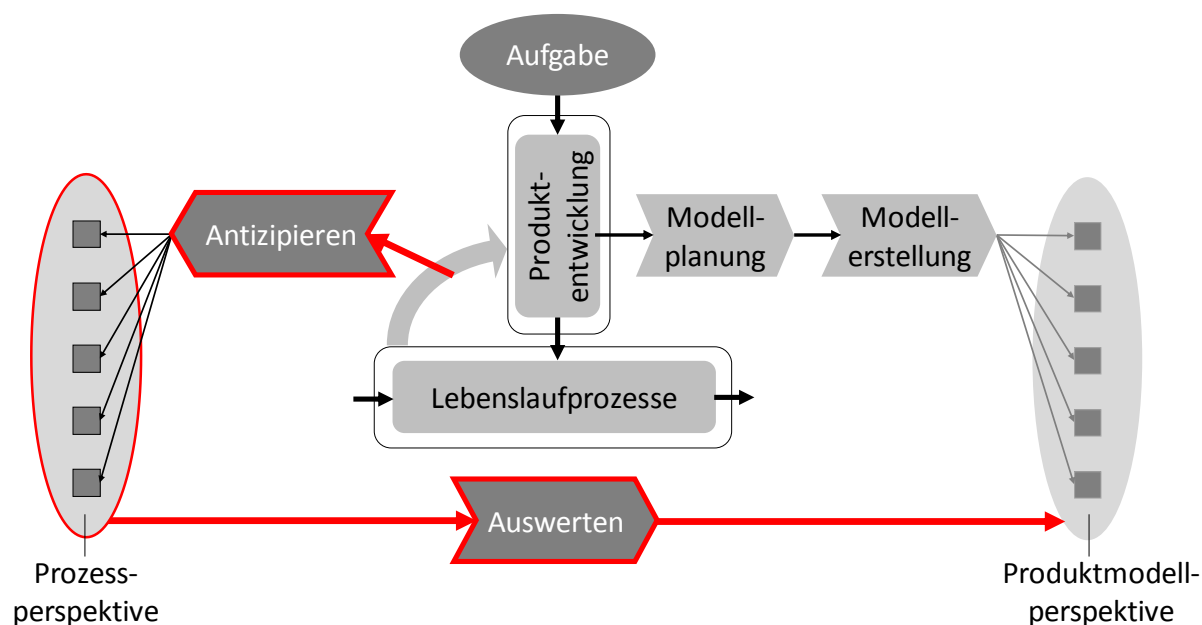


Abbildung 6-3: Übertragung der Prozess- auf die Produktmodellperspektive

Zur Durchführung der Verifikation müssen beide Perspektiven ineinander überführt werden. Hierzu findet ein auf die Anforderungen des Produktmodells abgestimmtes Auswerten der gewonnenen Informationen aus den Lebenslaufprozessen statt, wodurch die Prozessperspektive auf die Produktmodellperspektive übertragen wird. Es wird somit untersucht, welche Wirkungen aus den Informationen der Lebenslaufprozesse auf das Produkt resultieren. Falls eine Wirkung erkennbar ist und die gestellten Anforderungen tangiert, wird entschieden, ob und in welcher Form die zugrunde liegende Information aus der Prozessperspektive durch Anpassen von Annahmen in das Produktmodell überführt wird.

6.2 Vorgehensschritte der Methodik IDEA

Die Methodik IDEA gliedert sich in vier Vorgehensschritte, die nacheinander sequentiell durchlaufen werden²²¹. Im Rahmen der ersten beiden Schritte der *Identi-*

²²¹ Vgl. Würtenberger et al. (2017), S. 3ff.; Würtenberger et al. (2016), S. 583ff.

fikation und *Detaillierung* wird ein Antizipieren und Detaillieren von relevanten Lebenslaufprozessen in Bezug auf die Anforderungen des Produktmodells vorgenommen, siehe Abbildung 6-4.

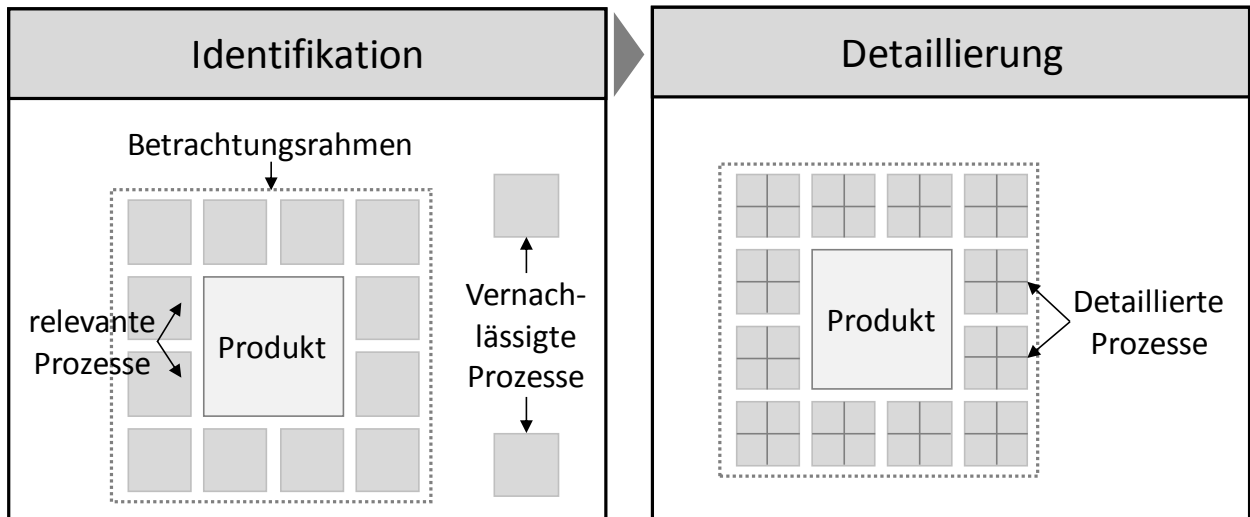


Abbildung 6-4: Vorgehensschritte zum Antizipieren

In der anschließenden *Effekt- und Wirkungsabschätzung* sowie der *Auswertung* wird untersucht, ob und inwiefern von den identifizierten Informationen der detaillierten Prozesse eine Wirkung auf das Produkt ausgeht und welche Strategien zur deren Berücksichtigung im Produktmodell sich ableiten lassen, siehe Abbildung 6-5.

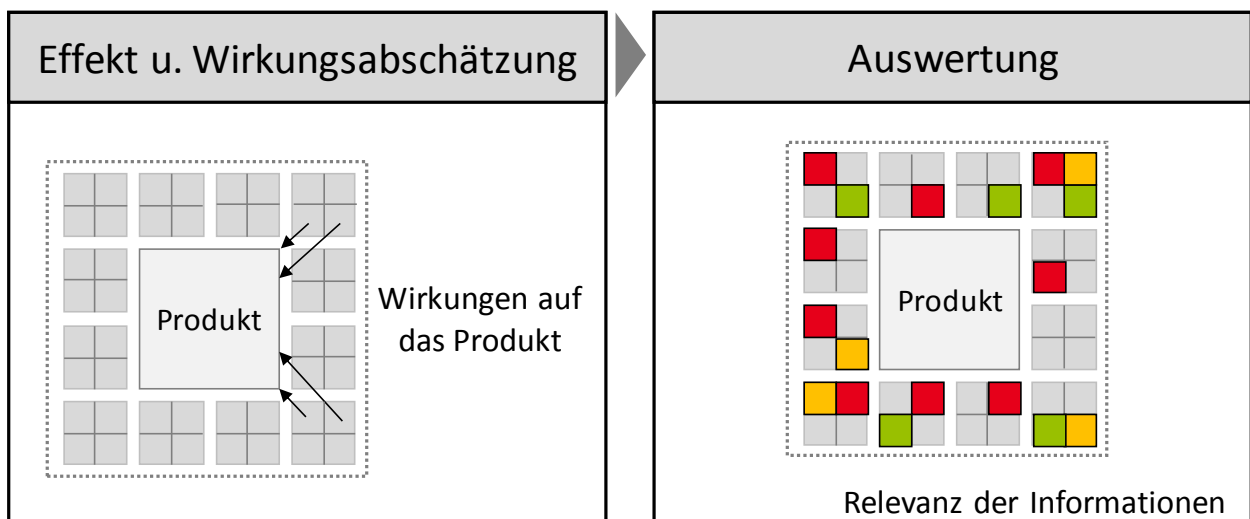


Abbildung 6-5: Vorgehensschritte zum Auswerten

Jedem Vorgehensschritt werden in den Unterabschnitten 6.2.1 bis 6.2.4 verschiedene Methoden sowie ein Modell zur Ergebnisdarstellung zugeordnet, die den Entwickler beim Generieren und Visualisieren von Informationen unterstützen. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Checklisten, die um geordnete Sammlungen häufig wiederkehrender Informationen für bestimmte Themen beinhalten. Sie dienen dem Entwickler als Referenzmodellwelt, mit dessen Hilfe eine möglichst vollständige Identifikation relevanter Informationen ermöglicht werden soll. Dieses Vorgehen hat sich bereits zur Analyse und Beherrschung von aleatorischer Unsicherheit bewährt²²². Im Folgenden werden die einzelnen Vorgehensschritte erläutert.

6.2.1 Identifikation von Lebenslaufprozessen

Im ersten Vorgehensschritt identifiziert der Entwickler Lebenslaufprozesse, die einen Einfluss auf die zu untersuchende Eigenschaft des Produkts haben können, siehe Abbildung 6-6. Hierzu eignen sich u. a. *Lebenslaufchecklisten* sowie die Methode *Analyse der Produktumgebung*, die als gedankliche Anregungen dienen, um eine möglichst vollständige Identifikation relevanter Prozesse zu gewährleisten.

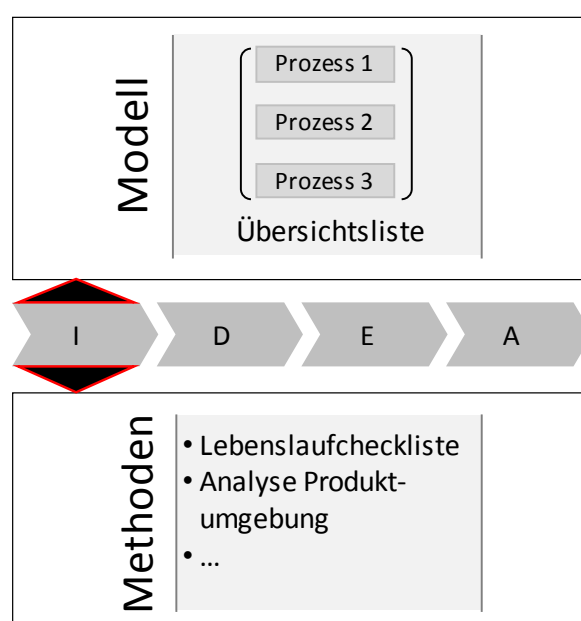


Abbildung 6-6: Identifikation von Lebenslaufprozessen

In *Lebenslaufchecklisten* werden Lebenslaufprozesse gesammelt, die ein Produkt typischerweise durchläuft. ROTH beispielsweise gliedert Lebenslaufprozesse chrono-

²²² Vgl. Engelhardt (2013), S. 55ff.

logisch nach ihren Phasen und ordnet jedem Prozess Schlagworte zu, siehe Abbildung 6-7. Die Schlagworte stellt der Entwickler dann den Anforderungen des Produktmodells gegenüber, um zu erkennen, welche einen Einfluss haben und leitet darauf aufbauend entsprechende Lebenslaufprozesse ab.

Lebenslaufphase	Prozesse	Schlagworte
Herstellung	Produktplanung	Stand der Technik, Know-How ...
	Arbeitsvorbereitung und Teilefertigung	Verfügbare Betriebsmittel, technologische Materialeigenschaften, Qualifikation des Fertigungspersonals ...
	Montage	Werkzeuge, montagebedingte Belastungen, Teilehandhabung ...
Verteilung	Transport	Verfügbare Transportmittel, klimatische Bedingungen, Gewichte ...
	Lagerung	Platzbedarf, Gewicht, lagerungsbedingte Alterung ...
	Vertrieb	Korrosionsbeständigkeit, Klimaabhängigkeit, ergonomische Vorzüge ...
Verwendung	Betrieb und Stillstand	Funktion, Zuverlässigkeit, Lebensdauer ...
	Wartung	Wartungsintervalle, waltungsbedingte Belastungen, Zugänglichkeit zu Wartungsstelle ...
	Reparatur	Austauschbarkeit von Teilen, reparaturbedingte Belastung, Bewegungsspielraum ...
Rückführung	Recycling	Wiederverwendung, Grad der Umweltbelastung, Gefährdung durch Gifte ...

Abbildung 6-7: Auszüge einer Lebenslaufcheckliste nach ROTH²²³

Neben Lebenslaufchecklisten bietet die Methode *Analyse der Produktumgebung* eine weitere Möglichkeit, Lebenslaufprozesse zu identifizieren. Hierbei wird das betrachtete Produkt von seinen Nachbarsystemen abgegrenzt und es werden bestehende Beeinflussungen zwischen den Systemen und dem Produkt untersucht. ROTH beispielsweise unterscheidet hierbei zwischen dem passiven System, auf das eine Wirkung ausgeübt wird sowie dem aktiven System, das auf das Produkt wirkt, siehe Abbildung 6-8²²⁴.

²²³ Vgl. Roth (2000), S. 72ff.

²²⁴ Vgl. Roth (2000), S. 68ff.

Weiterhin haben das Befehlssystem, welches das Produkt steuert, sowie der Wirkungsort, das Transportsystem und das Wartungssystem einen Einfluss auf das Produkt. Jedem der Systeme werden dann Einzelfragen zugeordnet, mit deren Hilfe sich weitere, relevante Lebenslaufprozesse identifizieren lassen²²⁵.

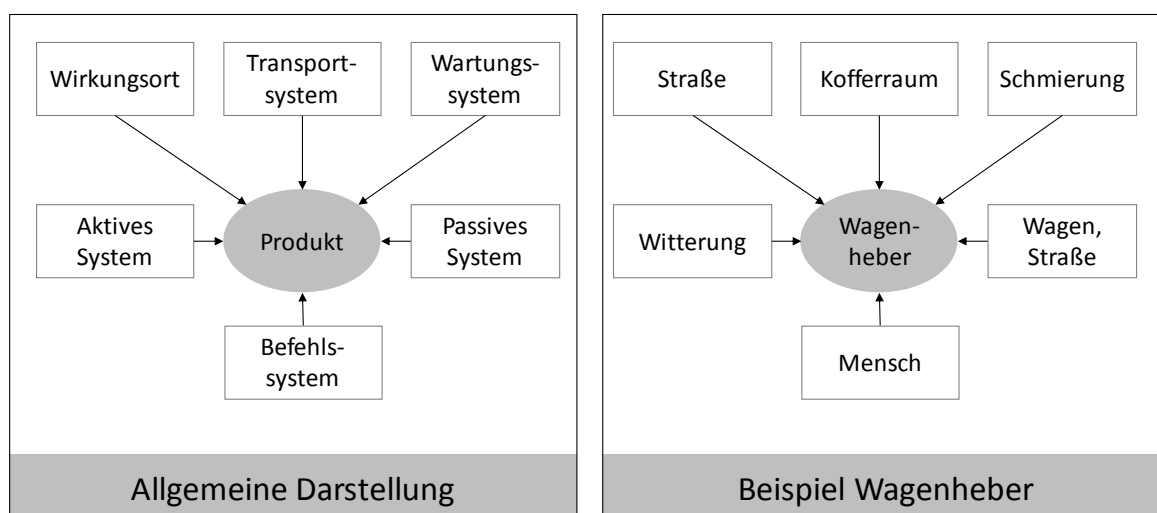


Abbildung 6-8: Analyse der Produktumgebung²²⁶

Am Beispiel eines mobilen Wagenhebers lässt sich u. a. der Untergrund, auf dem der Wagenheber aufgestellt wird, als passives System identifizieren. Soll in einem Produktmodell beispielsweise das *Handling des Wagenhebers* untersucht werden, lässt sich anhand dieses passiven Systems eine für die Fragestellung relevante Abhängigkeit zwischen dem Untergrund und dem Wagenheber erkennen. Daraus lässt sich der Lebenslaufprozess *Betätigen des Wagenhebers bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen* als relevant für die Untersuchung des Handlings identifizieren.

Die Ergebnisse der Prozessidentifikation werden abschließend im Modell *Übersichtsliste* spaltenweise eingetragen, siehe Abbildung 6-6.

6.2.2 Detaillierung relevanter Lebenslaufprozesse

Im nächsten Schritt werden alle identifizierten Lebenslaufprozesse detailliert, siehe Abbildung 6-9. Hierzu wird jeder Lebenslaufprozess zunächst im erweiterten Prozessmodell nach HEIDEMANN abgebildet und das hierfür notwendige Arbeitsmittel aus dem betrachteten System festgelegt, vergleiche Unterabschnitt 2.2.5.

²²⁵ Vgl. Roth (2000), S. 68ff.

²²⁶ In Anlehnung an Roth (2000), S. 67

Anschließend werden Stör- und Nebengrößen des Systems identifiziert, die auf den betrachteten Lebenslaufprozess und somit auf das Arbeitsmittel und auf den Operanden wirken und im Prozessmodell eingetragen. Auch hier besteht, analog zur Identifikation von Lebenslaufprozessen in Unterabschnitt 6.2.1 der Bedarf, eine möglichst vollständige Identifikation aller relevanten Stör- und Nebengrößen zu erreichen.

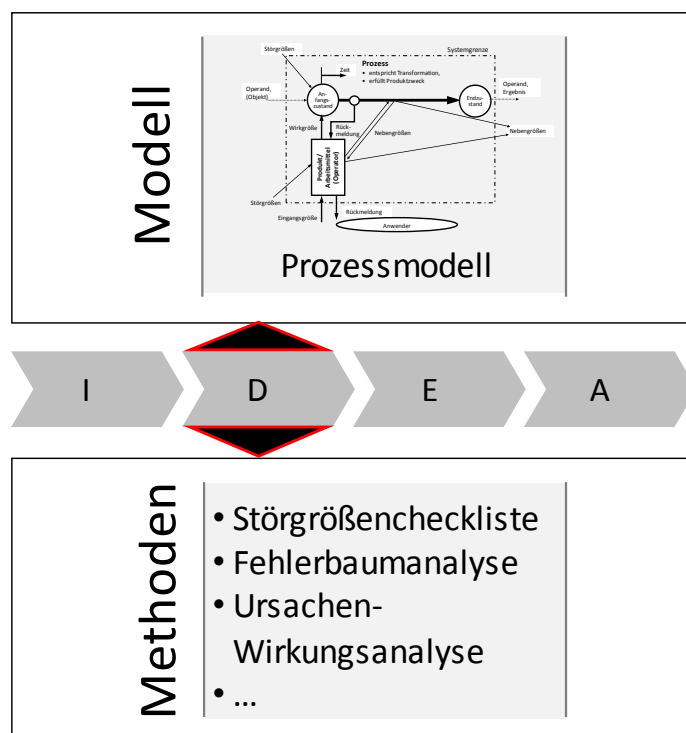


Abbildung 6-9: Detaillierung von Lebenslaufprozessen

Zur Unterstützung der Identifikation dienen dem Entwickler *Störgrößenchecklisten* sowie die Methoden *Fehlerbaumanalyse* oder *Ursache-Wirkungsanalyse*.

Eine Störgrößencheckliste beinhaltet beobachtbare bzw. beschreibbare Störgrößen, die in der Natur vorkommen und Prozesse beeinflussen können.

MATTHIASSEN²²⁷ beispielsweise gliedert auftretende Störgrößen in die Bereiche *Kinetik, Strahlung, Thermodynamik, Schall, Elektrik, Materialkontakt* sowie *Ver- schmutzung* und ordnet jeweils eine definierte Menge an Störgrößen zu. MATHIAS greift diese Gliederung auf, fasst enthaltende Inhalte zusammen und ergänzt diese zu einer handhabbaren, normierten Liste von 70 Störgrößen, siehe Abbildung 6-10. Der Entwickler ordnet anhand dieser Checkliste relevante Störgrößen den Lebenslaufprozessen zu und trägt sie in das Prozessmodell wie vorgesehen ein.

²²⁷ Vgl. Matthiassen (1997), S. 50f.

Je nach festgelegter Systemgrenze des Lebenslaufprozesses kann eine Störgröße auch als Nebengröße fungieren. Eine Störgröße wirkt dabei stets über die Systemgrenze aus Prozess oder Arbeitsmittel, während eine Nebengröße eine Beeinflussung zwischen Arbeitsmittel und Prozess beschreibt, vergleiche Unterabschnitt 2.2.5. Somit kann eine Störgrößencheckliste auch zur Identifikation von Nebengrößen genutzt werden.

Störgröße	Störgröße	Störgröße
Alphastrahlung	Hydroschall	Schlagartig zentrisch angreifende Kraft
Beschleunigung entgegen Bewegungsrichtung	Infrarotstrahlung	Schwankende elektrische Spannung
Newton'sche Gravitation	Infraschall	Stick-Slip Vorgang
Betastrahlung	Körperschall	Torsionsmoment
Biegemoment	Laminare Strömung	Wärmezufuhr
Einspannmoment	Licht	Wärmeabfuhr
...

Abbildung 6-10: Auszüge einer Störgrößencheckliste nach MATHIAS²²⁸

Das Vorgehen wird im Folgenden mit Hilfe des Prozesses *Vertikalschwingung eines Kraftfahrzeugs tilgen* verdeutlicht, siehe Abbildung 6-11.

Als Arbeitsmittel lässt sich der Dämpfer festlegen und dem Operand *Kraftfahrzeug im Anfangszustand* eine zu tilgende Schwingung z zuordnen, die nach dem Prozess den Wert 0 annimmt.

Um die Zuordnung von Stör- und Nebengrößen zu verdeutlichen, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Schwingung aus der Anregung der Fahrbahn resultiert. Unter Verwendung der Störgrößencheckliste lässt sich die Störgröße *schlagartig zentrische Kraft* identifizieren, die auf den Anfangszustand wirkt. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass das Fahrzeug beispielsweise bei einer Fahrt durch ein Schlagloch einem Impuls in vertikaler Richtung ausgesetzt ist, das wiederum zu der *schlagartigen, zentrischen Kraft* führt. Im Dämpfer selbst entsteht aufgrund von Dissipation Wärme, die als Nebengröße *Wärmezufuhr* auf den Prozess wirkt und somit die Tilgung von Vertikalschwingungen beeinflusst. Parallel dazu wird der Dämpfer

²²⁸ In Anlehnung an Mathias (2016), S. XVI ff.

Ursache auch die Wirkung eines möglichen Fehlers berücksichtigt, um daraus weitere Assoziationen für relevante Stör- und Nebengrößen ableiten zu können.

6.2.3 Effekt- und Wirkungsabschätzung

Im nächsten Vorgehensschritt wird untersucht, ob von den identifizierten Stör- und Nebengrößen eine Wirkung ausgeht. Hierzu werden diese in einer Abhängigkeitsmatrix spaltenweise eingetragen und dem zugrundeliegenden Produkt gegenübergestellt, siehe Abbildung 6-12.

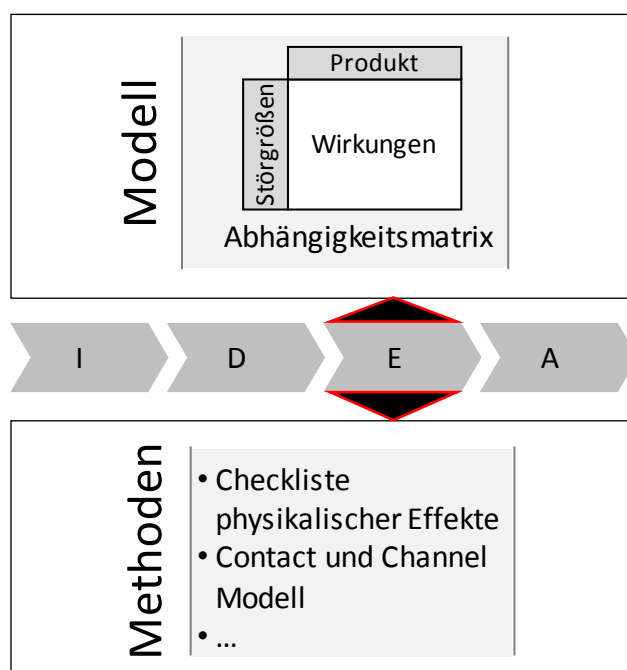


Abbildung 6-12: Effekt- und Wirkungsabschätzung

Um die Identifikation von Wirkungen zu erleichtern, werden wesentliche Bereiche des Produkts, die in Korrelation mit den Anforderungen an das Produktmodell stehen, zunächst in Anlehnung an das Contact und Channel Modell nach MATTHIESEN²³¹ abgebildet. Hierbei wird das Produkt mit Hilfe von einzelnen Bauteilen, so genannten *Leitstützstrukturen*, und *Wirkflächenpaaren* beschrieben, die die Beziehungen der Bauteile zueinander in Bezug auf deren Funktion beschreiben. So lässt sich beispielsweise bei einer Verzahnungsstufe jedes Zahnrad als Bauteil auffassen, die an deren Verzahnungseingriff ein Wirkflächenpaar bilden und damit die Funktion *Kraftleitung* erfüllen.

²³¹ Vgl. Matthiesen (2002), S. 48ff.

Alle Bauteile und Wirkflächenpaare werden in die erste Zeile der Abhängigkeitsmatrix eingetragen, siehe Abbildung 6-13.

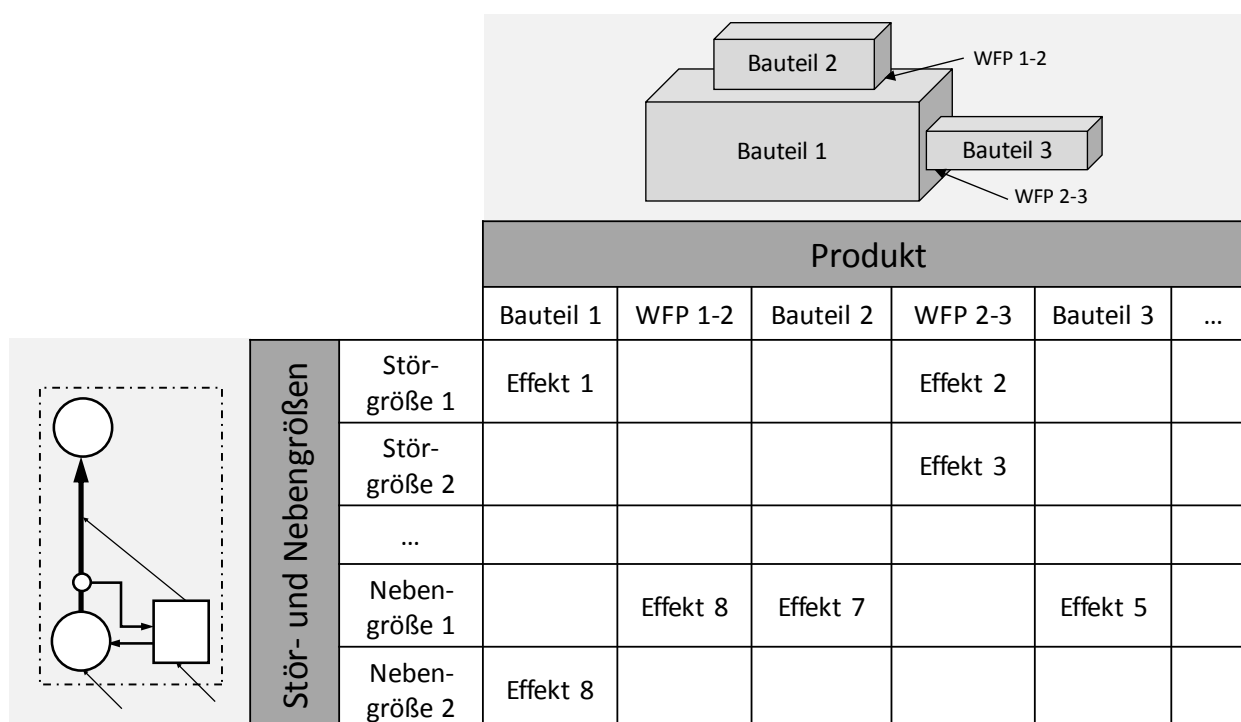


Abbildung 6-13: Abhängigkeitsmatrix

Anschließend trifft der Entwickler für jede Zelle der Matrix eine Abschätzung, ob und inwiefern eine Stör- bzw. Nebengröße ein Bauteil oder ein Wirkflächenpaar beeinflusst. Zur Unterstützung kann er hierzu *Checklisten physikalischer Effekte* verwenden, um bestehende Beeinflussungen zu erkennen. Physikalische Effekte beschreiben die Antworten der Natur auf spezielle Experimente²³² und sammeln strukturiert zugrundeliegende Informationen, beispielsweise in Form von Skizzen, Gleichungen und Anwendungsbeispielen²³³, siehe Abbildung 6-14.

Sie lassen sich, ähnlich wie Modellbausteine, nach Fachdisziplinen des Maschinenbaus gliedern und dienen dem Entwickler als Assoziationsstütze, um bestehende Wirkungen zwischen den Stör- und Nebengrößen zu den Bauteilen bzw. Wirkflächenpaaren zu erkennen und haben somit einen qualitativen Charakter.

So hat in Abbildung 6-13 beispielsweise Störgröße 1 eine Wirkung auf das Wirkflächenpaar 2-3, die durch den Effekt 2 beschrieben werden kann.

²³² Vgl. Schubert (1984), S. IX

²³³ Vgl. Ponn, Lindemann (2008), S. 397

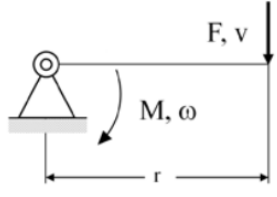
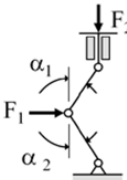
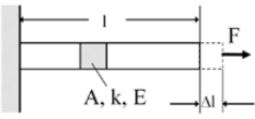
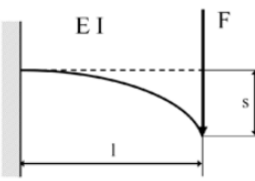
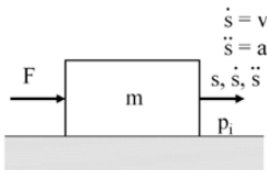
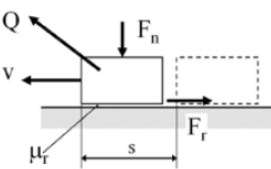
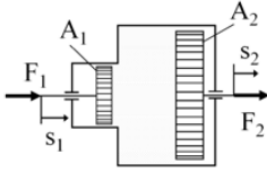
Kategorie	Beschreibung	Skizze	Gleichung
Statik starrer Körper	Hebel		$M = F \cdot r$ $v = \omega \cdot r$
	Kniehebel		$F_2 = \frac{F_1}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2}$
Elastizität fester Körper	Elastische Dehnung		$F = k \cdot \Delta l$ $F = EA \frac{\Delta l}{l}$
	Elastische Biegung		$F = \frac{3EI}{l^3} s$
Dynamik	Trägheit translatorisch		$F = m \cdot a$ $F = \frac{d}{dt} p_i = \frac{d}{dt} (m\vec{v})$
Reibung	Coulomb'sche Reibung		Beispiel Gleitreibung: $F_r = \mu_r \cdot F_n$ $Q = \mu_r \cdot F_r \cdot s$
Ruhende Flüssig- keiten	Druckfort- pflanzung		$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$ $s_2 = \frac{A_1}{A_2} s_1$

Abbildung 6-14: Auszug einer Checkliste physikalischer Effekte²³⁴²³⁴ In Anlehnung an Ponn, Lindemann (2008), S. 311ff.

Die Zuordnung von Effekten wird im Folgenden am Beispiel der Auslegung eines Lagers verdeutlicht. Hierbei handelt es sich um ein Kegelrollenlager in X-Anordnung an einer Getriebeausgangswelle. Es wird davon ausgegangen, dass bereits die radialen und axialen Kraftkomponenten sowie deren äquivalente, dynamische Lagerlasten zur Bestimmung der nominellen Lagerlebensdauer ermittelt wurden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass im Rahmen einer Validierung Produktmodellunsicherheit erkannt worden ist. Mit Hilfe der Methodik IDEA werden daher Lebenslaufinformationen identifiziert und ausgewertet, um damit die zugrunde liegenden Annahmen des Produktmodells anpassen und damit die Unsicherheit reduzieren zu können.

Im Rahmen der Identifikation und Detaillierung von Lebenslaufprozessen konnte u. a. die Nebengröße *Wärmezufuhr* als besonders kritisch identifiziert werden, die während des Betriebs des Getriebes entsteht, siehe Abbildung 6-15.

Zur Abschätzung der Wirkung wird die Nebengröße zunächst in die erste Spalte der Abhängigkeitsmatrix eingetragen. Das Kegelrollenlager an der Getriebeausgangswelle wird anschließend mit Hilfe des *Contact und Channel Modells* beschrieben und die identifizierten Bauteile und Wirkflächenpaare werden in die erste Zeile der Abhängigkeitsmatrix eingetragen.

Mit Hilfe der Checkliste physikalischer Effekte wird im nächsten Schritt die Wirkung der Nebengröße *Wärmezufuhr* abgeschätzt. Hierbei kann der Effekt *Dehnung* zugeordnet werden. Dieser führt am Wirkflächenpaar 1 zu einer Zwangskraft in radialer sowie an Wirkflächenpaar 2 zu einer Zwangskraft in axialer Richtung. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Welle einen kleineren Wärmedehnungskoeffizienten als das Gehäuse und der Deckel besitzt. Die entstehenden Zwangskräfte führen wiederum zu einer Verringerung der Vorspannung der angestellten Lagerung. Auf Basis dieser erkannten Wirkung werden die axialen Kraftkomponenten, die auf das Kegelrollenlager wirken, angepasst und die Lagerlebensdauer wird neu berechnet. Damit wurde der Effekt im Produktmodell durch Anpassung der Annahme bezüglich der axialen Kraftkomponente integriert.

Ergebnis dieses Vorgehensschritts ist eine Übersicht von Stör- und Nebengrößen, die einen Einfluss auf das Produkt haben, wodurch die Menge an relevanten Informationen für eine bestimmte Aufgabe erweitert wurde, vergleiche Unterabschnitt 6.1.1.

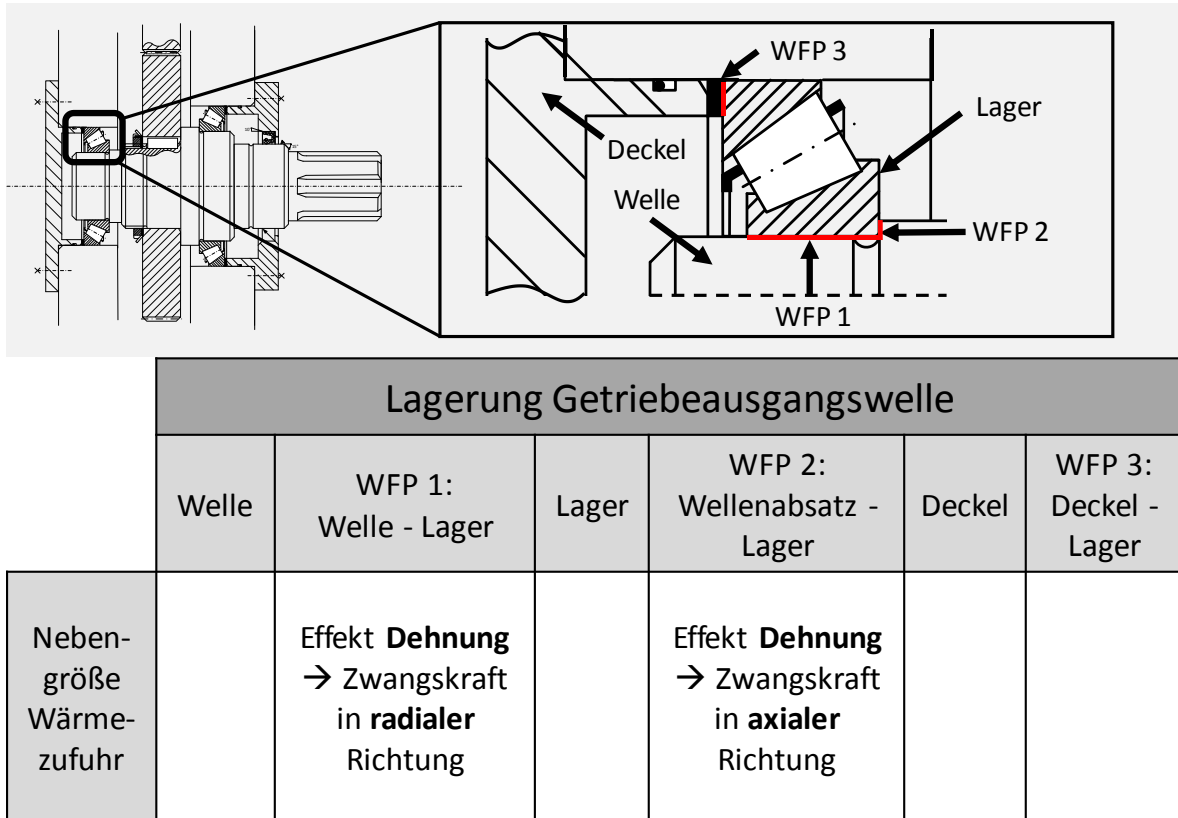


Abbildung 6-15: Abhängigkeitsmatrix am Beispiel einer Getriebewelle

6.2.4 Auswertung

Im letzten Schritt werden die identifizieren Stör- und Nebengrößen im Hinblick auf Relevanz ausgewertet, um daraus Strategien zur Integration in das Produktmodell ableiten zu können, siehe Abbildung 6-16.

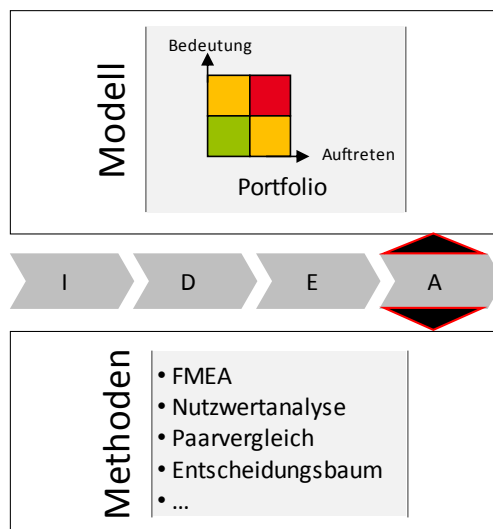


Abbildung 6-16: Auswertung

Zunächst werden dazu auftretende Stör- und Nebengrößen in einem Portfolio abgebildet und priorisiert. Hierbei bietet es sich an, in Anlehnung an die Risikoprioritätszahl der Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) sowie der Bewertungsskala der VDI 2225 eine Bewertung von deren Bedeutung und Auftreten vorzunehmen und hierzu eine Punkteskala von 1 bis 10 zu verwenden²³⁵, siehe Abbildung 6-17. Dieses Vorgehen hat sich in der Produktentwicklung, vor allem im Bereich der Automobilindustrie, zur subjektiven Bewertung von Einflussgrößen bewährt²³⁶.

Das Auftreten bewertet hierbei die Wahrscheinlichkeit, dass eine Stör- oder Nebengröße in einem Lebenslaufprozess auftritt. Die Bedeutung lässt sich anhand der identifizierten Wirkung einer Stör- oder Nebengröße auf ein Bauteil oder Wirkflächenpaar im Hinblick auf deren Intensität bewerten. Durch die Verwendung des Maßstabes von 1 bis 10 wird eine hohe Differenzierung der Stör- und Nebengrößen in Bezug auf Bedeutung und Auftreten erreicht, was das Auswerten erleichtert.

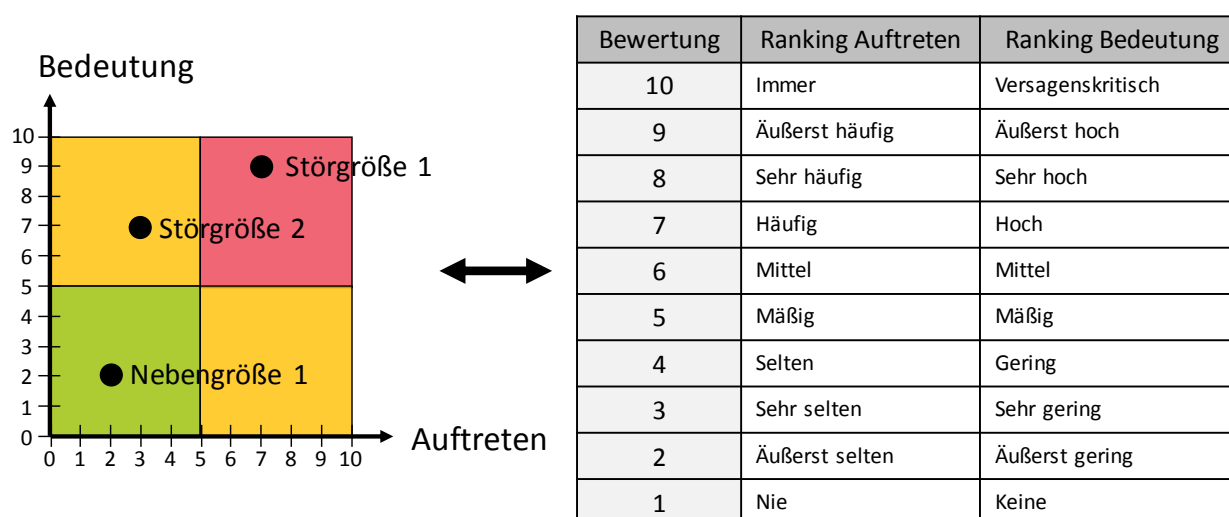


Abbildung 6-17: Bewertung der Stör- und Nebengrößen in einem Portfolio

Anschließend gilt es auf Basis der Priorisierung Strategien abzuleiten, wie mit den erkannten Wirkungen der Stör- und Nebengrößen bei der sich anschließenden Verifikation umgegangen wird. Prinzipiell hat der Entwickler die Möglichkeit, Annahmen bezüglich des festgelegten Betrachtungsrahmens, der Auswahl an Modellbausteinen, der Anpassung der Modellstruktur oder der festgelegten Ausprägung von

²³⁵ In Anlehnung an DIN ISO-Norm 60812 (2015), S. 22ff.; VDI-Richtlinie 2225-3 (1998), S. 4.

²³⁶ Vgl. Kirchner (2007), S. 607.

Produktmodellelementen die erkannten Stör- bzw. Nebengrößen in das Produktmodell zu integrieren, vergleiche Unterabschnitt 5.4.2.

Der mit der Anpassung von Annahmen verbundene Modellierungsaufwand nimmt dabei entlang des Modellerstellungsprozesses ab, beginnend beim Festlegen des Betrachtungsrahmens bis hin zur Festlegung der Ausprägung von Produktmodellelementen. Dies ist damit zu begründen, dass bei einer Erweiterung des Betrachtungsrahmens alle folgenden Modellierungsprozesse ebenfalls durchlaufen werden müssen, während die Anpassung der Ausprägung eines Produktmodellelements keine weiteren Arbeitsschritte zur Folge hat, vergleiche hierzu Unterabschnitt 5.4.1.

In Abhängigkeit von der Bewertung der Stör- und Nebengrößen sowie deren Lage im Portfolio lassen sich die nachfolgenden Strategien zur Anpassung von Annahmen ableiten:

- Bei einer Bewertung von Bedeutung und Auftreten der Stör- und Nebengrößen von $x < 5$ befinden diese sich im grünen Quadranten des Portfolios. Es sollte angestrebt werden, den Modellierungsaufwand aufgrund der geringen Bedeutung für die zu untersuchende Eigenschaft möglichst gering zu halten. Es empfiehlt sich daher, eine rekursive Überprüfung und Anpassung von Annahmen entlang des gesamten Produktmodellerstellungsprozesses vorzunehmen und somit bei der Anpassung der Ausprägung von Produktmodellelementen zu beginnen und nur bei Bedarf schrittweise die restlichen Sub-Prozesse in die Anpassung einzubeziehen.
- Bei einer Bewertung von Bedeutung und Auftreten der Stör- und Nebengrößen von $x > 5$ hingegen liegen diese im roten Quadranten des Portfolios. Es empfiehlt sich, eine vorwärts gerichtete Überprüfung der Annahmen vorzunehmen. Es gilt somit bei dem festgelegten Betrachtungsrahmen zu beginnen. Anschließend sollten die Modellbausteine im Hinblick auf den verwendeten Detaillierungsgrad überprüft und bei Bedarf erweitert oder ausgetauscht werden. Denkbar ist beispielsweise ein Übergang von einer quasistatischen hin zu einer dynamischen Betrachtung im Produktmodell. Anschließend gilt es darauf aufbauend die Modellstruktur sowie die festgelegten Ausprägungen der Modellelemente im Hinblick auf Konsistenz zu den bereits vorgenommenen Änderungen zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

- Befinden sich die Stör- und Nebengrößen hingegen im orangenen Quadranten des Portfolios obliegt es der Entscheidung des Entwicklers, ob er sich eher an der Strategie des roten oder des grünen Quadranten orientiert.

Um den Entwickler bei vorliegender Indifferenz zwischen mehreren möglichen Anpassungen von Annahmen zu unterstützen, bietet sich die Anwendung von *Entscheidungsmethoden* an. Beispielsweise lassen sich für die Integration einer Störgröße mehrere Modellierungsalternativen entwickeln und in einem *Endscheidungsbaum* gegenüberstellen. Mit Hilfe von Bewertungen wie dem *Paarvergleich* oder der *Nutzwertanalyse* können diese dann priorisiert und somit zur Entscheidungsunterstützung verwendet werden.²³⁷ Wichtig ist hierbei, die Anforderungen an das Produktmodell mit in die Bewertung einzubeziehen.

Die Anwendung der Strategien werden anhand des Beispiels in Abschnitt 6.3 sowie bei der Evaluation in Abschnitt 7.1 und 7.2 thematisiert.

Nachdem eine Strategie festgelegt worden ist, in welcher Form die Stör- und Nebengrößen in das Produktmodell integriert werden sollen, ist die Transformation der Prozess- auf die Produktmodellperspektive abgeschlossen.

6.3 Beurteilung des Nutzens der Methodik IDEA

Prinzipiell lässt sich der Nutzen der Methodik IDEA qualitativ oder quantitativ beurteilen.

Für eine quantitative Beurteilung besteht die Notwendigkeit, eine statistische Absicherung des Nutzens vorzunehmen. Hierzu müsste eine hinreichend große Anzahl an Personen die Ursache für eine bestehende Produktmodellunsicherheit untersuchen. Einem Teil der Personen wird die Methodik zur Verfügung gestellt, der andere Teil führt die Untersuchung ohne die Methodik durch. Anhand der Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Personengruppen ließe sich dann eine Schlussfolgerung im Hinblick auf den quantitativen Nutzen der Methodik ableiten und auch die Frage beantworten, ob der Entwickler auch ohne Methodik auf die Ursachen von Unsicherheit gekommen wäre. Der für eine statistisch abgesicherte Beurteilung notwendige Aufwand lässt sich jedoch in der Praxis nur schwer umsetzen²³⁸ und im

²³⁷ Vgl. Haberfellner, Daenzer (1992), S. 198ff.

²³⁸ Vgl. Weber (2012), S. 54f.

Rahmen des Forschungsprojekts aufgrund von begrenzten Ressourcen nicht zu realisieren.

Im Folgenden wird daher eine qualitative Bewertung des Nutzens der Methodik IDEA auf Basis der Ursache- Wirkungsbeziehung von Unsicherheit sowie dem Verständnis des Zusammenhangs von Verifikation und Validierung vorgenommen. Ausgangspunkt der Bewertung ist eine vorhandene Produktmodellunsicherheit, die im Rahmen einer Validierung erkannt und sich in einer Abweichung A_1 zwischen dem Ergebnis des Modells und einem Referenzwert äußert, siehe Abbildung 6-18.

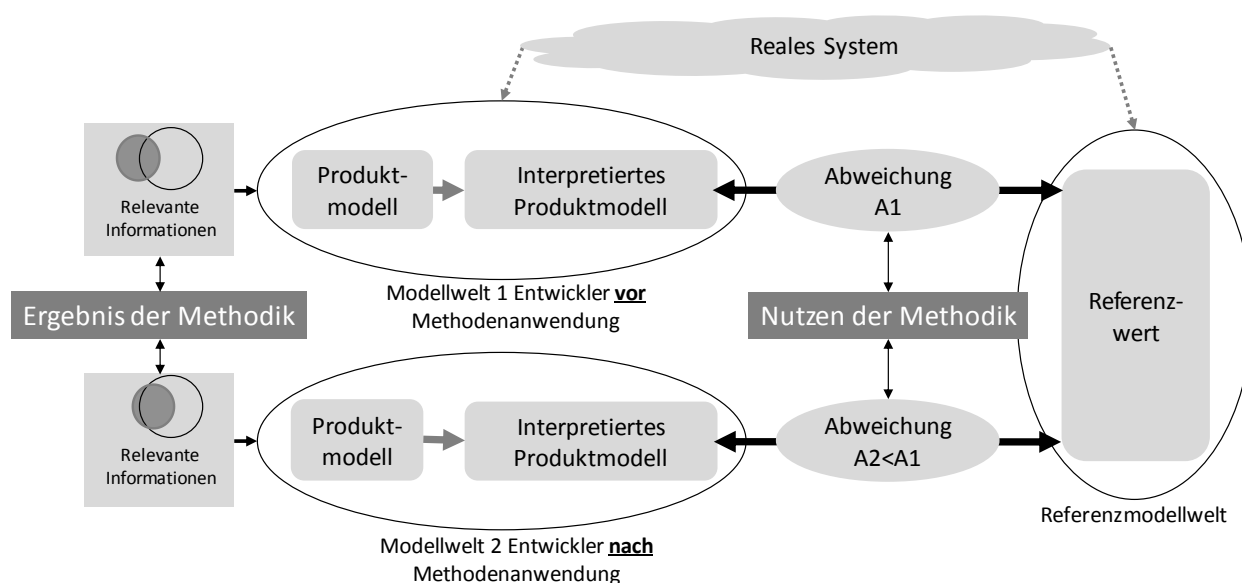


Abbildung 6-18: Bewertung des Nutzens der Methodik IDEA

Es wird davon ausgegangen, dass der Entwickler alle als relevant erachteten Informationen durch entsprechende Annahmen im Produktmodell abgebildet hat und dass bereits durchgeführte Verifikationen ohne die Anwendung der Methodik IDEA keine neuen Erkenntnisse geliefert haben. Der Entwickler stößt somit an die Grenze seiner eigenen Expertise und kann die Ursachen der Abweichungen innerhalb der eigenen Modellwelt, die sich in einer vorhandenen Produktmodellierungsunsicherheit äußert, nicht erklären.

Durch die Anwendung der Methodik werden dem Entwickler eine Vielzahl von Assoziationsmöglichkeiten bereitgestellt, durch die er sein Systemverständnis zum Lösen der gestellten Aufgabe zum einen vervollständigen und zum anderen im Hinblick auf bestehende Wirkungen schärfen kann. Gelingt es dem Entwickler, zusätzliche Erkenntnisse zu gewinnen, kann er seine eigene Modellwelt mit Hilfe von zusätzlichen, als relevant erachteten Informationen erweitern. Dadurch werden die

Ursachen von Produktmodellunsicherheit näher spezifiziert und darauf aufbauend getroffene Annahmen im Produktmodell entsprechend angepasst.

Somit lässt sich anhand der sich einstellenden Abweichung vor und nach der Anpassung des Produktmodells der Nutzen der Methodik bewerten. Findet eine Verringerung der bestehenden Produktmodellunsicherheit $A_2 < A_1$ statt, lässt sich die Anwendung der Methodik als erfolgreich ansehen und deren Nutzen anhand des prozentualen Zusammenhangs zwischen A_2 und A_1 bewerten, siehe Abbildung 6-18.

Die Durchführung der Methodik IDEA ist zwar aufwendig, sie bietet aber durch die für die einzelnen Vorgehensschritte bereitgestellten Checklisten die Möglichkeit, das Schärfen des Systemverständnisses strukturiert und damit im Hinblick auf die Fragestellung des Produktmodells zielorientiert durchzuführen. Das Ergebnis der ausgefüllten Matrix in Vorgehensschritt 3 wirkt zunächst naheliegend, liefert aber entscheidende Erkenntnisse über das Verhalten des untersuchten Produkts. Weiterhin stellt deren Identifikation keine Trivialität dar, was anhand der beiden Beispiele aus Abschnitt 1.1 erkennbar ist. Die Schwierigkeit besteht darin, bereits während der Produktentwicklung potentielle Versagen des Produkts zu erkennen. Anhand des Zündschlossbeispiels wird in Abschnitt 6.4 verdeutlicht, dass mit Hilfe der Methodik IDEA das Versagen des Zündschlosses bereits in der Produktentwicklung erkennbar gewesen wäre.

Die Methodik wird weiterhin in Abschnitt 7.1 und 7.2 an zwei Evaluationsbeispielen angewendet. Die gewonnenen Erkenntnisse der Anwendung werden in Kapitel 8 in die hier vorgenommene Bewertung des Nutzens mit einbezogen, um damit ein Fazit der gesamten Arbeit vornehmen zu können.

6.4 Beispielhafte Anwendung der Methodik IDEA

Im Folgenden wird am Zündschlossbeispiel aus Unterabschnitt 1.1.1 die Methodik IDEA angewendet. Hierbei wird auf dem erstellten Produktmodell aus Abschnitt 5.3 und der Fragestellung nach der notwendigen Federkraft zum Halten des Zündschlüssels in der *An*-Position aufgebaut.

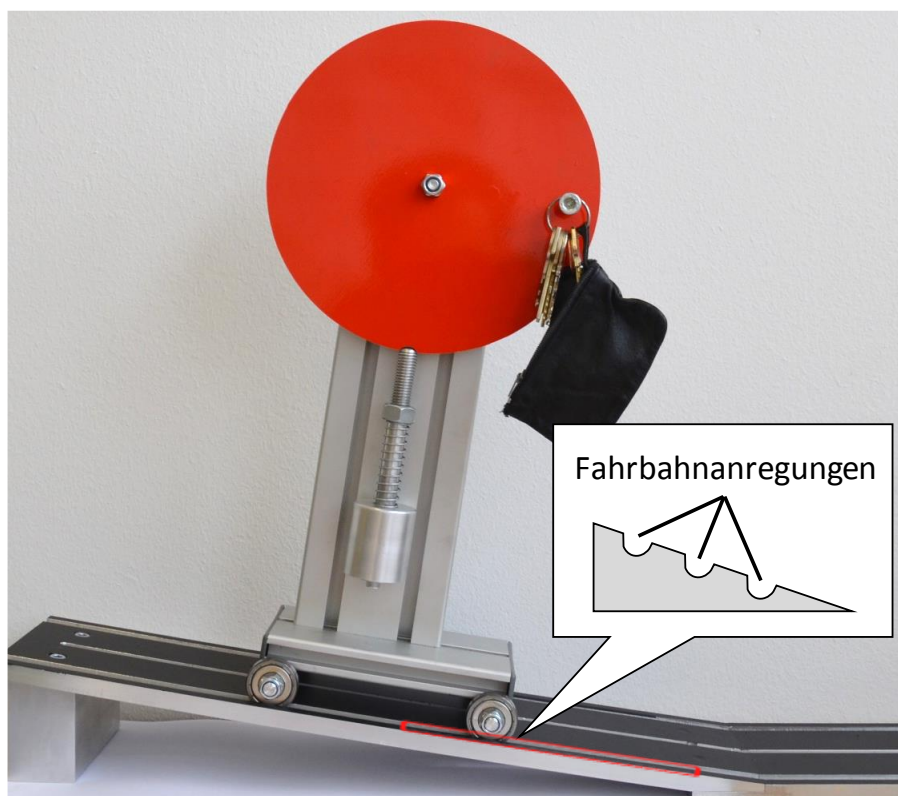


Abbildung 6-19: Fahrbahnanregung des Zündschlossdemonstrators

Mit Hilfe der Methodik soll demonstriert werden, dass das Versagen des Zündschlosses durch ein gezieltes Antizipieren von Lebenslaufprozessen bereits in der Entwicklung erkannt werden kann. Weiterhin wird gezeigt, wie das erstellte Produktmodell angepasst werden muss, um die gewonnenen Erkenntnisse der Methodikanwendung in die Modellierung zu integrieren und somit bei der Auslegung der Federkraft zu berücksichtigen.

Im ersten Schritt der Methodik werden Lebenslaufprozesse mit Hilfe einer Lebenslaufcheckliste nach ROTH identifiziert. Aus dem Bereich der Verwendung wird der Prozess *Fahrt über unebene Fahrbahn* festgelegt, da in diesem Prozess Einflüsse zu vermuten sind, die sich auf die Haltekraft des Stößels auswirken, siehe Abbildung 6-19.

Dieser Prozess wird im nächsten Schritt detailliert. Betrachtet wird die Scheibe des Zündschlosses, die sowohl im Anfangs- als auch im Endzustand keine Winkelbeschleunigung besitzt und sich somit in einer Ruheposition befindet. Unter Verwendung einer *Störgrößencheckliste* lässt sich u. a. die Störgröße *schlagartig angreifende Kraft* mit dem Prozess in Verbindung bringen, der aus einer Schlaglochdurchfahrt resultiert, auf den Anfangszustand des Operanden wirkt und dadurch den Prozess beeinflussen kann, siehe Abbildung 6-20.

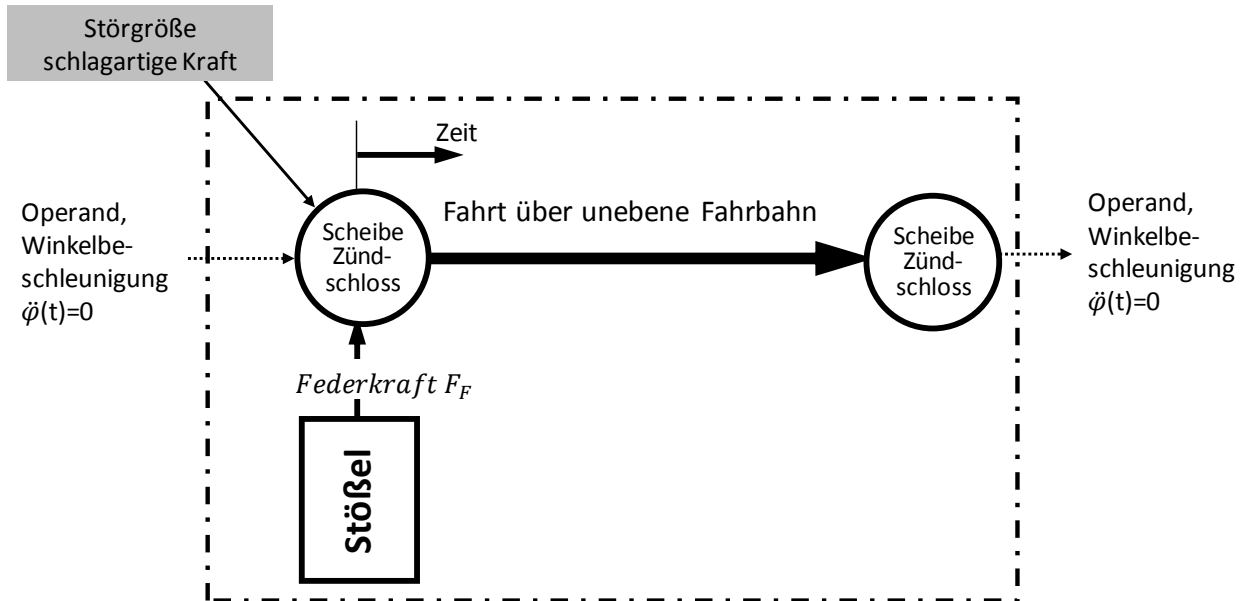


Abbildung 6-20: Prozessmodell Fahrt über unebene Fahrbahn

Anschließend wird die Wirkung der identifizierten Störgröße auf das Zündschloss abgeschätzt, indem sie den einzelnen Bauteilen des Zündschlosses in einer Abhängigkeitsmatrix gegenüber gestellt wird, siehe Abbildung 6-21.

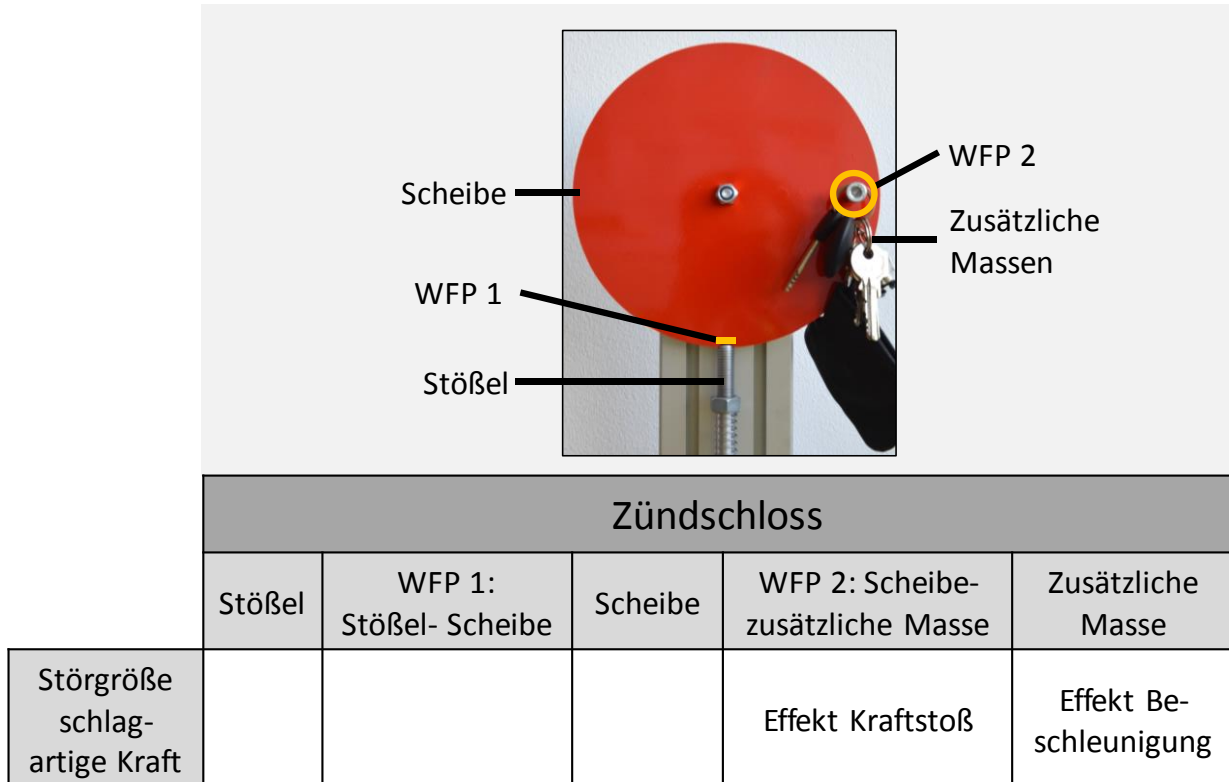


Abbildung 6-21: Abhängigkeitsmatrix des Zündschlosses

Es lässt sich mit Hilfe einer *Checkliste physikalischer Effekte* erkennen, dass die schlagartig angreifende Kraft zu einem *Kraftstoß* bzw. einem *Impuls* am WFP 2 führt, der durch die Schlaglochdurchfahrt in das Fahrzeug eingeleitet wird. Der Impuls beschleunigt die zusätzliche Masse am Zündschlüssel für eine kurze Zeit entgegengesetzt der Erdbeschleunigung. Anschließend fällt die Masse wieder in ihre Ausgangsposition zurück und leitet dabei einen Kraftstoß in die Scheibe ein, der entgegen die Haltekraft des Stößels wirkt. Der Stößel und die Scheibe hingegen werden durch die schlagartige Kraft nicht beeinflusst.

Im vierten Schritt der Methodik wird die erkannte Wirkung ausgewertet und es werden Maßnahmen abgeleitet, inwiefern die Störgröße in das Produktmodell integriert werden kann.

Zunächst lässt sich festhalten, dass der Störgröße eine hohe Auftrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann, da die Fahrt über eine unebene Fahrbahn in Realität häufig vorkommt. Die Bedeutung ist ebenfalls als hoch einzuschätzen, da der entstehende Kraftstoß aufgrund seiner entgegengesetzten Wirkung zur Haltekraft unmittelbar mit der Fragestellung nach notwendigen Federkraft des Stößels korreliert. Als Strategie zur Integration der Störgröße in das Produktmodell empfiehlt sich somit eine vorwärts gerichtete Anpassung von Annahmen, wie sie in Unterabschnitt 6.2.4 beschrieben worden ist.

Hierzu wird zunächst der Betrachtungsrahmen des bereits erstellten Produktmodells angepasst und der Kraftstoß als weiterer, relevanter Umwelteinfluss berücksichtigt. Anschließend werden die Modellbausteine um den Baustein *Impulssatz* erweitert, siehe Abbildung 6-22.

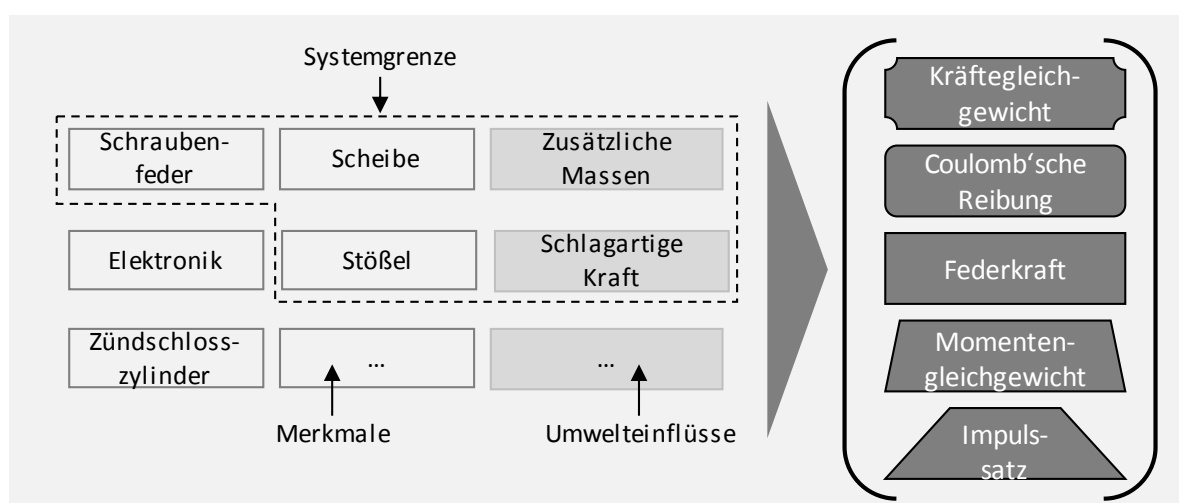


Abbildung 6-22: Anpassung von Betrachtungsrahmen und Modellbausteinen

Dadurch erweitert sich die Modellstruktur um eine weitere Kraftkomponente, die im Momentengleichgewicht berücksichtigt wird, siehe Abbildung 6-23.

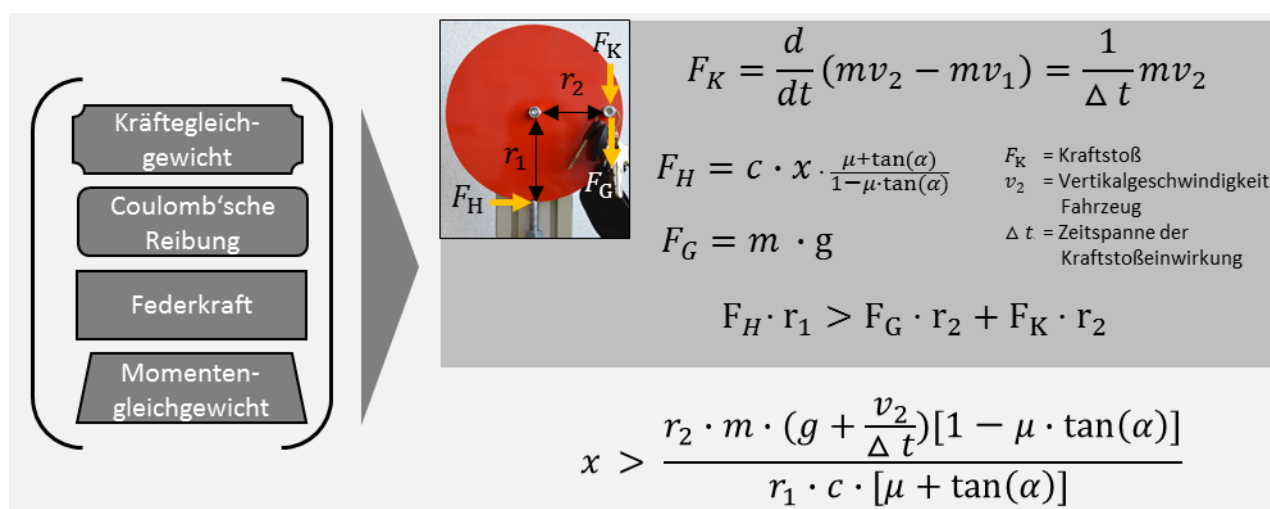


Abbildung 6-23: Anpassung der Modellstruktur des Zündschlosses

Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich die Scheibe des Zündschlosses auch nach Impulseinleitung nicht bewegt ($v_1=0$), wodurch sich der Impulssatz auf die Masse m und die Geschwindigkeit v_2 der Zusatzgewichte am Zündschlüssel sowie der Summe aller Kraftstöße in einem bestimmten Zeitraum reduziert. Geht man weiterhin davon aus, dass die Zeitspanne der Kraftstoßeinwirkung bekannt ist, lässt sich die Bestimmung des Kraftstoßes auf die mittlere Zeitspanne der Kraftstoßwirkung Δt vereinfachen. Die Geschwindigkeit der zusätzlichen Massen entspricht dabei näherungsweise der vertikalen Geschwindigkeit des Fahrzeugs bei der Schlaglochdurchfahrt, die Dämpfung wird vernachlässigt.

Abschließend wird die Ausprägung der Vertikalgeschwindigkeit zu $v_2 = 0,1 \frac{m}{s}$ angenommen, was in Realität einer Schlaglochdurchfahrt von etwa $10cm$ entspricht, und die der mittleren Zeitspanne der Kraftstoßeinwirkung zu $\Delta t = 0,1s$ festgelegt, woraus sich ein benötigter Federweg zum Halten des Zündschlüssels von $11,54mm$ ergibt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit Hilfe der Methodik die aus der Schlaglochdurchfahrt entstehende Kraftstoßwirkung auf das Zündschloss erkennen lässt. Das anfangs angenommene, statische Kräftegleichgewicht zur Bestimmung der Federkraft wurde um eine dynamische Komponente erweitert, wodurch die als relevant erachtete Informationsmenge gezielt vergrößert wurde, vergleiche Unterabschnitt 6.1.1 Somit konnte die Produktmodellierungsunsicherheit im Vergleich

zum berechneten Wert in Abschnitt 5.3 um etwa 10% verringert werden, da der Kraftstoß bei der Bestimmung der Federkraft nun berücksichtigt wird. Anhand dieser Erkenntnis lassen sich nun Maßnahmen zur Versagensvermeidung ableiten, wie beispielsweise eine Verringerung des Radius r_2 ²³⁹.

²³⁹ Vgl. Freund et al. (2016), S. 195ff.

7 Evaluation

Im Folgenden wird die Methodik IDEA am Beispiel der Auslegung eines Hydraulikmembranaktors sowie einer elektrischen Parkbremse angewendet und deren Ergebnisse erläutert. Anschließend wird dargelegt, inwiefern die Ergebnisse der Methodenanwendung die Auslegung der beiden Evaluationsbeispiele unterstützen.

7.1 Anwendung am Beispiel eines Hydraulikmembranaktors

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 805 wird am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt eine aktive Luftfeder entwickelt, siehe Abbildung 7-1.

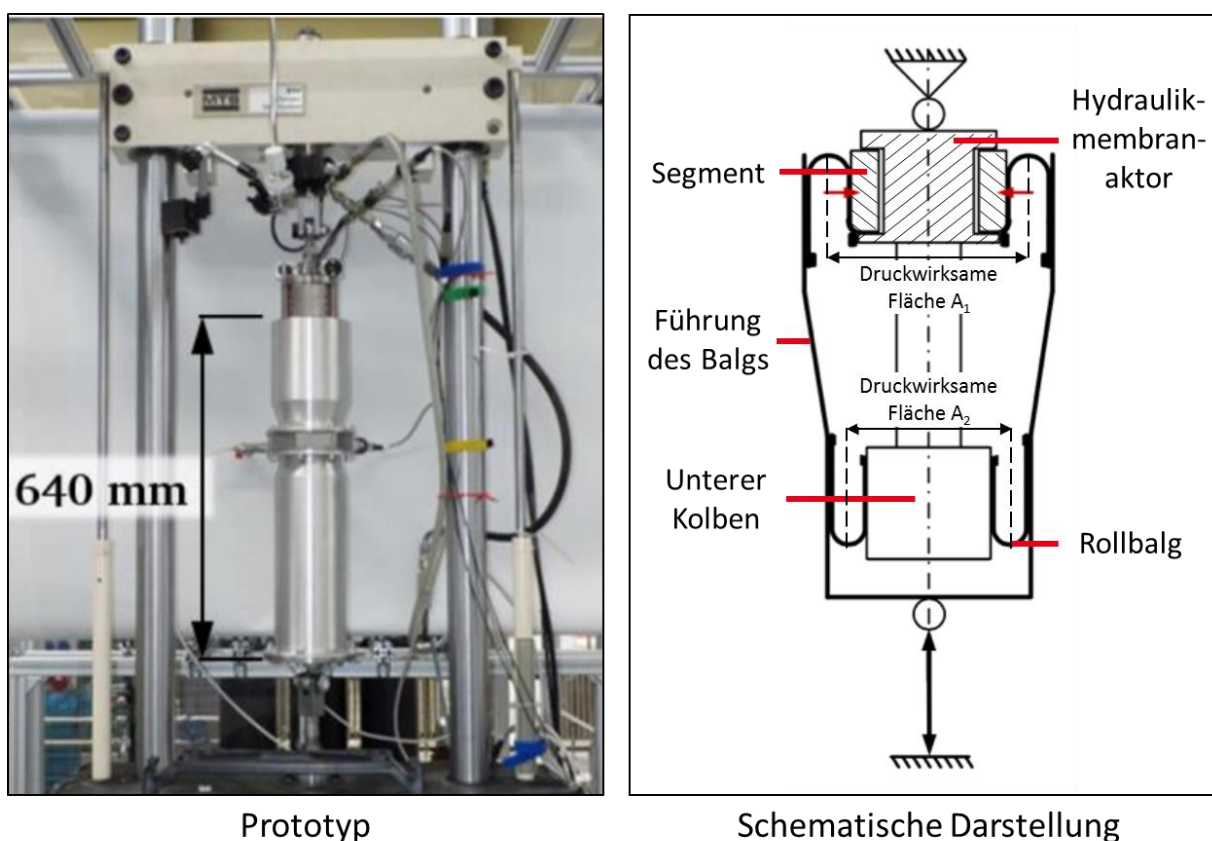


Abbildung 7-1: Aktive Luftfeder²⁴⁰

Mit deren Hilfe ist es möglich, die Pareto-Front zwischen Fahrkomfort und Fahrstabilität klassischer Feder-Dämpfersysteme in Kraftfahrzeugen durch eine einfederungsabhängige, aktive Anpassung der eingeleiteten Axialkraft zu verschieben²⁴¹. Dadurch können die Aufbaubeschleunigungen eines Rads auch bei unbekannter

²⁴⁰ Vgl. Hedrich et al. (2016), S. 573.

²⁴¹ Vgl. Hedrich et al. (2015), S. 63ff.

Anregung von der Fahrbahn reduziert werden, wodurch der Fahrkomfort unter sonst gleichbleibender Fahrsicherheit erhöht und ein Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit geleistet wird.

Die aktive Luftfeder besteht aus einem innenliegenden, doppelt wirkenden Kolben, der außen geführt ist und auf dem sich ein Rollbalg beim Ein- und Ausfedern abrollt. Das sich einstellende Gasvolumen wird hierbei unter Druck gesetzt und wirkt damit als Luftfeder.

Im oberen Kolben ist ein Hydraulikmembranaktor integriert. Dieser besteht aus vier Segmenten, die mit Hilfe von Querpressverbänden mit je zwei Kolbenstangen verbunden sind, siehe Abbildung 7-2.

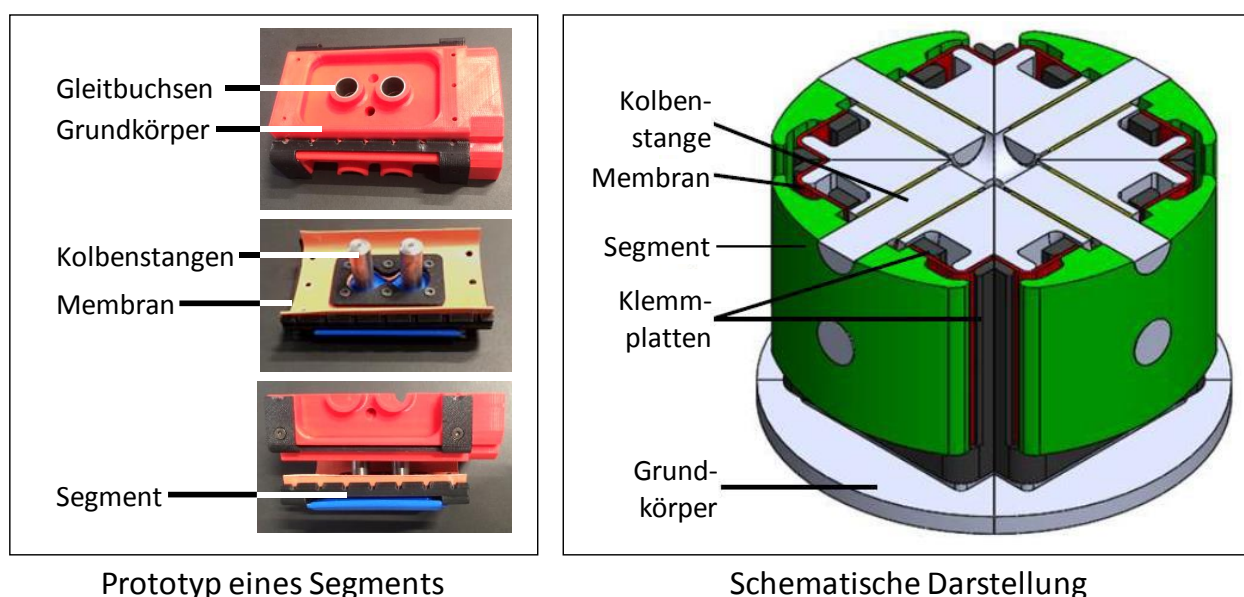


Abbildung 7-2: Hydraulikmembranaktor²⁴²

Die Kolbenstangen werden in Gleitbuchsen geführt, die im Grundkörper des Aktors eingepresst sind und dadurch als Lager für die Segmente fungieren. Die Klemmplatten dienen zur Fixierung einer Membran mit dem Grundkörper und den Segmenten. Zwischen diesen beiden Bauteilen entsteht ein Kammervolumen, das mit Hydrauliköl als Druckmedium befüllt wird. Die vier Segmente sind parallel geschaltet und teilen sich somit eine gemeinsame Kammer mit einer Zuleitung. Durch Betätigung des Aktors wird eine hydraulische Kraft F aufgebracht, wodurch die Segmente radial verfahren können. Dadurch lässt sich die druckwirksame Fläche A_1 anpassen, was wiederum die Axialkraft der Luftfeder verändert.

²⁴² In Anlehnung an Hedrich et al. (2016), S. 573.

7.1.1 Problemstellung

Zur Abschätzung der Dynamik der aktiven Luftfeder bei verschiedenen Anregungen werden im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses Hardware in the Loop Versuche durchgeführt. Zur Auswertung der Ergebnisse bestand u. a. die Notwendigkeit, die Nachgiebigkeit des Hydraulikmembranaktors in radialer Richtung zu bestimmen.

Hierzu wurde zunächst die Systemgrenze um den gesamten Aktor gelegt und der Modellbaustein *Druckaufbaugleichung* festgelegt, um den Hydraulikmembranaktor in einem Produktmodell abzubilden und damit die Nachgiebigkeit abschätzen zu können, siehe Abbildung 7-3.

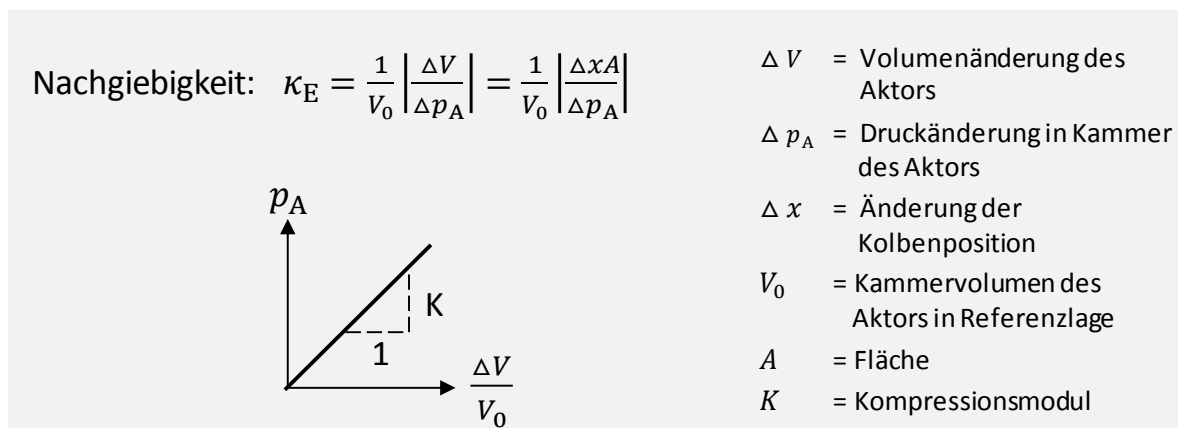
<p>Druckaufbaugleichung: $\kappa_E V_0 \frac{dp}{dt} - Q_A + \dot{x}_K A = 0$</p> <p>Nachgiebigkeit: $\kappa_E = \frac{1}{\rho A} \left(\frac{d\rho A}{dp} \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dp} \right) + \frac{1}{A} \left(\frac{dA}{dp} \right)$</p> <p>Kompressionsmodul: $K = \frac{1}{\kappa_E}$</p>	<p>Anteil Flüssigkeit</p> <p>Anteil Aktor</p>	<p>V_0 = Kammervolumen des Aktors in Referenzlage</p> <p>p = Druck</p> <p>Q_A = Volumenstrom Hydraulikmembranaktor</p> <p>\dot{x}_K = Kolbengeschwindigkeit in Referenzposition</p> <p>A = Fläche (entspricht Fläche A_K in Abbildung 7-1)</p> <p>ρ = Dichte des Druckmediums</p>
--	---	---

Abbildung 7-3: Druckaufbaugleichung

Die Nachgiebigkeit wurde in der *Druckaufbaugleichung* mit Hilfe des Parameters κ_E beschrieben, der sich aus der Nachgiebigkeit der Flüssigkeit, hier die des Hydrauliköls, und der Nachgiebigkeit des Aktors selbst zusammensetzt.

In einer ersten Näherung wurde, ausgehend von einer bestehenden Ölmenge im Kammervolumen V_0 des Aktors, vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Positionsänderung Δx des Kolbens in radialer Richtung mit zunehmenden Aktordruck p_A im gleichen Maße verändert. Auf Basis dieser Annahme konnte unter Verwendung des Modellbausteins *Druckaufbaugleichung* eine Modellstruktur erstellt werden, die einen linearen Zusammenhang zwischen Aktordruck p_A und dem Volumen in der Kammer abbildet. Die Modellstruktur wird anschließend in einem Graph ausgewertet, der den Aktordruck p_A der Volumenänderung $\Delta V/V_0$ gegenüberstellt, siehe Abbildung 7-4.

Anhand der Steigung des Graphen lässt sich das Kompressionsmodul K ablesen und somit auch die Nachgiebigkeit κ_E bestimmen, die im vorliegenden Fall konstant ist.

Abbildung 7-4: Produktmodell zur Nachgiebigkeitsbestimmung²⁴³

Um das erstellte Produktmodell validieren zu können, wurde am Prototyp des Hydraulikmembranaktors der Zusammenhang zwischen Aktordruck und Volumenänderung mit Hilfe einer experimentellen Untersuchung bestimmt. Hierzu wurde der Aktordruck p_A in der Luftfeder schrittweise auf 30 bar erhöht, anschließend wieder reduziert und die hierbei entstehende Volumenänderung im Aktor gemessen, siehe Abbildung 7-5.

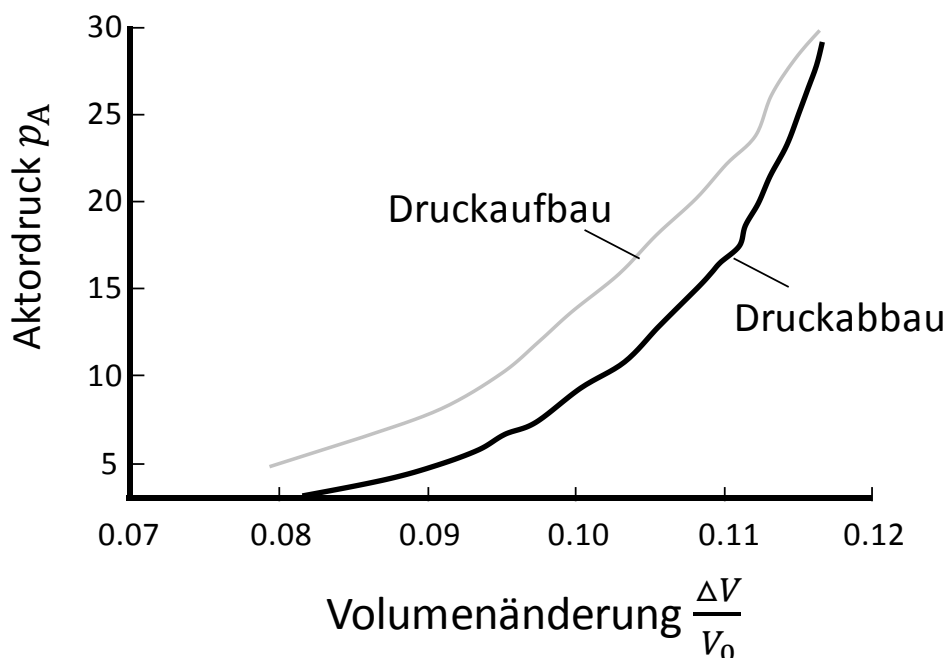


Abbildung 7-5: Nachgiebigkeitsbestimmung am Prototypen

²⁴³ Vgl. Findeisen (2006), S. 481ff.

Es konnte festgestellt werden, dass sich u. a. eine Hysterese zwischen Druckaufbau und Druckabbau sowie ein Knick der beiden Kurven ab etwa 20 bar einstellt und die bisher vermutete Erkenntnis einer konstanten Nachgiebigkeit hinfällig ist.

Als Ursache für die vorhandene Produktmodellunsicherheit wird vermutet, dass die Nachgiebigkeit der Membran selbst die Abweichung zwischen den Ergebnissen des Produktmodells und der experimentellen Untersuchung verursacht. Eine detaillierte Identifikation der Ursachen für die bestehende Abweichung ist bisher jedoch noch nicht erfolgt.

Um bei der Analyse von weiteren Ursachen zu unterstützen, wurde die Methodik IDEA angewendet mit dem Ziel, weitere relevante Informationen zur Nachgiebigkeitsbestimmung des Aktors zu identifizieren und damit das erstellte Produktmodell sowie die Nachgiebigkeitsbestimmung zu verifizieren.

7.1.2 Anwendung der Methodik und Auswertung der Ergebnisse

Im Rahmen des ersten Vorgehensschritts der Methodik IDEA wurden unter Verwendung der Lebenslaufcheckliste nach ROTH relevante Lebenslaufprozesse identifiziert, die der Entwickler mit der Nachgiebigkeitsbestimmung des Hydraulikmembranaktors in Verbindung bringen konnte. Hierbei wurden die Kategorien *Teilefertigung* und *Montage* der Checkliste als relevant erachtet.

Bei der *Teilefertigung* konnte der Prozess *Zuschnitt der Membran* als relevant erachtet werden, in dem der Entwickler die Membran händisch zuschneidet. Hierbei sind die Sorgfältigkeit des Zuschnitts sowie die Wahl des Teilstücks entscheidend, da das Rohmaterial hinsichtlich seiner strukturellen Beschaffenheit Schwankungen aufweist. Aufbauend auf diesem Prozess konnte bei der *Montage* der Prozess *Vorspannen der Membran* identifiziert werden. In diesem Prozess wird die Membran zwischen Grundkörper und Segment fixiert und vorgespannt. Je nach Beschaffenheit der verwendeten Membran in Bezug auf Zuschnitt und struktureller Beschaffenheit schwankt die Vorspannung der Membran im montierten Zustand, was sich wiederum auf die Nachgiebigkeit des gesamten Aktors auswirkt.

In der *Montage* ist weiterhin der Prozess *Entlüftung des Hydraulikmembranaktors* von Bedeutung. In diesem Prozess wird, nachdem der Aktor mit Öl befüllt worden ist, die verbleibende Luft durch Rütteln aus dem System befördert. Falls eine Restmenge an Luft im System verbleibt, beeinflusst dies die Nachgiebigkeit des Aktors deutlich.

Im zweiten Vorgehensschritt wurden die identifizierten Prozesse *Zuschnitt der Membran*, *Vorspannen der Membran* und *Entlüftung des Hydraulikmembranaktors* unter Verwendung des Prozessmodells nach HEIDEMANN und der *Störgrößencheckliste* nach MATHIAS detailliert.

Im Folgenden werden aus Übersichtlichkeitsgründen nur die Ergebnisse des Entlüftungsprozesses vorgestellt, da dieser von besonderer Bedeutung für den weiteren Verlauf der Methodik ist und der Einfluss der restlichen Prozesse auf die Nachgiebigkeit nach Vollendung der Methodik als vernachlässigbar beurteilt wurden.

Ausgangszustand des betrachteten Prozesses ist der Aktor, der unmittelbar nach dem Befüllen mit Öl entlüftet wird. Der Entwickler selbst ist, wie in Abbildung 7-6 dargestellt, in diesem Prozess der Operator und beschleunigt das System in vertikale und in horizontale Richtung.

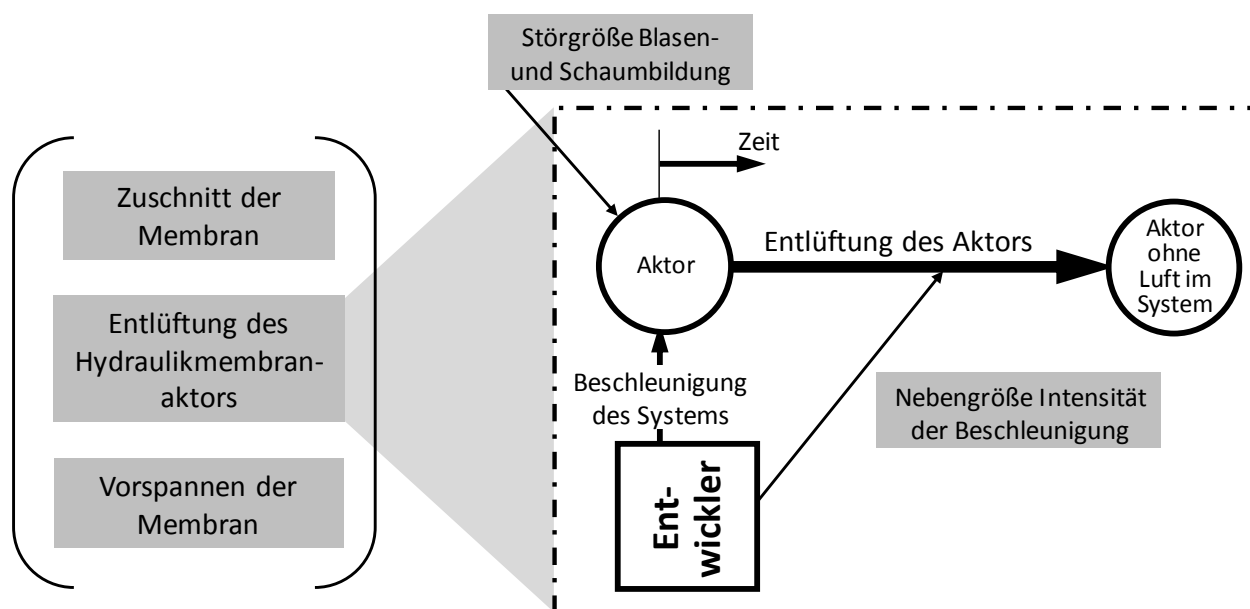


Abbildung 7-6: Detaillierte Betrachtung des Entlüftungsprozesses des Aktors

Dadurch stellt er eine Energie als Wirkgröße bereit, mit deren Hilfe die enthaltenen Luftblasen aufsteigen und somit der Aktor in den Endzustand des Prozesses transformiert wird.

Als Störgröße auf den Anfangszustand konnte u. a. eine *Blasen- und Schaumbildung* identifiziert werden, die aufgrund des vorangegangenen Ölbefüllungsprozesses in das System eingebracht wird. Die Störgröße erschwert das angestrebte Entlüften und erhöht die Gefahr, dass Luftblasen im System verbleiben. Weiterhin wirkt die *Intensität der Beschleunigung* als Nebengröße, da es bei einer zu stark ausgeprägten

Beschleunigung zu einer weiteren Blasen- und Schaumbildung im System kommen kann und somit die Wirkung der Störgröße verstärkt wird.

Im dritten Vorgehensschritt wurde die Störgröße *Blasen- und Schaumbildung* und die Nebengröße *Intensität der Beschleunigung* den Bauteilen des Hydraulikmembranaktors in einer Abhängigkeitsmatrix gegenübergestellt siehe Abbildung 7-7. Neben den Bauteilen wird das Hydrauliköl selbst als weitere Leitstützstruktur berücksichtigt, dass während des Druckaufbaus zu allen aufgeführten Bauteilen ein Wirkflächenpaar ausbildet. Der Übersichtlichkeit halber ist nur das Wirkflächenpaar zwischen der Innenseite des Segments und dem Hydrauliköl in der Matrix dargestellt.

		Hydraulikmembranaktor					
		Membran	Führungsbolzen	Innenseite Segment	WFP Innenseite Segment - Fluid	Fluid	Gehäuseaußenseite
Stör- und Nebengrößen	Schaum- und Blasenbildung				Effekt <i>Auftrieb</i> – Rückstände von Schaum und Blasen in der Hinterschneidung		
	Intensität Beschleunigung				Effekt <i>Auftrieb</i> – Verstärkende Wirkung von Schaum- bzw. Blasenrückständen in der Hinterschneidung		

Abbildung 7-7: Effekt- und Wirkungsabschätzung von Stör- und Nebengrößen

Unter Zuhilfenahme einer *Checkliste physikalischer Effekte* wurden Beeinflussungen zwischen den Störgrößen und dem Aktor untersucht, um Wirkungen abschätzen zu können. Das Aufsteigen von Luftblasen lässt sich mit Hilfe des physikalischen Effekts *Auftrieb* beschreiben. Hierbei handelt es sich um eine der Erdanziehungskraft entgegengesetzte Kraft die dafür sorgt, dass die Luftblasen aufsteigen können. Bezieht man diesen Vorgang auf das Wirkflächenpaar *Innenseite Segment - Fluid*, lässt

sich erkennen, dass eine Hinterschneidung an der Innenseite des Segments das Aufsteigen von vorhandenem Schaum und Blasen in diesem Bereich verhindert. Es kommt somit zu Rückständen in der Hinterschneidung, die während der bisherigen Durchführung des Entlüftungsprozesses nicht aus dem System befördert werden. Diese Wirkung wird bei einer zu hohen Intensität der Beschleunigung des Aktors noch verstärkt.

Im vierten Vorgehensschritt wurde die erkannte Wirkung der Störgröße ausgewertet. Da das Befüllen des Aktors mit Öl bei der Inbetriebnahme des Prototypen bisher Probleme bereitete, wurde das Auftreten von Schaum- oder Blasenbildung im Aktor als wahrscheinlich eingestuft und mit *häufig* bewertet. Die Bedeutung der Störgröße wurde ebenfalls als *sehr hoch* bewertet, da eine verbleibende Menge an Schaum oder Blasen einen Lufteinschluss darstellen und sich somit in besonders großem Maße auf die Nachgiebigkeit auswirkt. Es konnte somit eine wichtige, relevante Information identifiziert werden, die vor der Anwendung der Methodik nicht im Fokus der Auslegung stand.

Die vorgenommene Bewertung ordnet die Störgröße in den kritischen Bereich des Portfolios ein, wodurch eine vorwärts gerichtete Verifikation der getroffenen Annahmen des Produktmodells empfohlen wird. Die Schaum- und Blasenbildung wird daher als weiterer Umwelteinfluss mit in die Systemgrenze aufgenommen. Der gewählte Modellbaustein *Druckaufbaugleichung* wurde beibehalten, da er sich zur Abbildung des neuen Elements des Systems eignet. Die festgelegte *Modellstruktur* hingegen wurde angepasst und die Störgröße in Form eines *Störvolumens* im Produktmodell berücksichtigt.

Nachdem die Annahmen des Produktmodells aufgrund der neu gewonnenen, relevanten Information angepasst wurden, ist die sich neu einstellende, theoretisch bestimmte Nachgiebigkeit abgeschätzt worden. Hierbei konnte festgestellt werden, dass deren Abweichung von der experimentell bestimmten Nachgiebigkeit verkleinert werden konnte. Durch die Anwendung der Methodik konnte somit eine Ursache für die bestehende Abweichung von Produktmodell und experimenteller Untersuchung identifiziert und berücksichtigt werden.

Der Hauptnutzen der Methodikanwendung bei diesem Beispiel liegt in der Verknüpfung eines für sich betrachteten, naheliegenden Zusammenhangs zwischen Luftblasen und Auftrieb mit der zu lösenden Aufgabe, die Nachgiebigkeit des Aktors abzuschätzen. Durch die erkannte Verknüpfung konnte ein Mehrwert für die wei-

tere Auslegung des Aktors generiert werden. Zum einen wurde die bestehende Produktmodellunsicherheit reduziert, wodurch das Produktmodell die Realität genauer abbildet. Die Verknüpfung kann zum anderen als Anlass verwendet werden, um an dem Aktor konstruktive Anpassungen vorzunehmen, beispielsweise durch eine Abrundung der Hinterscheidung bei gleichzeitiger Anpassung des Entlüftungsprozesses.

7.2 Anwendung am Beispiel einer elektrischen Parkbremse

Untersuchungsgegenstand des zweiten Evaluationsbeispiels ist eine von Continental entwickelte, elektrische Parkbremse. Sie zählt als Teil des Bremssystems zu den sicherheitsrelevanten Systemen im Kraftfahrzeug und muss somit unter allen denkbaren Umweltbedingungen und Störeinflüssen eine festgelegte Spannkraft in einer bestimmten Zeitspanne erzeugen können.

Bei der Parkbremse handelt es sich um eine integrierte Faustsattelbremse, die über einen Gleichstrommotor und ein zweistufiges Schneckengetriebe angetrieben wird. Beide Komponenten zusammen werden als Motor-Gear-Unit bezeichnet, die einen Kugelgewindetrieb antreibt. Der Kugelgewindetrieb ist in einem Kolben drehfest gelagert und drückt diesen bei Betätigung der Parkbremse gegen die Bremsbeläge, siehe Abbildung 7-8. Dadurch wird die benötigte Spannkraft zum Blockieren der Bremse während des Parkens des Fahrzeugs erzeugt.

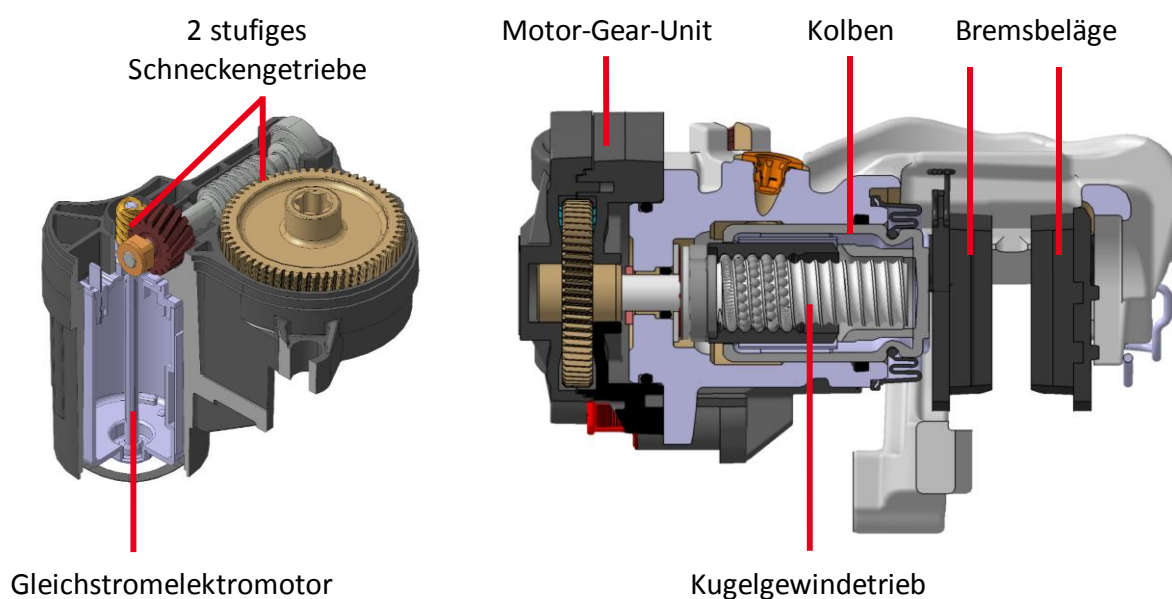


Abbildung 7-8: Integrierte Faustsattelbremse von Continental

7.2.1 Problemstellung

Zur Auslegung der einzelnen Komponenten der Parkbremse wurde während des Entwicklungsprozesses u. a. ein Simulationsmodell entwickelt, mit dessen Hilfe sich die von der Parkbremse bereitgestellte Spannkraft in Abhängigkeit von der benötigten Zeitdauer der Kraftaufbringung analysieren lässt. Bisher wurden Zuspandynamik und Spannkraft im Simulationsmodell hauptsächlich unter Nominalbedingungen untersucht, in der u. a. von einer gleichbleibenden Umgebungstemperatur sowie konstanten Reibwerten ausgegangen wird.

Zur Vorbereitung auf die nächste Produktgeneration der Parkbremse bestand der Bedarf, das bestehende Simulationsmodell zu erweitern, um damit bei der Untersuchung von Spannkraft und Spandauer auch Abweichungen von den Nominalbedingungen berücksichtigen zu können. Hierbei soll der Temperatureinfluss auf das System Parkbremse in den Fokus gestellt werden, da dieser bei der Auslegung nicht im Detail analysiert und somit unter Verwendung von höheren Sicherheitsbeiwerten bei der Auslegung berücksichtigt wurde.

Um die Erweiterung des Simulationsmodells strukturiert durchzuführen und gezielt Schwerpunkte bei der Integration von abweichenden Nominalbedingungen der Temperatur setzen zu können, wurde die Methodik IDEA angewendet. Unter Berücksichtigung dieses angepassten Zwecks des Simulationsmodells wird durch die Methodik eine systematische Identifikation von relevanten Einflüssen aus dem Lebenslauf der Parkbremse vorgenommen, die anschließend ausgewertet und durch Anpassen von Annahmen in das bestehende Simulationsmodell integriert werden.

7.2.2 Anwendung der Methodik und Auswertung der Ergebnisse

Im ersten Vorgehensschritt wurden zunächst Einsatzszenarien der Parkbremse festgelegt, in denen große Abweichungen von den Nominalbedingungen des Temperatureinflusses auftreten können. Hierbei konnten unter Verwendung einer Lebenslaufcheckliste drei relevante Nutzungsprozesse festgelegt werden, die den Betrachtungsrahmen der Methodik darstellen, siehe Abbildung 7-9.

Der Prozess *Zuspannen bei Mindesttemperatur* wurde gewählt, da laut Anforderung die Funktion der Parkbremse bis zu einer Umgebungstemperatur von -40°C gewährleistet werden muss. Weiterhin ist bekannt, dass sich hierbei die Viskosität des Schmierfetts erhöht und somit die Reibwerte ebenfalls deutlich ansteigen. Dies kann gegebenenfalls zu einer Erhöhung der Zeitdauer des Zuspandvorgangs führen.

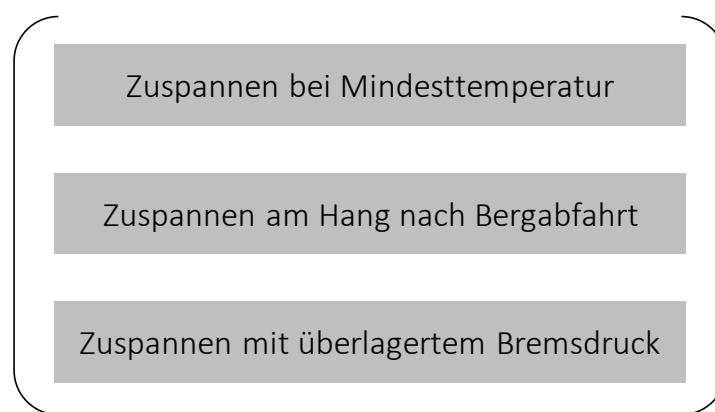


Abbildung 7-9: Relevante Nutzungsprozesse der Parkbremse

Da sich die Bremsscheibe und die Beläge nach einer Bergabfahrt in Abhängigkeit vom Bremsverhalten des Fahrers auf bis zu 600°C erwärmen können und dadurch Einflüsse auf das Zuspannverhalten der Parkbremse zu erwarten sind, wurde der Prozess *Zuspannen am Hang nach Bergabfahrt* ebenfalls als relevant erachtet. Auch hier wird von einem Einfluss auf die Reibverhältnisse in der Parkbremse ausgegangen.

Weiterhin wird der Prozess *Zuspannen mit überlagertem Bremsdruck* betrachtet, da die Bremsscheibe samt Bremsbelägen gleichzeitig durch die hydraulische Bremsanlage und die Parkbremse belastet wird (die hydraulische Bremsanlage ist in Abbildung 7-8 nicht dargestellt). Durch die Selbsthemmung der Parkbremse kann der Kolben, nachdem der hydraulische Bremsdruck wieder gelöst wird, nicht mehr zurückfahren. Dadurch können hohe Spannkräfte entstehen, die im Extremfall auch die zulässigen Festigkeitswerte des Bremssattels überschreiten können.

Im nächsten Vorgehensschritt werden alle als relevant erachteten Nutzungsprozesse detailliert und unter Verwendung von Checklisten auftretende Störgrößen identifiziert. Von besonderer Bedeutung für die folgenden Vorgehensschritte der Methodik ist der Prozess *Zuspannen am Hang nach Bergabfahrt*, auf deren Detaillierung und Auswertung auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit fokussiert wird²⁴⁴.

Hierbei konnte die Störgröße *Stauwärme* als besonders relevant identifiziert werden, siehe Abbildung 7-10.

²⁴⁴ Die Detaillierung und Auswertung der restlichen Lebenslaufprozesse können in Schulze (2017), S. 28ff. nachgelesen werden.

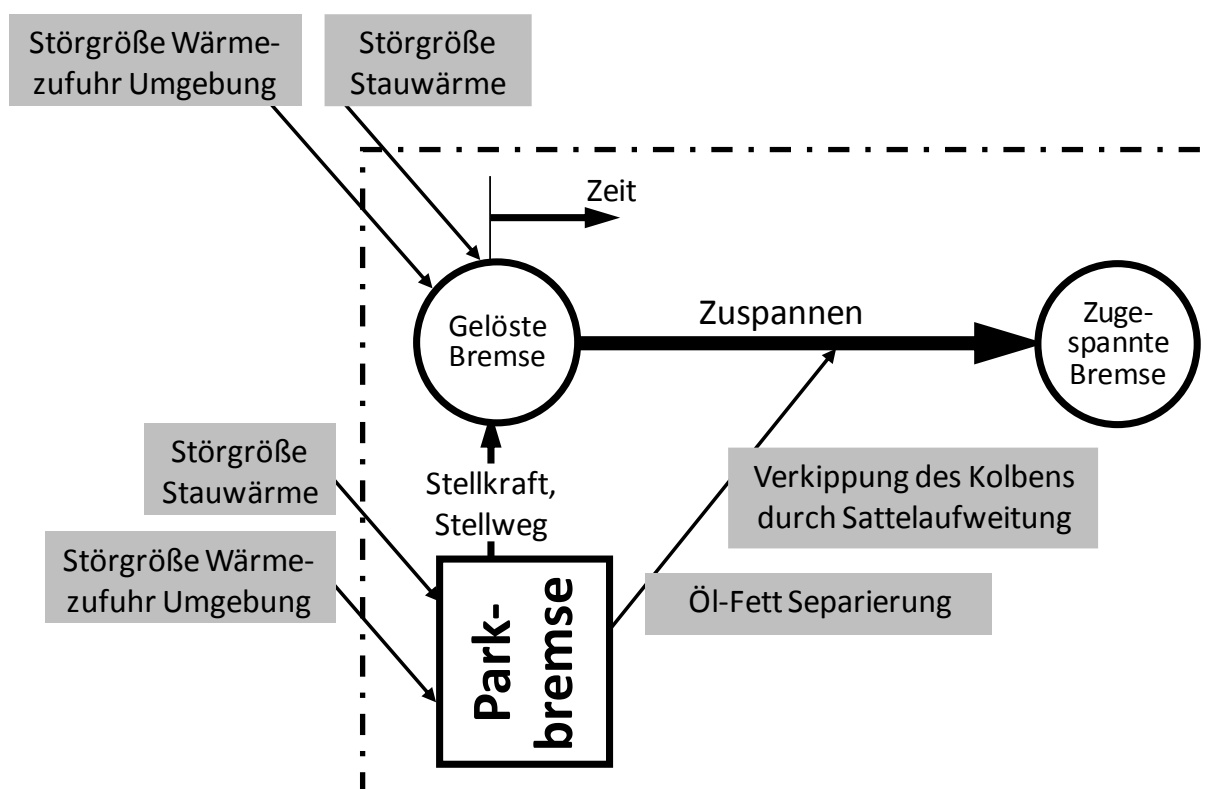


Abbildung 7-10: Detaillierung des Zuspannprozesses nach einer Bergabfahrt

Die *Stauwärme* resultiert aus der Abwärme der Brems Scheibe, die sich aufgrund der betrachteten Bergabfahrt in einem heißen Zustand befindet. Sie wirkt zum einen auf den Anfangszustand des Prozesses, wodurch es zu einer Aufweitung des Sattels kommen kann. Zum anderen wirkt die *Stauwärme* auf die Parkbremse selbst. Hierdurch kommt es neben einer Änderung des spezifischen Widerstands sowie der Remanenzflussdichte des Gleichstrommotors zum Auftreten der Nebengröße *Öl-Fett Separierung* des Schmierstoffs, die die Reibungsverhältnisse in der gesamten Parkbremse verändert und dadurch den Zuspannprozess beeinflusst. Weiterhin kann durch die Aufweitung des Sattels die Nebengröße *Verkipfung des Kolbens* auftreten, die die Positionierung des Kolbens zu der Brems Scheibe verändern kann und dadurch ebenfalls den Zuspannprozess beeinflusst. Verstärkt wird der Einfluss der *Stauwärme* durch die Störgröße *Wärmeezufuhr aus der Umgebung*.

Im nächsten Schritt werden die erkannten Störgrößen im Hinblick auf eine Wirkung auf die Parkbremse ausgewertet. Hierzu wurde zunächst die Parkbremse mit Hilfe eines Contact und Channel Modells dargestellt, siehe Abbildung 7-11.

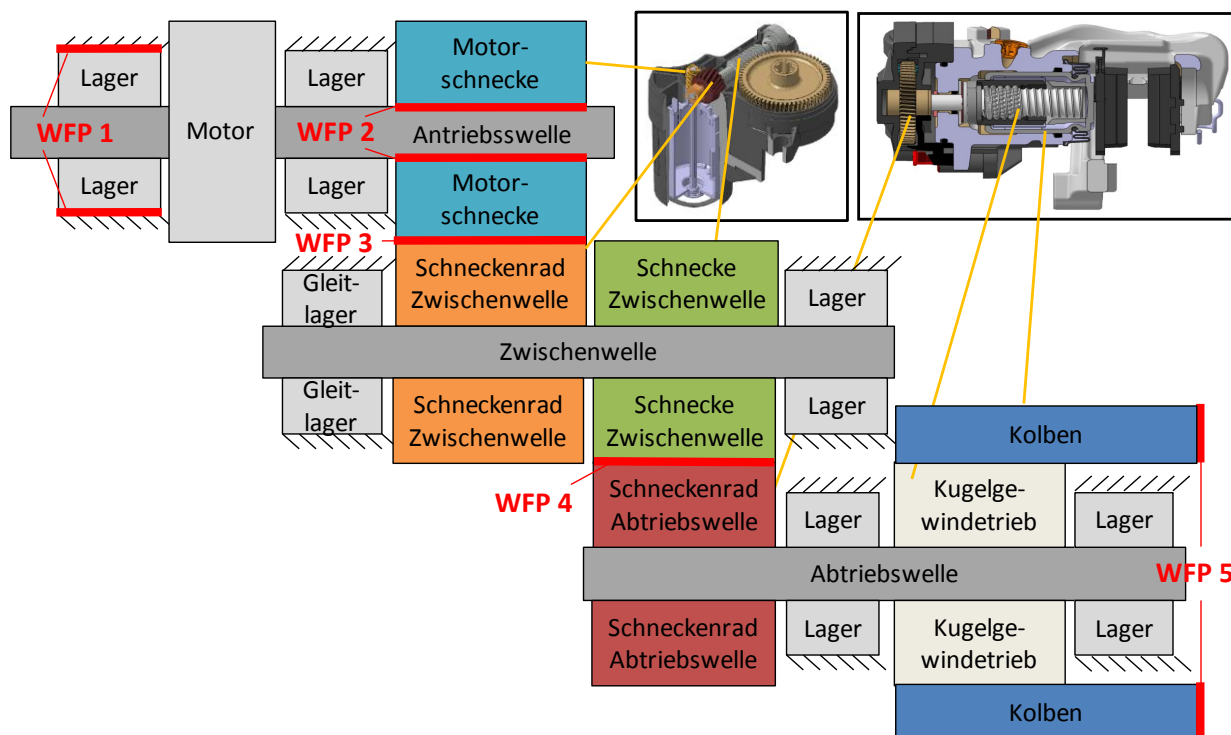


Abbildung 7-11: Contact und Channel Modell der Parkbremse

Anschließend wurden Bauteile und Wirkflächenpaare den Stör- und Nebengrößen in einer Abhängigkeitsmatrix gegenübergestellt und mit Hilfe einer Checkliste physikalischer Effekte Wirkungen jeweils spaltenweise abgeschätzt, siehe Abbildung 7-12. Hierzu werden der Übersichtlichkeit halber ausgewählte Wirkflächenpaare, wie in Abbildung 7-11 ersichtlich, betrachtet, anhand derer alle erkannten Wirkungen erläutert werden können. Diese lassen sich anschließend auf die restlichen Wirkflächenpaare der Lager bzw. Schneckengetriebestufen analog übertragen. Der Störgröße *Stauwärme/ Wärmezufuhr* lässt sich der Effekt *Dehnung* zuordnen. Durch die Dehnung von Lager oder Gehäuse am Wirkflächenpaar 1 können Reaktionskräfte entstehen. Da im gesamten Getriebe jedoch statisch bestimmte Lagerungen vorgesehen wurden, wird ein daraus resultierender Einfluss auf die Reibung im System ausgeschlossen. Das Lager wird weiterhin durch die Nebengröße *Öl-Fett Separierung* beeinflusst, da sich hierdurch eine Änderung der Viskosität des Schmierstoffs einstellt und sich somit die Schmierstoffreibung des Lagers erhöht.

		Parkbremse											
		Lager	WFP 1	Gehäuse	Antriebswelle	WFP 2	Motor-schnecke	Schnecke	WFP 3 und 4	Rad	Kolben	WFP 5	Bremse
Stör- und Nebengrößen	Stauwärme/ Wärmezufuhr	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
	Verkipfung Kolben										x	x	X
	Öl-Fett Separierung		x						x				

Abbildung 7-12: Abhängigkeitsmatrix der Parkbremse

An der Antriebswelle hat Störgröße *Stauwärme/ Wärmezufuhr* einen Einfluss auf das Wirkflächenpaar 2 zwischen Antriebswelle und Motorschnecke, die mittels Querpressverband miteinander verbunden sind. Es besteht somit die Möglichkeit, dass sich aufgrund des Effekts *Dehnung* die Passung zwischen den beiden Bauteilen verändert, da unterschiedliche Wärmedehnungskoeffizienten vorliegen. Diese Wirkung wird jedoch unter Berücksichtigung einer Experteneinschätzung als nicht relevant eingestuft und daher auch für die weitere Untersuchung nicht weiter thematisiert.

Einen wesentlichen Einfluss der Störgröße *Stauwärme* bzw. *Wärmezufuhr* bezieht sich auf die Wirkflächenpaare 3 und 4, da es hier infolge von *Dehnung* der beteiligten Bauteile zu Abweichungen vom exakten Zahneingriff kommen kann. Weiterhin führt die Nebengröße *Öl-Fett Separierung* zu einer Veränderung der *Viskosität* des Schmiermittels, wodurch sich der *Reibungswiderstand* der hydrodynamischen Schmierung verändern kann. Überlagert man diese Wirkung mit den Abweichungen vom exakten Zahneingriff aufgrund von *Stauwärme*, lässt sich eine Veränderung der Schmierfilmdicke feststellen, die nach Experteneinschätzung zu einer Veränderung des Reibungszustands von Flüssigreibung bis hin zu Mischreibung führen.

Am Wirkflächenpaar 5, welches gegen die Bremsscheibe drückt, bewirkt die Störgröße *Stauwärme/ Wärmezufuhr* ebenfalls eine *Dehnung*, wodurch der Kolben durch eine entsprechende, axiale Reaktionskraft belastet wird. Überlagert wird die Reaktionskraft durch den Effekt *Biegung*, der aus der Nebengröße *Verkipfung des Kolbens* resultiert und als weitere Reaktionskraft in einem bestimmten Winkel auf

den Kolben wirkt. Dadurch kann es zu einer Verformung des Gehäuses kommen, was ebenfalls den Zuspannprozess beeinflusst. Diese Beeinflussungen wurden jedoch bereits in vorangegangenen Analysen untersucht und werden für die Erweiterung des Simulationsmodells nicht weiter betrachtet.

Im letzten Vorgehensschritt wurden die Störgrößen und Nebengrößen hinsichtlich ihrer Bedeutung und ihres Auftretens bewertet. Von besonderer Relevanz ist hierbei die kombinierte Betrachtung der *Stauwärme* und der *Öl-Fett Separierung*, da beide die Reibzustände an den Lagern und den Schneckengetriebestufen der Parkbremse und somit auch den Zuspannprozess maßgeblich beeinflussen. Somit ist für diese kombinierte Betrachtung sowohl die Auftretenswahrscheinlichkeit als sehr häufig und deren Bedeutung für die Fragestellung als sehr hoch einzustufen, weshalb eine vorwärts gerichtete Anpassung von getroffenen Annahmen des Simulationsmodells vorgenommen wurde.

Zunächst wurde der Betrachtungsrahmen um die Umwelteinflüsse *Stauwärme* und der *Öl-Fett Separierung* erweitert. Im Rahmen der anschließenden Erweiterung von *Modellbausteinen* wurde der erkannte Zusammenhang zwischen Viskosität des Schmiermittels, der Temperatur, der Geometrie des Schmierpalts sowie der Gleitgeschwindigkeit mit Hilfe einer experimentellen Vergleichsmessung untersucht und es wurde durch Interpolation der Messpunkte ein Reibwertkennfeld generiert, das den Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient, Relativgeschwindigkeit und Temperatur abbildet, siehe Abbildung 7-13.

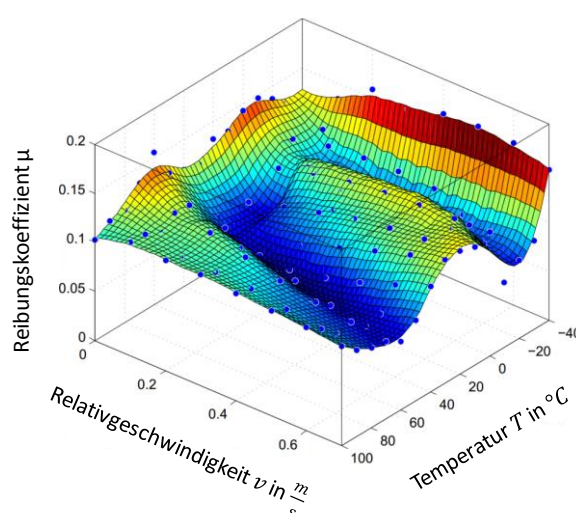


Abbildung 7-13: Reibwertkennfeld²⁴⁵

²⁴⁵ Abbildung entnommen aus Schulze (2017), S.58.

Das Reibwertkennfeld stellt somit ein Modellbaustein dar, mit dem sich die Stauwärme und die Öl-Fett Separierung prinzipiell untersuchen lassen.

Im nächsten Schritt wurden bei der Anpassung der Modellstruktur die Normalkräfte F_N an den Lagern und den Schneckenverzahnungsstufen bestimmt, die bisher vernachlässigt wurden, und das Reibwertkennfeld über den Coulomb'schen Reibzusammenhang $F_R = \mu \cdot F_N$ in das Simulationsmodell integriert. Dadurch ist es möglich, einen schwankenden Temperatureinfluss auf das Zuspännverhalten im Simulationsmodell zu untersuchen, da sich mit Hilfe des Reibwertkennfelds stets zugehörige Reibungskoeffizienten ablesen lassen.

Zur Validierung der durchgeführten Erweiterung wurden Simulationsergebnisse mit Hilfe des erweiterten Modells generiert und Messwerten der Parkbremse am Prüfstand gegenübergestellt, siehe Abbildung 7-14.

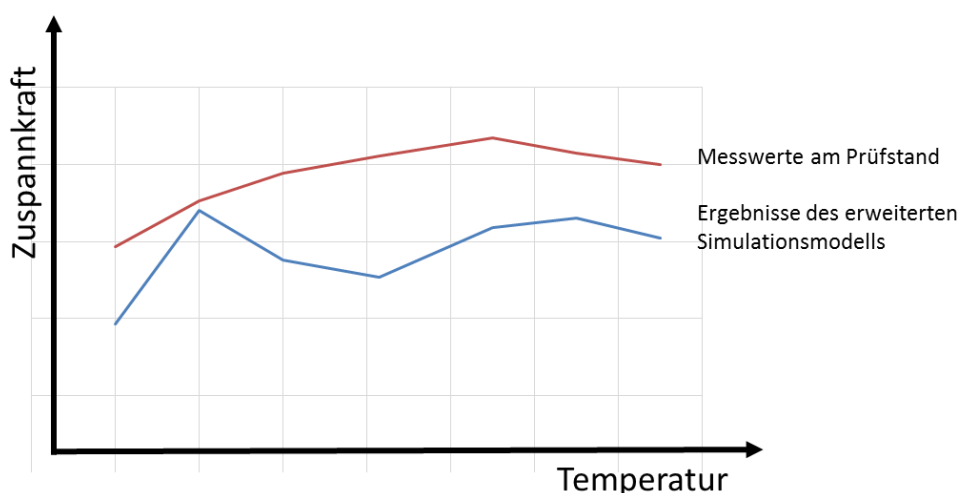


Abbildung 7-14: Theoretisch und experimentell bestimmte Zuspännkraft ²⁴⁶

Hierbei konnte festgestellt werden, dass eine deutliche Abweichung zwischen den Zuspännkräften in Abhängigkeit von der Temperatur vorliegt.

Daher wurde im Rahmen einer Verifikation das Reibwertkennfeld unter Verwendung von weiteren experimentellen Vergleichsmessungen, die Wirkungsgradmessungen der Parkbremse in Abhängigkeit von der Temperatur enthalten, angepasst und erneut in das Simulationsmodell integriert. Bei der anschließenden Generierung von Simulationsergebnissen konnte festgestellt werden, dass diese die Messwerte am Prüfstand deutlich genauer abbilden, siehe Abbildung 7-15.

²⁴⁶ Aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen wurde nur der relative Zusammenhang zwischen den Simulationsergebnisse und den Messwerten am Prüfstand dargestellt.

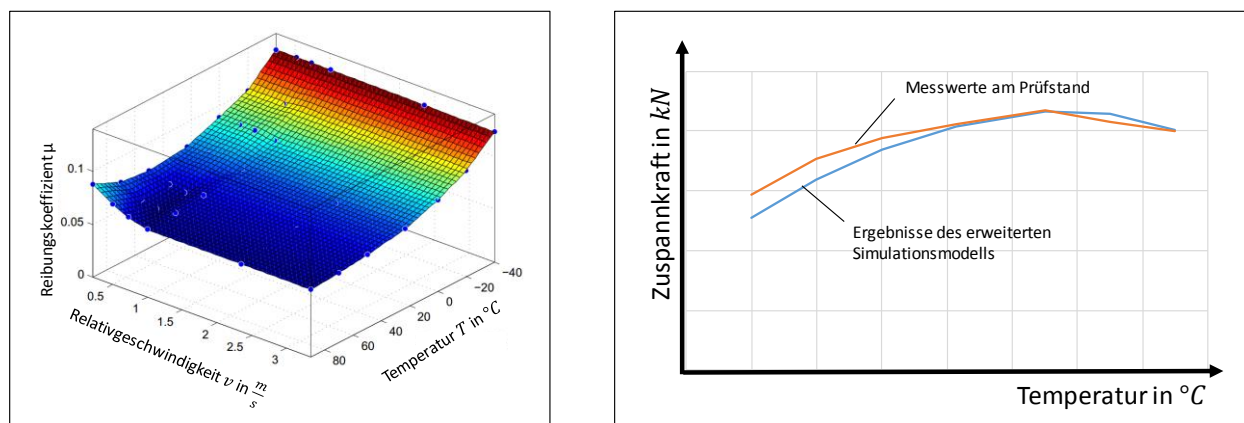


Abbildung 7-15: Anpassung des Reibwertkennfelds²⁴⁷

Zusammenfassend konnte durch die Anwendung der Methodik IDEA eine systematische Erweiterung eines bestehenden Simulationsmodells vorgenommen werden, das eine nur geringe Ausprägung von Produktmodellunsicherheit aufweist. Der Hauptnutzen der Methodik lag im Rahmen dieses Evaluationsprojekts vor allem in einer Strukturierung von relevanten Aspekten des Systems Parkbremse in Bezug auf den Temperatureinfluss, mit deren Hilfe nach Einschätzung eines Experten eine im Vergleich zu ähnlichen Projekten schnellere und effizientere Erstellung eines Simulationsmodells durchgeführt werden konnte.

²⁴⁷ Abbildung entnommen aus Schulze (2017), S.60.

8 Fazit

Im Fazit werden die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und im Hinblick auf ihren Nutzen in die Produktentwicklung eingeordnet. Abschließend werden ein Ausblick sowie ein Überblick zum weiteren Forschungsbedarf gegeben.

8.1 Ergebnisse

Die Motivation dieser Arbeit resultiert aus der steigenden Anzahl an Produktrückrufen, deren Ursachen sich häufig auf eine nicht beachtete Kombination von relevanten Informationen aus Lebenslaufprozessen bei der Auslegung von Produkten zurückführen lassen. Unsicherheit ist aufgrund der sich ständig verändernden Informationslage unvermeidbar. Es stellt sich die Frage, wie der Entwickler bei der Auslegung unterstützt werden kann, um ungewollte Abweichungen zwischen geforderten und realisierten Produkteigenschaften minimieren und somit die Gefahr von Produktrückrufen reduzieren zu können.

Darauf aufbauend wurde die Bedeutung der Verwendung von Produktmodellen im Produktentwicklungsprozess herausgestellt. Bei der Erstellung eines Produktmodells findet eine Informationsverarbeitung statt, auf deren Basis Entscheidungen zur Auslegung des Produkts getroffen werden. Kommt es zur ungewollten Vernachlässigung von relevanten Informationen und somit zu Unsicherheit im Produktmodell, steigt die Gefahr von Fehlentscheidungen in der Produktentwicklung deutlich an. Daher besteht durch die Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen die Möglichkeit, die Gefahr von Fehlentscheidungen in der Produktentwicklung zu reduzieren.

Zur Identifikation von Unsicherheit wurde zunächst eine repräsentative Konsolidierung auf Basis des Stands der Forschung vorgenommen, welche Produktmodelltypen für welche Tätigkeiten im Produktentwicklungsprozess verwendet werden. Zentrales Ergebnis ist eine in Unterabschnitt 3.2.2 vorgenommene Zuordnung der Produktmodelltypen *Zielmodell*, *Entwicklungsmodell*, *Analysemodell* und *Problemmodell* zu den Tätigkeiten *Identifikation von Zielen*, *Durchführung von Produktsynthese*, *Identifikation von Abhängigkeiten festgelegter Merkmale* und *Analyse von Eigenschaften*.

Anschließend wurde auf die Verwendung von *Analysemodellen* fokussiert und in Abschnitt 3.3 der Lebenszyklus eines Produktmodells betrachtet, um anhand des

Begriffspaars *Verifikation* und *Validierung* das Unsicherheitsverständnis bei der Verwendung von Produktmodellen schärfen zu können. Hierbei ist erkannt worden, dass Unsicherheit im Rahmen einer Validierung identifiziert und durch eine sich anschließende Verifikation reduziert werden kann. Der Zusammenhang dieses Begriffspaars stellt ein Mechanismus dar, mit dessen Hilfe sich ein Vorgehen zur Beherrschung von Unsicherheit entwickeln lässt.

Im weiteren Verlauf wurde davon ausgegangen, dass im Rahmen einer Validierung Unsicherheit bereits erkannt wurde, somit liegt der Fokus auf der Reduktion von Unsicherheit im Rahmen einer Verifikation. Hierfür wurde zunächst eruiert, welche Unterstützungsmöglichkeiten es bisher für den Entwickler gibt. Es konnte in Abschnitt 4.1 festgestellt werden, dass sich bisherige Unterstützungen meistens nur auf späte Phasen des Lebenszyklus eines Produktmodells beziehen, beispielsweise auf den Übergang eines konzeptionellen Modells in eine rechnergestützte Form. Hieraus ist der Bedarf abgeleitet worden, eine Unterstützung für die frühen Phasen des Lebenszyklus eines Produktmodells zu entwickeln, da vernachlässigte Informationen in diesen Phasen zu einer besonders hohen Ausprägung von Unsicherheit in Produktmodellen führen.

Im Rahmen der Beschreibung des Lebenszyklus eines Produktmodells ist weiterhin herausgestellt worden, dass der Entwickler bei der Verarbeitung von Informationen Annahmen auf Basis einer als relevant erachteten Informationsmenge trifft, vergleiche hierzu Abschnitt 3.3 und Abschnitt 6.1.

Um prinzipielle Einflussmöglichkeiten zur Unterstützung des Entwicklers zu identifizieren, wurde zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage zunächst untersucht, welche Annahmen der Entwickler bei der Erstellung von Produktmodellen trifft. Die identifizierten Annahmen wurden in Unterabschnitt 5.4.2 strukturiert und beziehen sich auf die Festlegung des Betrachtungsrahmens, der Wahl von Modellbausteinen, der Erstellung einer Modellstruktur und der Individualisierung von Produktmodellelementen.

Darauf aufbauend ist im Rahmen der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage untersucht worden, wie der Entwickler bei der Festlegung einer als relevant erachteten Informationsmenge unterstützt werden kann. Hierzu wurde in Abschnitt 6.2 eine vierstufige Methodik entwickelt, mit deren Hilfe sich durch eine systematische Identifikation und Auswertung von Lebenslaufprozessen neben der bestehenden, produktmodellbezogenen Perspektive noch eine prozessbezogene Perspektive auf das untersuchte Produkt legen lässt. Dadurch kann der Entwickler die Menge an als

relevant erachteten Informationen gezielt erweitern und die getroffenen Annahmen des Produktmodells im Rahmen einer Verifikation überprüfen und gegebenenfalls anpassen. Somit wird durch eine auf die zu treffenden Annahmen abgestimmte Erweiterung von relevanten Informationen aus dem Lebenslauf des Produkts ein Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit geleistet.

Abschließend gilt es, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der durchgeführten Evaluation in Kapitel 7, das Vorgehen und den Nutzen der entwickelten Methodik aus Abschnitt 6.3 aufzugreifen und zu ergänzen. Hierbei sind die folgenden Erkenntnisse zu erwähnen:

- Zunächst konnte anhand der Evaluationsbeispiele demonstriert werden, dass mit Hilfe der Methodik IDEA weitere, relevante Informationen aus dem Lebenslauf des betrachteten Produkts identifiziert werden konnten, die zu einer messbaren Verringerung von Unsicherheit führte. Somit erfüllt die Methodik den Zweck, einen Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit bei der Erstellung von Produktmodellen zu leisten. Kritisch anzumerken ist, dass mit der Methodik kein ideales Produktmodell für eine bestimmte Fragestellung gefunden werden kann, es kann stets nur eine Verbesserung eines bestehenden Modells erzielt werden. Somit gilt es abzuwägen, ob der mit der Methodik verbundene Aufwand auch in einem angemessenen Verhältnis zum Nutzen steht, der sich in einem Produktmodell mit geringerer Unsicherheit äußert. Von daher empfiehlt sich die Anwendung der Methodik insbesondere bei der Erstellung von Produktmodellen, mit denen sicherheitsrelevante Eigenschaften eines Produkts ausgelegt werden, deren Versagen eine Schädigung von Personen zur Folge hätte und damit den Aufwand rechtfertigt.
- Anhand der Anwendung der Methodik am Beispiel der Parkbremse in Abschnitt 7.2 konnte weiterhin festgestellt werden, dass die Methodik neben der Identifikation von relevanten Informationen auch einen Beitrag zur deren Strukturierung leistet. Da sich die betrachtete Parkbremse bereits im Serieneinsatz befindet und keine Auffälligkeiten während der Nutzung bekannt sind, ist davon auszugehen, dass alle relevanten Informationen aus dem Lebenslauf bei deren Auslegung bekannt und auch berücksichtigt wurden. Durch die Methodik konnte somit eine Bündelung und Strukturierung von Expertenwissen erreicht werden, mit deren Hilfe eine Unterstützung bei der Schwerpunktsetzung von bereits bekannten, komplexen Einflüssen aus dem

Lebenslauf der Parkbremse vorgenommen werden kann. Dadurch konnte letztendlich eine im Vergleich zu ähnlichen Projekten effizientere Erweiterung eines Simulationsmodells vorgenommen werden.

- Übergeordnet kann festgestellt werden, dass durch die Verwendung der Methodik auch ein Beitrag zur Vermeidung von Überdimensionierungen und zur Festlegung von weiteren Anforderungen bei der Auslegung von Produkten geleistet werden kann. Durch die Identifikation, Detaillierung und Auswertung von Lebenslaufprozessen lässt sich beispielsweise die Erstellung von Einsatzszenarien unterstützen und vervollständigen, denen das Produkt bei seiner späteren Verwendung ausgesetzt ist. Durch die gewonnenen Erkenntnisse der Einbeziehung des Lebenslaufs können zum einen weitere Anforderungen an das Produkt abgeleitet werden, weiterhin kann bei der Festlegung von Merkmalen über eine Reduzierung von Sicherheitsbeiwerten nachgedacht werden, was zu einer Verringerung von Überdimensionierungen führt.

8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die gesamte Methodik stellt dem Entwickler, u. a. durch die Bereitstellung von Checklisten, eine Reihe von Assoziationsmöglichkeiten bereit, mit deren Hilfe er die als relevant erachtete Informationsmenge in seiner Modellwelt gezielt erweitern kann. Um die Effizienz der Informationserweiterung weiter steigern zu können gilt es, in weiteren Untersuchungen das Assoziationsvermögen des Entwicklers mit in die Betrachtung einzubeziehen. Durch die Berücksichtigung von dessen Fähigkeiten, Erfahrungen und Knowhow kann die vorgenommene Zuordnung von Methoden und Modellen zu den einzelnen Vorgehenschritten auf die Bedürfnisse des Entwicklers angepasst und gezielt erweitert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde weiterhin eine Fokussierung auf die Verwendung von *Analysemodellen* gelegt. Es gilt somit, in weiteren Untersuchungen zu überprüfen, ob und inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse der Methodik auf die restlichen Produktmodelltypen übertragen lassen. Auch hier stellt sich die Frage, ob und inwiefern eine Anpassung der bereitgestellten Modelle und Methoden der Vorgehenschritte sinnvoll ist. Damit kann die Beherrschung von Unsicherheit auch auf die übrigen Tätigkeiten im Produktentwicklungsprozess ausgeweitet werden.

Bisher ist angedacht, die Methodik zur Identifikation von Ursachen für eine erkannte Produktmodellunsicherheit einzusetzen, um Produktmodellierungsunsicherheit zu verringern. Im Rahmen von weiteren Forschungstätigkeiten lässt sich

untersuchen, ob eine Anwendung der Methodik modellierungsbegleitend sinnvoll ist und ob sich der Aufwand dafür rechtfertigen lässt. Weiterhin kann zur Abschätzung des Aufwands auch der Validierungsprozess mit einbezogen werden, der bisher noch nicht betrachtet wurde. In diesem Zuge gilt es ebenfalls zu überprüfen, ob und wie eine Anpassung der bereitgestellten Modelle und Methoden erfolgen muss.

Literaturverzeichnis

Albers et al. (2005)

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung - Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft. 2005.

Albers et al. (2015)

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Bauer, W.; Binz, H.; Bertsche, B. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung - Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft. 2015, S. 1–10.

Albers et al. (2016)

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser 2016, S. 541–569.

Anderl, Binde (2010)

Anderl, R.; Binde, P.: Simulationen mit NX. Kinematik, FEM, CFD und Datenmanagement ; mit zahlreichen Beispielen für NX 7.5. 2., überarb. und erw. Aufl., München: Hanser 2010.

Anderl, Trippner (2000)

Anderl, R.; Trippner, D.: STEP Standard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2000.

Andreasen, Hein (1987)

Andreasen, M. M.; Hein, L.: Integrated product development. Bedford u. a.: IFS (Publications) Ltd 1987.

Ang, Tang (1984)

Ang, A.-S.; Tang, W. H.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume II: Decision Risk and Reliability. John Wiley & Sons Inc 1984.

ASME (2006)

ASME: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics. American Society of Mechanical Engineers-PTC 60 /. V&V. 2006.

Balci (2007)

Balci, O.: Verification, Validation, and Testing. In: Banks, J. (Hrsg.): Handbook of simulation Principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, Norcross, Ga.: Wiley 2007, S. 335–393.

Bandow, Holzmüller (2010)

Bandow, G.; Holzmüller, H. H.: „Das ist gar kein Modell!“. Wiesbaden: 1. Aufl. Gabler 2010.

Bauert (1991)

Bauert, F.: Methodische Produktmodellierung für den rechnerunterstützten Entwurf. Dissertation der TU Berlin: TU Univ.-Bibliothek Abt. Publ. 1991.

Birkhofer (1980)

Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte, Dissertation, Düsseldorf: VDI-Verl. 1980.

Birkhofer (2011a)

Birkhofer, H.: From design practice to design science: the evolution of a career in design methodology research. In: Journal of Engineering Design, Is. Vol. 22. 2011, S. 333–359.

Birkhofer (2011b)

Birkhofer, H.: The future of design methodology. London - New York: Springer 2011.

Birkhofer et al. (2012)

Birkhofer, H.; Rath, K.; Zhao, S.: Umweltgerechtes Konstruieren. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München: Hanser 2012, S. 561–582.

Bolton, Pahlkötter (2004)

Bolton, W.; Pahlkötter, U.: Bausteine mechatronischer Systeme. 3. Aufl. München: Pearson Studium 2004.

Box (1976)

Box, G. E. P.: Science and Statistics. In: Journal of the American Statistical Association, Vol. 71, Is. 356. 1976, S. 791–799.

Buede (2009)

Buede, D. M.: The engineering design of systems. Models and methods. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley 2009.

Choi (2005)

Choi, H.-J.: A robust design method for model and propagated uncertainty. Georgia, Dissertation, 2005.

DeLaurentis, Mavris (2000)

DeLaurentis, D. A.; Mavris, D. N.: Uncertainty Modeling and Management in Multidisciplinary Analysis and Synthesis 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. (38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit). Reno, NV, U.S.A: Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics 2000.

Deubzer, Lindemann (2009)

Deubzer, F.; Lindemann, U.: Networked Product Modeling – Use and Interaction of Product Models and Methods during Analysis and Synthesis. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 4, Product and Systems Design. Glasgow: Design Society 2009, S. 371–380.

DIN ISO-Norm 10303-1 (1994)

DIN ISO-Norm 10303-1: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien. Ausg. 1994. Hrsg. DIN. Berlin: Beuth- Verlag 1994.

DIN-Norm 31000 (2011)

DIN-Norm 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien. Ausg. 2011. Hrsg. DIN. Berlin: Beuth- Verlag 2011.

DIN ISO-Norm 60812 (2015)

DIN ISO-Norm 60812: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Ausg. 2015. Hrsg. DIN. Berlin: Beuth- Verlag 2015.

DIN-Norm 60812 (2015)

DIN-Norm 60812: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Ausg. 2015. Hrsg. DIN. Berlin: Beuth- Verlag 2015.

Dremont et al. (2011)

Dremont, N.; Gaignic, P.; Troussier, N.; Whitfield, R.; Duffy, A.: A metric to represent the evolution of CAD/Analysis models in collaborative design. In: Culley, S. J.; Hicks, B. J.; McAloone, T. C.; Howard, T. J.; Chen, W. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11). Copenhagen: 2011, S. 176–185.

Drosg (2006)

Drosg, M.: Der Umgang mit Unsicherheiten. Ein Leitfaden zur Fehleranalyse. Wien: Facultas 2006.

Dylla (1991)

Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. Dissertation der TU München: Hanser 1991.

Eckert et al. (2011)

Eckert, C.; Alink, T.; Ruckpaul, A.; Albers, A.: Different notions of function. In: Journal of Engineering Design, Vol. 22, Is. 11-12. 2011, S. 811–837.

Edmolift (2006)

Edmolift: Scissor lift table. 2006. Online verfügbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TL_2000_scissor_lift.jpg.

Ehrlenspiel, Meerkamm (2013)

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser 2013.

Eifler et al. (2014)

Eifler, T.; Olesen J.L.; Howard, T. J.: Robustness and Reliability of the GM Ignition Switch - A Forensic Engineering Case. In: Howard, T. J.; Eifler, T. (Hrsg.): Proceedings of the First International Symposium of Robust Design 2014. Technical University of Denmark, DTU 2014, S. 51–58.

Engelhardt et al. (2012)

Engelhardt, R.; Koenen, J. F.; Brenneis, M.; Kloberdanz, H.; Bohn, A.: An Approach to Classify Methods to Control Uncertainty in Load-Carrying Structures. In: Applied Mechanics and Materials, Is. 104. 2012, S. 33–44.

Engelhardt (2013)

Engelhardt, R. A.: Uncertainty Mode and Effects Analysis - heuristische Methodik zur Analyse und Beurteilung von Unsicherheiten in technischen Systemen des Maschinenbaus, Dissertation der TU Darmstadt, Düsseldorf: VDI-Verl. 2013.

Europäische Kommission (2017)

Europäische Kommission: Rapid Alert System for Dangerous Products. Working together to keep consumers safe - Annual Report. EU Bookshop 2017.

Fahrmeir et al. (2007)

Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Sechste, überarbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.

Falkenberg et al. (1998)

Falkenberg, E. D.; Hesse, W.; Lindgreen, P.; Nilsson, B.; Han Oei, J. L.; Rolland, C.; Stamper, R.; Assche, F.; Verrijn-Stuart, A.: A framework of information system concepts. The FRISCO report (Web edition). Leiden: University of Leiden, Department of Computer Science 1998.

Feldhusen (2016)

Feldhusen, J.: Gestaltung von Elementen und Systemen. In: Sauer, B. (Hrsg.): Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016, S. 151–188.

Feldhusen, Grote (2013)

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Springer Berlin Heidelberg 2013.

Felgen (2007)

Felgen, L.: Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte, Dissertation, 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2007.

Fernandez-Lopez, Gomez-Perez, Juristo (1997)

Fernandez-Lopez, M.; Gomez-Perez, A., Juristo, N.: Methontology: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. In: Farquhar, A.; Gruninger, M. (Hrsg.): Proceedings of the Ontological Engineering AAAI-97 Spring Symposium Series. Stanford, USA: The AAAI Press 1997, S. 33–40.

Findeisen (2006)

Findeisen, D.: Ölhydraulik. Handbuch für die hydrostatische Leistungsübertragung in der Fluidtechnik. 5., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer 2006.

Fischer (2010)

Fischer, G.: Lineare Algebra. Eine Einführung für Studienanfänger. 17., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010.

Franke (1976)

Franke, H.-J.: Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses, Dissertation, Düsseldorf: VDI-Verl. 1976.

Freund et al. (2016)

Freund, T.; Lotz, J.; Würtenberger, J.; Kloberdanz, H.: Applying the elemental interfaces approach to kinematic design. In: Culley, S. J.; Lindemann, U.; McAloone, T. C.; Weber, C.; Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 14th international Design Conference. 2016, S. 193–200.

Geis (2011)

Geis, C.: Behavioral marker in der Produktentwicklung. Unterstützung und Training erfolgreichen Verhaltens von Entwicklungsteams, Dissertation, Düsseldorf: VDI-Verlag 2011.

Ghirardato et al. (2008)

Ghirardato, P.; Maccheroni, F.; Marinacci, M.: Revealed Ambiguity and Its Consequences: Updating. In: Peters, H.; Abdellaoui, M.; Hey, J. D. (Hrsg.): Advances in Decision Making Under Risk and Uncertainty. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, S. 3–18.

Giapoulis (1998)

Giapoulis, A.: Modelle für effektive Konstruktionsprozesse, Dissertation, Aachen, Shaker 1998.

Grabowski, H. (1997)

Grabowski, H.: Neue Wege zur Produktentwicklung. Stuttgart: Raabe 1997.

Gramann (2004)

Gramann, J.: Problemmodelle und Bionik als Methode, Dissertation, 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2004.

Grebici et al. (2008)

Grebici, K.; Wynn, D.; Clarkson, J.: Modelling the Relationship between Uncertainty Levels in Design Descriptions and Design Process Duration International Conference on Integrated, Interactive and Virtual Product Engineering - Virtual Concept - IDDME'08. Beijing, China: 2008.

Gross et al. (2014)

Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A.: Technische Mechanik 2. Elastostatik. 12., aktual. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2014.

Grote, Feldhusen (2014)

Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin - Heidelberg: 24., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Vieweg 2014.

Grüner (2001)

Grüner, C.: Die strategiebasierte Entwicklung umweltgerechter Produkte, Dissertation, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Haberfellner, Daenzer (1992)

Haberfellner, R.; Daenzer, W. F.: Systems Engineering. Zürich: 7. Aufl., neu bearb. und erw. Verl. Industrielle Organisation 1992.

Hanselka, Platz (2010)

Hanselka, H.; Platz, R.: Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus. In: Konstruktion, Vol. (11/12), 2010, S. 55–62.

Hauth (2008)

Hauth, J.: Grey-box modelling for nonlinear systems. 2008. Dissertation. Online verfügbar unter <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/2045>, zuletzt geprüft am 21.06.2017.

Hedrich et al. (2015)

Hedrich, P.; Würtenberger, J.; Pelz, P. F.: Comparison of a new passive and active technology for vibration reduction of a vehicle under uncertain load. In: Pelz, P. F.; Groche, P. (Hrsg.): Uncertainty in mechanical engineering II. Pfaffikon, Switzerland: Trans Tech Publications 2015, S. 57–66.

Hedrich et al. (2016)

Hedrich, P.; Johe, M.; Pelz, P. F.: Design and realization of an adjustable fluid powered piston for an active air spring. In: Weber, J.; Neubert, T.; Kienzler, C. H. (Hrsg.): Tagungsband zum 10. Internationalen fluidtechnischen Kolloquium. Dresden: 2016, S. 571–582.

Heidemann (2001)

Heidemann, B.: Trennende Verknüpfung. Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen, Dissertation, Düsseldorf: VDI-Verl. 2001.

Hertz (1894)

Hertz, H.: Die Prinzipien der Mechanik. In neuem Zusammenhange dargestellt. Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1894.

Hofer (1994)

Hofer, E.: Berücksichtigung von Modellunsicherheiten in Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen von Rechenmodellerngebnissen. gfm Verlag 1994.

Hubka (1984)

Hubka, V.: Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Zweite, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg - s.l.: Springer Berlin Heidelberg 1984.

Hubka, Eder (1988)

Hubka, V.; Eder, W. E.: Theory of technical systems. A total concept theory for engineering design. Berlin: Springer 1988.

Isermann, R. (2006)

Isermann, R.: Fahrdynamik-Regelung. Wiesbaden: 1. Aufl. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2006.

Jockisch, Rosendahl (2010)

Jockisch, M., Rosendahl, J.: Klassifikation von Modellen. In: Bandow, G.; Holzmüller, H. H. (Hrsg.): „Das ist gar kein Modell!“ Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2010.

JCGM (2008)

JCGM: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Corrected Version 2010. Aug. 2008. Hrsg. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 2008.

Kerley et al. (2009)

Kerley, W.; Wynn, D.; Moss, M.; Coventry, G.; Clarkson, J.: Towards empirically-derived guidelines for process modelling interventions in engineering design. In: Norell Bergendahl, M. ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design; 24 - 27 August 2009, Stanford University, Stanford, California, USA; proceedings volume. 58 Band. Glasgow: Design Society 2009, S. 217–228.

Kirchner (2007)

Kirchner, E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.

Kleindorfer et al. (1998)

Kleindorfer, G. B.; O'Neill, L.; Ganeshan, R.: Validation in Simulation. In: Management Science, Vol. 44, Is. 8. 1998, S. 1087–1099.

Knetsch (2006)

Knetsch, T.: Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen, Dissertation Aachen: Shaker 2006.

Kohn (2014)

Kohn, A.: Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen, Dissertation, München: Dr. Hut 2014.

Krcmar (2005)

Krcmar, H.: Informationsmanagement. Dordrecht: Springer 2005.

Kreye et al. (2011)

Kreye, M. E.; Goh, Y. M.; Newnes, L. B.: Manifestation of Uncertainty - A Classification. In: Culley, S. J.; Hicks, B. J.; McAloone, T. C.; Howard, T. J.; Chen, W. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11). Copenhagen: 2011, S. 97–107.

Kröger (2015)

Kröger, M.: General Motors kauft sich mit Milliardenzahlung frei. In: SPIEGEL Online, Is. Ausgabe vom 17.09.2015. 2015, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Kusiak (2000)

Kusiak, A.: Integrated product and process design – a modularity perspective. In: Sivaloganathan, S.; Andrews, P. (Hrsg.): Proceedings of the Engineering Design Conference 2000 – Design for Excellence. Brunel University: London: Professional Engineering Publishing 2000, S. 73–82.

Lauer (2010)

Lauer, W. M.: Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2010.

Lindemann (2007)

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 2., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.

Masing (2007)

Masing, W.: Das Unternehmen im Wettbewerb. In: Masing, W.; Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement, 5., vollst. neu bearb. Aufl. München: Hanser 2007, S. 3–14.

Mathias (2016)

Mathias, J.: Auf dem Weg zu robusten Lösungen, Dissertation der TU Darmstadt, Düsseldorf: VDI-Verl. 2016.

Matthiassen (1997)

Matthiassen, B.: Design for robustness and reliability. Improving the quality consciousness in engineering design. Lyngby: Department of Control and Engineering Design, DTU 1997.

Matthiesen (2002)

Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme, Dissertation, Karlsruhe: Forschungsberichte mkl - Universität Karlsruhe Band 6. 2002.

Meerkamm et al. (2009)

Meerkamm, H.; Henrich, A.; Jablonski, S.; Krcmar, H.; Lindemann, U.; Rieg, F.: Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung. Aachen: Shaker 2009.

Morgan, Henrion (1992)

Morgan, M. G.; Henrion, M.: *Uncertainty - A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. 1. paperback ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1992.

Morone, Morone (2008)

Morone, A.; Morone, P.: *Guessing Games and People Behaviours: What Can We Learn?* In: Peters, H.; Abdellaoui, M.; Hey, J. D. (Hrsg.): *Advances in Decision Making Under Risk and Uncertainty*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, S. 205–218.

Nance et al. (1984)

Nance, R.; Balci, O.; Moose, R.: *Evaluation of the UNIX host for a model development environment*. In: Pooch, U.; Pegden, D.; Blais, G.; Solomon, S.; Sheppard, S. (Hrsg.): *WSC ,84 Proceedings of the 16th conference on Winter simulation*. IEEE Press Piscataway 1984, S. 576–584.

Nance (1988)

Nance, R.: *The conical methodology: a framework for simulation model development*. In: Balci, O. (Hrsg.): *Methodology and validation Proceedings of the Conference on Methodology and Validation ; 6 - 9 April 1987, Orlando, Florida ; a Society for Computer Simulation (Simulation Councils, Inc.) publication*. San Diego Calif.: Society for Computer Simulation 1988.

Negele (2006)

Negele, H.: *Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung*. 2., unveränd. Aufl. München: Utz 2006.

North (2011)

North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen*. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden 2011.

Oberkampf et al. (2002)

Oberkampf, W. L.; DeLand, S. M.; Rutherford, B. M.; Diegert, K. V.; Alvin, K. F.: *Error and uncertainty in modeling and simulation*. In: *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 75, Is. 3. 2002, S. 333–357.

Oberkampf, Trucano (2002)

Oberkampf, W. L.; Trucano, T. G.: *Verification and validation in computational fluid dynamics*. In: *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, Is. 3. 2002, S. 209–272.

Ocker (2010)

Ocker, D.: *Unschärfe Risikoanalyse strategischer Ereignisrisiken*. Frankfurt, M.: Lang 2010.

Otto, Antonsson (1994)

Otto, K.; Antonsson, E.: *Design parameter selection in the presence of noise*. In: *Research in Engineering Design*, Is. Vol. 6, No. 4. 1994, S. 234–246.

Page (1991)

Page, B.: Diskrete Simulation. Eine Einführung mit Modula-2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1991.

Page et al. (2005)

Page, B.; Kreutzer, W.; Gehlsen, B.: The Java simulation handbook. Simulating discrete event systems with UML and Java. Aachen: Shaker 2005.

Pahl et al. (2007)

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer 2007.

Picchi (2014)

Picchi, A.: GM lawyer says staff failed in ignition-switch defect. In: CBS News, Is. Ausgabe vom 17.07.2014. 2014, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Picot et al. (2010)

Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R. T.: Die grenzenlose Unternehmung. Information, Organisation und Management ; Lehrbuch zur Unternehmensführung im Informationszeitalter. 5. aktualisierte Aufl., [Nachdr.]. Wiesbaden: Gabler 2010.

Ponn, Lindemann (2008)

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Berlin - Heidelberg: Springer 2008.

Potinecke (2009)

Potinecke, T.: Methode zur Systematisierung von Teilprozessen in der Produktentwicklung beim Einsatz von CAx-Technologien. Heimsheim: Jetter 2009.

Radhakrishnan, McAdams (2005)

Radhakrishnan, R.; McAdams, D. A.: A Methodology for Model Selection in Engineering Design. In: Journal of Mechanical Design, Vol. 127, Is. 3. 2005, S. 378–387.

Rehäuser, Krcmar (1996)

Rehäuser, J.; Krcmar, H.: Wissensmanagement im Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hrsg.): Wissensmanagement. Berlin: de Gruyter 1996, S. 1–40.

Reiche (2014)

Reiche, L.: Gaspedal-Panne kostet Toyota erneut viel Geld. In: Manager Magazin, Is. Ausgabe vom 19.03.2014. 2014, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Rodenacker (1976)

Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. 2., völlig neubearbeitete Auflage. Berlin - Heidelberg: Springer 1976.

Roos et al. (2016)

Roos, M.; Horn, B.; Gramlich, S.; Ulbrich, S.; Kloberdanz, H.: Manufacturing Integrated Algorithm-Based Product Design – Case Study of a Snap-Fit Fastening. In: *Procedia CIRP*, Vol. 50, 2016, S. 123–128.

Roos et al. (2017)

Roos, M.; Wagner, C.; Gramlich, S.; Reichwein, J.; Kirchner, E.: Selective pre-load generation: Finding manufacturing-integrated solutions for linear guides. In: van der Loos, M. (Hrsg.): *ICED17, International Conference on Engineering Design*. Vancouver, Canada: 2017.

Ropohl (2009)

Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. s.l.: KIT Scientific Publishing 2009.

Roth (2000)

Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre*. 3. Aufl., erw. und neu gestaltet. Berlin: Springer 2000.

Sargent (2010)

Sargent, R.: Verification and Validation of simulation models. In: Johansson, B.; Jain, S.; Montoya-Torres, J.; Hukan, J.; Yücesan, E. (Hrsg.): *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. s.l.: Winter Simulation Conference 2010, S. 166–183.

Scholl (2008)

Scholl, A.: Modellierung logistischer Systeme. In: Arnold, D.; Furmans, K.; Isermann, H. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*, 3. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 35–94.

Schott (1998)

Schott, H.: *Informationsressourcen und Informationsmanagement für die Entwicklung umweltgerechter Produkte*, Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

Schramm et al. (2013)

Schramm, D.; Hiller, M.; Bardini, R.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2013.

Schubert (1984)

Schubert, J.: *Physikalische Effekte. Anwendungen, Beschreibungen*, Tab. 2., überarb. Aufl. Weinheim: Physik-Verl. 1984.

Schulze (2017)

Schulze, S.: *Anwendung und Evaluation eines modellbasierten Ansatzes zur Erstellung von Produktmodellen mit verringerter Unsicherheit am Beispiel der Spannkraftbestimmung einer elektrischen Parkbremse*, Master- Thesis des Fachgebiets für Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, 2017.

Setter, Pache (1998)

Setter, R.; Pache, M.: Körperliche Modelle in der Produktentwicklung. In: Milberg, J. (Hrsg.): Rapid prototyping Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung; Augsburg, 14. Oktober 1998. München: Utz Wiss 1998.

Siu, Apostolakis (1985)

Siu, N.; Apostolakis, G.: On the Quantification of Modeling Uncertainties. In: Stalpaert, J. (Hrsg.): Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. North-Holland Physics Publishing 1985, S. 375–378.

Soize (2017)

Soize, C.: Uncertainty Quantification. An Accelerated Course with Advanced Applications in Computational Engineering. 2017.

Stachowiak (1973)

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Softcover reprint of the hardcover 1. ed. 1973. Wien: Springer 1973.

Strassmann (2010)

Strassmann, B.: Gleitmittel fürs Gaspedal. In: Zeit Magazin, Is. Ausgabe vom 11.02.2010. 2010, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Suh (1990)

Suh, N. P.: The principles of design. New York: Oxford Univ. Pr 1990.

Suh (1998)

Suh, N. P.: Axiomatic Design Theory for Systems. In: Research in Engineering Design, Vol. 10, Is. 4. 1998, S. 189–209.

Szykman et al. (2001)

Szykman, S.; Sriram, R. D.; Regli, W. C.: The Role of Knowledge in Next-generation Product Development Systems. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 1, Is. 1. 2001, S. 3–11.

Thunnissen (2003)

Thunnissen, D. P.: Uncertainty Classification for the Design and Development of Complex Systems. In: Ghosh, D.; Balabanov, V. (Hrsg.): 3rd Annual Predictive Methods Conference (PMC 2003). Newport Beach, California, USA: 2003.

Thunnissen (2005)

Thunnissen, D. P.: Propagating and mitigating uncertainty in the design of complex multidisciplinary systems - Dissertation. California Institute of Technology 2005.

Trzesniowski (2014)

Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik. Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. 4., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.

Vajna et al. (2009)

Vajna, S.; Bley, H.; Hehenberger, P.; Weber, C.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009.

van Venrooy (2015)

van Venrooy, M.: Produktrückrufe in der deutschen Automobilindustrie. Motivations-, Kommunikations- und Verständnisproblematiken. Wiesbaden: Springer Gabler 2015.

VDI-Richtlinie 2221 (1993)

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Ausg. 1993. Hrsg. VDI. Düsseldorf: Beuth-Verlag 1993.

VDI-Richtlinie 2222 (1996)

VDI-Richtlinie 2222: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Ausg. 1996. Hrsg. VDI. Düsseldorf: Beuth-Verlag 1996.

VDI-Richtlinie 2225-3 (1998)

VDI-Richtlinie 2225-3: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Ausg. 1998. Hrsg. VDI. Düsseldorf: Beuth-Verlag 1998.

VDI-Richtlinie 2223 (2004)

VDI-Richtlinie 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Ausg. 2004. Hrsg. VDI. Düsseldorf: Beuth-Verlag 2004.

VDI-Richtlinie 5610 (2009)

VDI-Richtlinie 5610: Wissensmanagement im Ingenieurwesen. Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Ausg. 2009. Hrsg. VDI. Düsseldorf: Beuth-Verlag 2009.

Wäldele (2012)

Wäldele, M.: Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung, Dissertation, Düsseldorf: VDI Verlag 2012.

Walker et al. (2003)

Walker, W. E.; Harremoës, P.; Rotmans, J.; van der Sluijs, J. P.; van Asselt, M.; Janssen, P.; Krayen von Krauss, M. P.: Defining Uncertainty. In: Integrated Assessment, Vol. 4, Is. 1. 2003, S. 5–17.

Walter (2007)

Walter, S.: Die Elementarisierung von Produktentwicklungsmethoden. Ein Ansatz zur flexiblen Konfiguration von Methoden in Lehre und Anwendung. Düsseldorf: VDI Verlag 2007.

Walther (1994)

Walther, C.: Systemtechnisches Verfahren zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionsstruktur technischer Systeme. Lehrstuhl für Raumfahrttechnik - Technische Universität München 1994.

Weber (2005)

Weber, C.: An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In: Bley, H. (Hrsg.): Advances in methods and systems for the development of products and processes Proceedings : 2. German-Israeli Symposium on Design and Manufacture. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2005, S. 159–179.

Weber (2007)

Weber, C.: Looking at „DFX“ and „Product Maturity“ from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): The Future of Product Development Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, S. 85–104.

Weber (2012)

Weber, C.: Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzak, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 23. DfX-Symposium. Hamburg: TuTech Verlag 2012.

Wenzel (1998)

Wenzel, S.: Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge. Dortmund: Verl. Praxiswissen 1998.

Wenzel et al. (2008)

Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.; Weiß, M.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.

Würtenberger et al. (2015)

Würtenberger, J.; Gramlich, S.; Freund, T.; Lotz, J.; Zocholl, M.; Kloberdanz, H.: Uncertainty in product modelling within the development process. In: Pelz, P. F.; Groche, P. (Hrsg.): Uncertainty in mechanical engineering II. Pfaffikon, Switzerland: Trans Tech Publications 2015, S. 89–98.

Würtenberger J. et al. (2016)

Würtenberger J.; Lotz J.; Freund T.; Kloberdanz H.: Development of a methodical approach to handle uncertainty during the process of product modelling. In: Culley, S. J.; Lindemann, U.; McAloone, T. C.; Weber, C.; Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 14th international Design Conference. 2016, S. 579–588.

Würtenberger et al. (2017)

Würtenberger, J.; Lotz, J.; Freund, T.; Kirchner, E.: An approach to handle uncertainty during the process of product modelling. In: van der Loos, M. (Hrsg.): ICED17, International Conference on Engineering Design. Vancouver, Canada: 2017.

Wyatt et al. (2009)

Wyatt, D.; Eckert, C.; Clarkson, P.: Design of Product Architectures in Incrementally Developed Complex Products. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 4, Product and Systems Design. Glasgow: Design Society 2009, S. 167–178.

YSSYguy (2014)

YSSYguy: Fahrwerk einer Cessna 404. 2014. Online verfügbar unter https://en.wikipedia.org/wiki/User:YSSYguy#/media/File:Oleo_trailing_link_main_landing_gear.JPG, zuletzt geprüft am 12.06.2017.

Zinniker (2007)

Zinniker, P.: Zuverlässigkeits- und Sicherheitsplanung. In: Masing, W.; Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement, 5., vollst. neu bearb. Aufl. München: Hanser 2007, S. 441–466.

Eigene Veröffentlichungen

2014

Würtenberger, J., Kloberdanz, H., Lotz, Julian, von Ahsen, A. (2014): Application of the FMEA during the product development process - dependencies between level of information and quality of result, Pro-ceedings of the 13th International Design Conference DESIGN 2014 Dubrovnik, Vol.1, 417-427, 19-22.05.2014.

Würtenberger, J., Kloberdanz, H. (2014): An approach to identifying the ideal time to perform an FMEA during the product development process, Proceedings of the International Symposium on Robust Design 2014 Copenhagen, Denmark, Vol.1, 69-79, 14-15.08.2014.

Freund, T.; Würtenberger, J.; Calmano, S.; Hesse, D.; Kloberdanz, H. (2014): Robust Design of Active Systems - An Approach to Considering Disturbances within the Selection of Sensors. In: Proceedings of the First International Symposium of Robust Design 2014. Hrsg. von T. J. Howard; T. Eifler. Copenhagen: Technical University of Denmark, DTU.

2015

Hedrich, P., Cloos, F.-J., Würtenberger, J., Pelz, P.F. (2015): Comparison of a New Passive and Active Technology for Vibration Reduction of a Vehicle Under Uncertain Load, Applied Mechanics and Materials - Uncertainty in Mechanical Engineering II, Darmstadt, Vol.807, 57-66, 19-20.11.2015.

Würtenberger, J., Gramlich, S., Freund, T., Lotz, J., Zocholl, M., Kloberdanz, H. (2015): Uncertainty in product modelling within the development process, Applied Mechanics and Materials - Uncertainty in Mechanical Engineering II, Darmstadt, Vol.807, 89-98, 19-20.11.2015.

Zocholl, M., Heimrich, F., Oberle, M., Würtenberger, J., Bruder, R., Anderl, R. (2015): Representation of Human Behaviour for the Visualization in Assembly Design, Applied Mechanics and Materials - Uncertainty in Mechanical Engineering II, Darmstadt, Vol.807, 183-192, 19-20.11.2015.

Freund, T., Kloberdanz, H., Lotz, J., Würtenberger, J. (2015): An approach to analysing interface uncertainty using the contact and channel model, Proceedings

of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15), Mailand, Vol.6, 53-63, 2015.

Freund T., Würtenberger J., Kloberdanz, H., Blakaj, P. (2015): An approach to using elemental interfaces to assess design clarity, Applied mechanics and Materials - Uncertainty in Mechanical Engineering II, Darmstadt, Vol. 807, pp. 109-117, 19.-20.11.2015.

Lotz, J., Freund, T., Würtenberger, J., Kloberdanz, H. (2015): Principles to develop size ranges of products with ergonomic requirements, using a robust design approach, Proceedings of the 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015, Las Vegas, Vol. 3, 6305-6312, 26-31.07.2015.

2016

Würtenberger, J., Freund, T., Lotz, J., Kloberdanz, H. (2016): Development of a methodical approach to handle uncertainty during the process of product modelling, International Design Conference DESIGN 2016 Dubrovnik, 579-588, 2016.

Freund, T.; Lotz, J.; Würtenberger, J.; Kloberdanz, H. (2016): Applying the Elemental interfaces Approach to Kinematic Design. In: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. Hrsg. von D. Marjanovic; M. Torga; N. Pavkovic; N. Bojcetic; Glasgow: Design Society, S.193-200.

Lotz, J.; Freund, T.; Würtenberger, J.; Kloberdanz, H. (2016): Uncertainty in Size Range Development - An Analysis of Potential for a New Scaling Approach. In: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. Hrsg. von D. Marjanovic; M. Torga; N. Pavkovic; N. Bojcetic; Glasgow: Design Society, S. 341-360.

2017

Würtenberger, J.; Lotz, J.; Freund, T.; Kirchner, E. (2016): An approach to handle uncertainty during the process of product modelling. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17), Bd. 4. Unter Mitarbeit von A. Maier, S. 'kec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel et al.

Vancouver, 21-25.08.2017 (Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 21), S. 59-68.

Freund, T. Würtenberger, J.; Lotz, J.; Rommel, C.; Kirchner, E. (2017): Design for Robustness - Systematic Application of Design Guidelines to Control Uncertainty. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17), Bd. 4. Unter Mitarbeit von A. Maier, S. Kec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel et al. Vancouver, 21-25.08.2017 (Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 21), S. 277-286.

Betreute studentische Arbeiten

2014

Wirfs, J.: Kategorisierung von Modellunsicherheit und deren Anwendung an Modellen der Produktentwicklung, Master-Thesis, 2014.

Lampert, M.: Systematisierung von Informationen und Modellen entlang des Produktentwicklungsprozesses, Bachelor-Thesis, 2014.

Hofmann, T.: Systematische Analyse eines Pneumatikzylinders zur Ableitung allgemeingültiger Richtlinien bei der Effektauswahl im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses, Bachelor-Thesis, 2014.

2015

Hinterwälder, C.: Analyse von Unsicherheit bei der Produktmodellauswahl am Beispiel des SFB 805 Demonstrators; Bachelor-Thesis, 2015.

Bauch, M.: Reduktion von Unsicherheit bei der Produktmodellierung im Entwicklungsprozess, Bachelor-Thesis, 2015.

Bechmann, R.; Bundschuh, L.; Herdling, A.; Khan, J.; Merkel, R.; Spindler, S.: Analyse von Abhängigkeiten zwischen Anforderungen und Produkteigenschaften am Beispiel der Entwicklung eines Antriebskonzepts für einen Luftfederbalg, Advanced Design Project, 2015.

2016

Betzel, H.P.: Entwicklung eines Informationsspeichers zur Unterstützung des Produktmodellierungsprozesses, Bachelor-Thesis, 2016.

Herdling, A.: Konstruktion eines Prüfstands zur experimentellen Grundlagenermittlung des Einsatzes von Sensorschrauben, Master-Thesis, 2015.

Wittel, T.: Methodische Unterstützung des Entwicklers bei der Externalisierung von Produktmodellen, Studienarbeit, 2016.

2017

Mustafic, B.: Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Festlegung des Betrachtungsrahmens eines Produktmodellierungsprozesses, Bachelor-Thesis, 2017.

Schulze, S.: Anwendung und Evaluation eines modellbasierten Ansatzes zur Erstellung von Produktmodellen mit verringerter Unsicherheit am Beispiel der Spannkraftbestimmung einer elektrischen Parkbremse, Master-Thesis, 2017.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Jan Würtenberger
Geburtsdatum	22. August 1987
Geburtsort	Darmstadt
Nationalität	Deutsch

Ausbildung und berufliche Tätigkeit

06/2007	Abitur, Max-Planck Gymnasium, Groß- Umstadt
10/2007 - 07/2013	Studium an der Technischen Universität Darmstadt, Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen - technische Fachrichtung Maschinenbau. Abschluss M.Sc.
09/2013 - 12/2019	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente pmd
10/2017	Promotionsprüfung zum Doktoringenieur an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau.