

# Methodische Entwicklung aussagekräftiger Prototypen durch Analyse der Produktkonfigurationen

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

DISSERTATION

vorgelegt von

Stefan Schork, M.Sc.

aus Münster (Hessen)

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Beate Bender
Tag der Einreichung:	10.05.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	01.07.2020

Darmstadt 2020

D17

Schork, Stefan:

Methodische Entwicklung aussagekräftiger Prototypen durch Analyse der Produktkonfigurationen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 01.07.2020

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-142029

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/14202>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

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

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

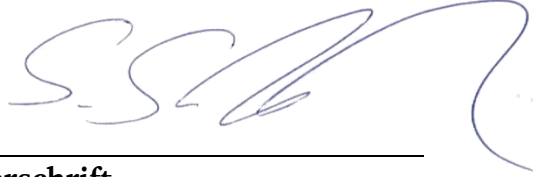
Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbstständig verfasst habe.

10.05.2020



---

**Datum, Unterschrift**

## Vorwort

*I made 5,127 prototypes of my vacuum before I got it right. There were 5,126 failures. But I learned from each one. That's how I came up with a solution.*

~James Dyson

Diese Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente der Technischen Universität Darmstadt entstanden. Die Motivation für diese Arbeit keimte dabei im Rahmen der Forschung hinsichtlich mechatronischer Maschinenelemente auf.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für die fachliche Unterstützung bedanken. Durch viele regelmäßige Forschungsgespräche reifte die Idee der Prototypenforschung stetig weiter und wurde auf das in dieser Arbeit behandelte Thema fokussiert. Besonders die vermittelten Einblicke bezüglich der industriellen Relevanz aufgrund der langjährigen Industrieerfahrung halfen mir dabei, das Forschungsthema aus neuen Blickwinkeln zu betrachten.

Bedanken möchte ich mich zudem bei Frau Prof. Dr.-Ing. Beate Bender für die Übernahme des Korreferats sowie für die gute Diskussion und den fachlichen Input zum Start der finalen Bearbeitungsphase dieser Dissertation.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets, die mich auf dem Weg zur Promotion begleitet haben. Hervorzuheben ist dabei Paul Beetz, mit dem ich im Anschluss an meine erste Konferenzteilnahme 2016 über mögliche Promotionsthemen diskutiert habe, woraus die Grundidee der Prototypenforschung entstand. Sven Vogel, Georg Martin und Gunnar Vorwerk-Handing danke ich für die langjährige Zusammenarbeit im Arbeitsbereich *Mechatronische Maschinenelemente* und den regelmäßigen Austausch über den aktuellen Stand unserer Forschung. Auch Tobias Schirra, Jan Wenzel, Marcel Neu und André Harder, die zeitweise ebenfalls Mitglieder des Arbeitsbereichs waren, sich jedoch dann auf die Forschung an *Smart Bearings* konzentrierten, danke ich für den wissenschaftlichen Austausch. Hermann Kloberdanz danke ich für die wissenschaftliche Unterstützung und die Denkanstöße hinsichtlich verwandter Forschungsthemen. Zudem war er für alle Themen rund um das Fachgebiet und die Lehre am Fachgebiet ein stets hilfsbereiter Ansprechpartner. Außerdem danke ich Fiona Schulte, Jannik Reichwein, Johannes Geis, Kay-Eric Steffan, Benjamin Kraus, Kris Rudolph, Yanik Koch und den bereits genannten für die angenehme Arbeitsatmosphäre und besonders für den kollegialen und sozialen Zusammenhalt auch abseits des Fachgebiets. Dies wird mir immer positiv in Erinnerung bleiben.

Abschließend bedanke ich mich bei allen, die mich außerhalb des Fachgebiets unterstützt haben, diese anstrengende und teils nervenaufreibende Zeit zu meistern. Meine Eltern und Familie standen dabei schon seit Beginn des Maschinenbaustudiums hinter mir und haben mich auf dem gesamten Weg begleitet. Der größte Dank geht dabei an dich, Sina, da du mich auch in schwersten Zeiten mental mit deiner Liebe und Zuneigung unterstützt hast. Ich bin froh, dass wir seit fast vier Jahren unsere Leben miteinander teilen und hoffe, dass dies für immer so bleibt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Struktur dieser Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung .....</b>	<b>5</b>
2.1	Prototypen im Allgemeinen.....	5
2.2	Ziele und Klassifikation von Prototypen .....	6
2.3	Strategien, Rahmenwerke und Herangehensweisen zur Entwicklung und Nutzung von Prototypen .....	11
2.4	Relevante Produktentwicklungsmodelle und -methoden.....	17
2.4.1	Grundlagen zu Modellen, Methoden, Produkten und Prozessen .....	17
2.4.2	Das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung.....	19
2.4.3	Das Prozessmodell nach Heidemann .....	21
2.4.4	Die Produktmodellpyramide .....	22
2.4.5	Das Contact&Channel-Modell .....	25
<b>3</b>	<b>Wissenschaftliche Herangehensweise und Ziele dieser Arbeit.....</b>	<b>26</b>
3.1	Zweck, Ziel und Kontext .....	26
3.2	Forschungsfragen und Hypothesen .....	28
3.3	Forschungsmethoden und Herangehensweise.....	31
<b>4</b>	<b>Sensorintegrierende Maschinenelemente .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung</b>	<b>38</b>
5.1	Definitionen und Begriffsverständnis .....	38
5.2	Prototypen als Mittel zum Zweck.....	41
5.3	Das detaillierte Prozessmodell der Prototypen .....	44
5.3.1	Beschreibung des detaillierten Prozessmodells des Prototypings.....	44
5.3.2	Verifikation des detaillierten Prozessmodells des Prototypings anhand von Beispielen.....	47
5.4	Das abgestimmte Modell der Prototypen-, Produkt und Prozessentwicklung ..	55
5.5	Die Unterschiede zwischen Produkt und Prototyp basierend auf der Produktmodellpyramide .....	61
<b>6</b>	<b>Ermittlung von Anforderungen an Prototypen.....</b>	<b>66</b>
6.1	Identifikation des Ziels.....	69
6.2	Übergeordnete Anforderungen an Prototypen.....	70
6.3	Bezogene Anforderungen an Prototypen.....	71
<b>7</b>	<b>Identifikation und Priorisierung der Entwicklungsschwerpunkte der Prototypenentwicklung .....</b>	<b>74</b>
7.1	Die kritischen Konfigurationen des zu entwickelnden Produkts .....	74
7.1.1	Bewertung der Neuheit .....	77
7.1.2	Bewertung der technischen Schwierigkeit.....	78
7.1.3	Bewertung der Relevanz für das Produkt .....	79
7.2	Modellierung und Analyse der inneren Struktur des Produkts .....	81
7.3	Das House of Configurations zur Ableitung bezogener Anforderungen.....	86

---

7.4	Einteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme .....	89
7.5	Substitution von Teillösungen.....	91
<b>8</b>	<b>Beispiele und Verifikation .....</b>	<b>93</b>
8.1	Entwicklung eines Prototyps einer sensorintegrierenden Federstegkupplung..	93
8.2	Entwicklung eines Prototyps einer drehmomentmessenden Welle-Nabe- Verbindung .....	103
8.3	Entwicklung eines Prototyps einer sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung.....	112
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>122</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick und weitere Forschungsthemen.....</b>	<b>127</b>
	<b>Anhang A.....</b>	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>132</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen.....</b>	<b>143</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten.....</b>	<b>145</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

ap <sup>3</sup> EM	Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung
CAD	Computer aided design
CAX	Computer aided Verfahren
CPM	Characteristics-Properties Modelling
EV	Variation der physikalischen Effekte
FV	Variation der Funktionsstruktur
GPPE	Ganzheitliche Produkt-und Prozessentwicklung
GV	Gestaltvariation
HiL	Hardware in the Loop
HoC	House of Configurations
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PDD	Property-Driven Development
PrV	Prozessvariation
PzV	Prinzipvariation
USP	Unique selling point
ÜV	Übernahmevariation
VV	Verfahrensvariation

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Konzept und erste Prototyp einer sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	2
Abbildung 2-1: Regelungszyklus des Problemlösungsprozesses in der Produktentwicklung.....	6
Abbildung 2-3: Vergleich eines Prototyps mit niedriger Wiedergabetreue (links) und hoher geometrischer Wiedergabetreue (rechts) .....	9
Abbildung 2-4: Klassifizierung von Prototypen am Beispiel eines Wälzlagers.....	10
Abbildung 2-4: Geometrisch skaliertes Prototyp eines Flugzeugs in einem Windtunnel in entsprechender Größe .....	13
Abbildung 2-5: Prototyp eines Kugelabsperrentils .....	15
Abbildung 2-6: Strategie zur Entwicklung mit Prototypen .....	16
Abbildung 2-7: Beispiel des hierarchischen Systemkonzepts anhand eines Automobils im Supersystem Verkehr .....	18
Abbildung 2-8: Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung .....	20
Abbildung 2-9: Manuelles Handschaltgetriebe (links) und Automatikgetriebe (rechts) zur Anpassung der Drehzahl und des Drehmoments eines Verbrennungsmotors im Fahrzeug .....	22
Abbildung 2-10: Produktmodellpyramide der Variationsarten bei der Entwicklung neuer Produkte .....	24
Abbildung 3-1: Impact Model zur Visualisierung der Verbindung zwischen dem Einsatz von Prototyping Methoden zur Entwicklung effizienter und effektiver Prototypen (unten) und der Entwicklung besserer Produkte, durch die die Kundenzufriedenheit gesteigert wird (oben) (eigene Abbildung). ..	27
Abbildung 3-2: Für diese Arbeit wichtige Kontextfaktoren .....	29
Abbildung 3-3: Wissenschaftliche Herangehensweise basierend auf der design research methodology.....	32
Abbildung 4-1: Zusammenstellung verschiedener konventioneller Maschinenelemente.	33
Abbildung 4-2: Verallgemeinerter Zusammenhang der Teilfunktionen sensor-integrierender Maschinenelemente .....	36
Abbildung 5-1: Einfacher Regelungszyklus zwischen Zielen, Prototypingaktivitäten und Ergebnissen .....	39
Abbildung 5-2: Visualisierung von divergierendem und konvergierendem Verlauf in der Produktentwicklung.....	40
Abbildung 5-3: Wissensquellen die als Basis der Antizipation dienen.....	41
Abbildung 5-4: Zweck-Mittel-Differenzierung beim Einsatz von Prototypen in der Produktentwicklung.....	43
Abbildung 5-5: Das detaillierte Prozessmodell des Prototypings bei der Verwendung von Prototypen im Produktentwicklungsprozess.....	45
Abbildung 5-6: Konzept und Prototyp des City eTaxi.....	47
Abbildung 5-7: Detailliertes Prozessmodell der Prototypingaktivität im Rahmen der Entwicklung des City eTaxi.....	48
Abbildung 5-8: Prototyp des intelligenten Reifens.....	49
Abbildung 5-9: Exemplarischer Flex-Sensor .....	49
Abbildung 5-10: Detailliertes Prozessmodell der Prototypingaktivität im Rahmen der Entwicklung des intelligenten Reifens .....	50
Abbildung 5-11: CAD-Modell (oben) und physischer Prototyp (unten) der sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	52

Abbildung 5-12: Gemessene Dehnung der Biegeplättchen des Prototyps der sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	53
Abbildung 5-13: Detailliertes Prozessmodell der Prototypingaktivität zur sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	54
Abbildung 5-14: Prozesskette der Prototypenentwicklung, beginnend mit der vorliegenden Aufgabe und der Klärung dieser hin zur Ausarbeitung des detaillierten Entwurfs .....	56
Abbildung 5-15: Prozesskette des Prototypenlebenslaufs, beginnend bei der Werkstoffherstellung bis hin zum Recycling beziehungsweise Entsorgung. Die Nutzungsphase des Prototyps verläuft dazu parallel. ..	57
Abbildung 5-16: Das abgestimmte Modell der Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung .....	58
Abbildung 5-17: Fertigungsprozess beim Spaltprofilieren (links) und gefertigtes Hohlraumprofil (rechts).....	59
Abbildung 5-18: Schematische Verdeutlichung des Übertrags des mittels Prototypen (rot hinterlegt) erhaltenen Wissens auf die Antizipation im Rahmen der Produktentwicklung (blau hinterlegt).....	61
Abbildung 5-19: Verschiedene allgemeine Variationen zwischen Prototypen und dem Produkt in Entwicklung basierend auf den verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide .....	62
Abbildung 5-20: Prototyp des intelligenten Reifens auf einem Prüfstand zur Abbildung gewisser während der Nutzung auftretenden Belastungen .....	63
Abbildung 6-1: Dreischrittige Herangehensweise zur Ermittlung und Festlegung von Anforderungen an Prototypen.....	68
Abbildung 6-2: Schematische Visualisierung von Prototypingaktivitäten zur Exploration im ersten und zweiten Lernprozess und zur Validierung im dritten Lernprozess.....	70
Abbildung 6-3: Tarnung von Fahrzeugen im Straßentest mittels geometriekaschierenden Anbauteilen (links) und mit speziell gemusterter Folie (rechts).....	71
Abbildung 7-1: Kritikalitätsarray zur Bewertung der Kritikalität der Konfigurationen des Produkts in Entwicklung.....	77
Abbildung 7-2: Veranschaulichung des Betrachtungsbereichs der Relevanz einer Konfiguration anhand des Kano-Modells .....	80
Abbildung 7-3: Einfluss der inneren Struktur und der Störgrößen auf das Ergebnis der prototypischen Versuche.....	82
Abbildung 7-4: Allgemeines Modell des Signalflusses des nutzbaren Signals (links), verschiedene mögliche Quellen von Störgrößen, die an den jeweiligen Komponenten auftreten können (Mitte) und exemplarische Signale, die als Störgrößen auf das nutzbare Signal einwirken (rechts).....	84
Abbildung 7-5: Sensorintegrierende Welle-Nabe-Verbindung. Das Eingangsdrehmoment wird durch die Schrägverzahnung im Zahneingriff in eine Axial-, Radial- und Tangentialkraft umgeformt. Die Axialkraft als nutzbares Signal wird in eine Verformung der Schraube gewandelt, die auf das Sensorelement übertragen wird. Der Sensor wandelt das nutzbare Signal in ein elektrisches Signal .....	85
Abbildung 7-6: Schematischer Aufbau des House of Configurations .....	87
Abbildung 7-7: Isolierter Prototyp eines elektrischen Antriebsstrangs im Hardware-in-the-Loop Prüfstand. ....	90

Abbildung 7-8: Schematische Darstellung des morphologischen Kastens mit zwei Kombinationen von Teillösungen für Teilfunktionen. Der gestrichelte Pfad zeigt dabei die Kombination mit substituierten Teillösungen der Teillösungen B und C. Die Teilfunktion E wird im Prototyp nicht abgebildet.....	92
Abbildung 8-1: Beispiel einer Federstegkupplung mit Visualisierung ausgewählter Funktionselemente und Darstellung der bei der Verbindung zweier Wellen auftretenden Versatzarten.....	93
Abbildung 8-2: Konzept der sensorintegrierten Federstegkupplung (links) und qualitativer Verlauf der am Biegeplättchen erwarteten Dehnung bei anliegenden Angular- oder Radialversatz über die Rotation der Kupplung (rechts).....	94
Abbildung 8-3: Zusammenhang der Teilfunktionen der sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	95
Abbildung 8-4: Signalflussanalyse des nutzbaren Signals der sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	97
Abbildung 8-5: House of Configurations der sensorintegrierenden Federstegkupplung – Teil 1 .....	99
Abbildung 8-6: House of Configurations der sensorintegrierenden Federstegkupplung – Teil 2 .....	100
Abbildung 8-7: Grad der Verteilung der kritischen Konfigurationen des Konzepts der sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	101
Abbildung 8-8: CAD-Modell und technische Zeichnung des Prototyps der sensorintegrierenden Federstegkupplung zur Untersuchung der Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“..	102
Abbildung 8-9: CAD-Modell des Konzepts der drehmomentmessenden Welle-Nabe-Verbindung .....	104
Abbildung 8-10: Kraftflussanalyse des Konzepts der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung .....	105
Abbildung 8-11: Signalflussanalyse des nutzbaren Signals der sensorintegrierenden Federstegkupplung .....	106
Abbildung 8-12: Prototyp der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung zur Untersuchung der Konfiguration „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ .....	108
Abbildung 8-13: House of Configurations der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung .....	109
Abbildung 8-14: Grad der Verteilung der kritischen Konfigurationen des Konzepts des sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung .....	110
Abbildung 8-15: Prototyp der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung zur Untersuchung der Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals“ .....	111
Abbildung 8-16: Konventionelle elastische Klauenkupplung .....	112
Abbildung 8-17: CAD-Modell des Konzepts der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung.....	113
Abbildung 8-18: Zusammenhang der Teilfunktionen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung.....	114
Abbildung 8-19: Signalflussanalyse des nutzbaren Signals der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung.....	115

---

Abbildung 8-20: House of Configurations der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung – Teil 1 .....	117
Abbildung 8-21: House of Configurations der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung – Teil 2 .....	118
Abbildung 8-22: Grad der Verteilung der kritischen Konfigurationen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung.....	119
Abbildung 8-23: CAD-Modell des Prototyps der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung zur Untersuchung der Konfiguration „Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ .....	120
Abbildung 8-24: Technische Zeichnung des Prototyps der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung.....	121

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über exemplarische unternehmensspezifische Anforderungen in Prototypen .....	67
Tabelle 2: Repräsentative Unterschiede zwischen Anforderungen an Prototypen und Anforderungen an das Produkt in Entwicklung .....	72
Tabelle 3: Wertebereich der Bewertung des Neuheitsgrads eines Produkts in Entwicklung mit Beschreibung der Anhaltspunkte zur Vergabe eines Wertes .....	78
Tabelle 4: Wertebereich der Bewertung der technischen Schwierigkeit eines Produkts in Entwicklung mit Beschreibung der Anhaltspunkte zur Vergabe eines Wertes .....	79
Tabelle 5: Wertebereich der Bewertung der Relevanz eines Produkts in Entwicklung mit Beschreibung der Anhaltspunkte zur Vergabe eines Wertes .....	81
Tabelle 6: Wertebereich zur Bewertung der Abhängigkeit der Konfigurationen von den entsprechenden Eigenschaften und Merkmalen der Komponenten des Produkts in Entwicklung .....	88
Tabelle 7: Kritikalitätsbewertung der Konfigurationen der sensorintegrierenden Federstegkupplung.....	129
Tabelle 8: Kritikalitätsbewertung der Konfigurationen der sensorintegrierenden drehmomentmessenden Welle-Nabe-Verbindung.....	130
Tabelle 9: Kritikalitätsbewertung der Konfigurationen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung .....	131

## Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das Thema der methodischen Entwicklung von und mit Prototypen behandelt. Als Prototypen werden dabei alle Abbilder des in der Entwicklung befindlichen Produkts, angefangen bei ersten Skizzen und analytischen Berechnungen, über CAD-Modelle, rechnergestützte Simulationen und physische Geometriemuster, bis hin zu voll funktionsfähigen Vorserienmodellen verstanden. Die Analyse der Literatur bezüglich des Einsatzes und der Entwicklung von Prototypen zeigt, dass insbesondere der Einsatz von Prototypen im Produktentwicklungsprozess als Mittel zur Sicherung des Erfolgs des Produkts einen hohen Stellenwert einnimmt. Im Rahmen der Forschung stehen dabei häufig die Einflüsse verschiedener Prototypingvariablen, beispielsweise der Verwendung skalierter Modelle oder das Entspannen der Anforderungen für den prototypischen Versuch im Vordergrund. Dadurch entstehen Rahmenwerke und Richtlinien, mit deren Hilfe Produktentwickelnde die strategische Planung der anstehenden Prototypingaktivitäten durchführen können. Dabei bleibt jedoch im Allgemeinen offen, wie die Entwicklung der einzusetzenden Prototypen an sich verbessert werden kann. Gibt die ermittelte Strategie beispielsweise vor, das zu einem gegebenen Zeitpunkt ein physischer Funktionsprototyp eines zu isolierenden Subsystems einzusetzen ist, ergibt sich die Frage, welche Anforderungen dieser Prototyp erfüllen muss, damit die bei der Untersuchung des Prototyps gesammelten Informationen auch auf das Produkt in Entwicklung übertragen werden können. Die Beantwortung dieser Frage erfolgt häufig weitgehend intuitiv und ist aufgrund dessen stark von der Erfahrung der Entwickelnden abhängig. Diese Arbeit leistet daher einen Beitrag dazu, die Entwicklung des Prototyps an sich in den Vordergrund zu stellen und auch diese Entwicklung, ähnlich zur Entwicklung von Produkten, methodischer zu gestalten, um sowohl Effektivität als auch Effizienz des Prototypings zu steigern, weitgehend unabhängig von der Erfahrung der beteiligten Entwickelnden.

Zur Erreichung dieses Beitrags wird zunächst eine Zweck-Mittel-Differenzierung bezüglich Prototypen durchgeführt, auf deren Basis das detaillierte Prozessmodell des Prototypings vorgestellt wird. Um die Entwicklung von Prototypen weiter in den Fokus zu stellen, wird daraufhin das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung um die Entwicklung von Prototypen erweitert, wodurch das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung entsteht. Innerhalb dieses Modells wird die Klärung der Aufgabenstellung als Grundlage der anstehenden Prototypenentwicklung besonders stark gewichtet, woraufhin mit dem House of Configurations eine Methode zur Ermittlung von Anforderungen an den zu entwickelnden Prototyp vorgestellt wird. Dieses beruht auf dem aus der Produktentwicklung bekannten House of Quality und setzt die Funktionen sowie die möglichen, darauf wirkenden Störgrößen in Beziehung zu den Merkmalen und Eigenschaften des Produkts in Entwicklung. Dadurch wird Produktentwickelnden ermöglicht, die Anforderungen an den Prototyp derart festzulegen, dass deren Aussagefähigkeit nicht negativ beeinflusst wird und daher die anhand der prototypischen Untersuchungen erhaltenen Informationen auf das Produkt in Entwicklung übertragen werden können.

## Abstract

This thesis deals with the topic of methodical development of and with prototypes. Prototypes are understood to be all images of the product under development, starting with first sketches and analytical calculations, through CAD models, computer-aided simulations and physical geometry patterns, up to fully functional pre-series models. The analysis of the literature regarding the use and development of prototypes shows that the use of prototypes in the product development process as a means to ensure the success of the product is of great importance. In the context of research, the influences of different prototyping variables, for example the use of scaled models or the relaxation of requirements for the prototypical test, are often in the foreground. This results in frameworks and guidelines that help product developers to carry out the strategic planning of the prototyping activities. In general, however, it remains open how the development of the prototypes can be improved. For example, if the determined strategy specifies that a physical functional prototype of an isolated subsystem is to be used at a given point in time, the question arises as to what requirements this prototype must meet so that the information gathered during the examination of the prototype can also be transferred to the product under development. The answer to this question is often largely intuitive and is therefore highly dependent on the experience of the developer. This work therefore contributes to the development of the prototype itself and, similar to the development of products, to making this development more methodical in order to increase both effectiveness and efficiency of prototyping, largely independent of the experience of the developers involved.

To achieve this goal, a differentiation of means and ends with regard to prototypes will be carried out, on the basis of which the detailed process model of prototyping will be presented. To further focus on the development of prototypes, the model of holistic product and process development will then be extended by the development of prototypes, thus creating the model of the coordinated prototype, product and process development. Within this model, the clarification of the task as the basis for the upcoming prototype development is given special emphasis, whereupon a method for the determination of requirements for the prototype to be developed is presented with the House of Configurations. This is based on the House of Quality known from product development and relates the functions as well as the possible disturbance variables acting on the functions to the characteristics and properties of the product under development. This enables product developers to define the requirements for the prototype in such a way that its significance is not negatively influenced and therefore the information obtained from the prototype tests can be transferred to the product in development.

## 1 Einleitung

Der Einsatz von Prototypen in der Entwicklung neuer und innovativer Produkte wird im Rahmen der Literatur und Lehre stets empfohlen. Dabei stehen zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Entwicklungsprojektes unterschiedliche Ziele – vom Klären der Aufgabenstellung und Aufspannen des Lösungsraums bis hin zur Verifikation und Validierung aller ermittelten Anforderungen – im Vordergrund, deren Erreichung mittels Prototypen unterstützt werden kann. Dabei kommen unterschiedliche Arten, Klassen und Manifestationen von Prototypen zum Einsatz, die mit unterschiedlichen Techniken entwickelt und hergestellt werden. Das Feld der Prototypen reicht dabei von ersten Zeichnungen und analytischen Berechnungen, über CAD-Modelle und physische Geometrieprototypen bis hin zu voll funktionsfähigen Vorserienmodellen. Trotz des hohen Stellenwertes von Prototypen, erscheint die Beschreibung der methodischen Herangehensweise zur Entwicklung dieser Prototypen und dem effektiven sowie effizienten Einsatz im Produktentwicklungsprozess im Vergleich zur Beschreibung derartiger Produktentwicklungsmethoden unterrepräsentiert. Die Entwicklung von Prototypen wird vielmehr als intuitiver Entwicklungsprozess verstanden.<sup>1</sup> Daher soll im Rahmen dieser Arbeit das Feld der Prototypen aufgearbeitet werden und ein Beitrag dazu geleistet werden, die Entwicklung von und mit Prototypen methodischer zu gestalten, wobei auf die Erkenntnisse aus der methodischen Produktentwicklung zurückgegriffen wird.

### 1.1 Motivation

Die Digitalisierung des Maschinenbaus erfordert die Erhöhung der Quantität und Qualität der Daten und Informationen hinsichtlich der in Systemen des Maschinenbaus ablaufenden Prozesse sowie der Zustände dieser Systeme. Dadurch können die entsprechenden Systeme einerseits je nach Zustand beeinflusst werden, beispielsweise um die Qualität von Fertigungsprozessen sicherzustellen<sup>2</sup> und andererseits können Wartungsarbeiten genau dann durchgeführt werden, wenn diese benötigt werden, anstelle einer rein präventiven Wartung (Predictive Maintenance).<sup>3</sup> Dieser Bedarf kann einerseits durch die Auswertung vorhandener Daten in Kombination mit einer Verbesserung der zugrundeliegenden Modelle der Systeme erfolgen oder andererseits durch die Applikation zusätzlicher Sensorik und der Aufnahme neuer Daten. Vor diesem Hintergrund entstand im Jahr 2016 am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente die Idee der Entwicklung „Mechatronischer Maschinenelemente“, die eine Integration sensorischer und aktorischer Funktionen sowie Funktionen zur Kommunikation in weitgehend standardisierte und weitverbreitete Maschinenelemente beschreibt.<sup>4</sup> Dabei steht nicht die Überwachung und Beeinflussung des Maschinenelements im Vordergrund, sondern die Überwachung und Beeinflussung der Prozesse, deren Prozessgrößen direkten Einfluss auf das Maschinenelement ausüben. Um dem akuten Bedarf an qualitativ hochwertigen Daten gerecht zu werden, steht die Entwicklung sensorintegrierender Maschinenelemente<sup>5</sup> dabei zunächst im Vordergrund. Abbildung 1-1 zeigt das Konzept einer sensorintegrierenden Federstegkupplung

---

<sup>1</sup> Vgl. Camburn et al. (2013b), S. 1.

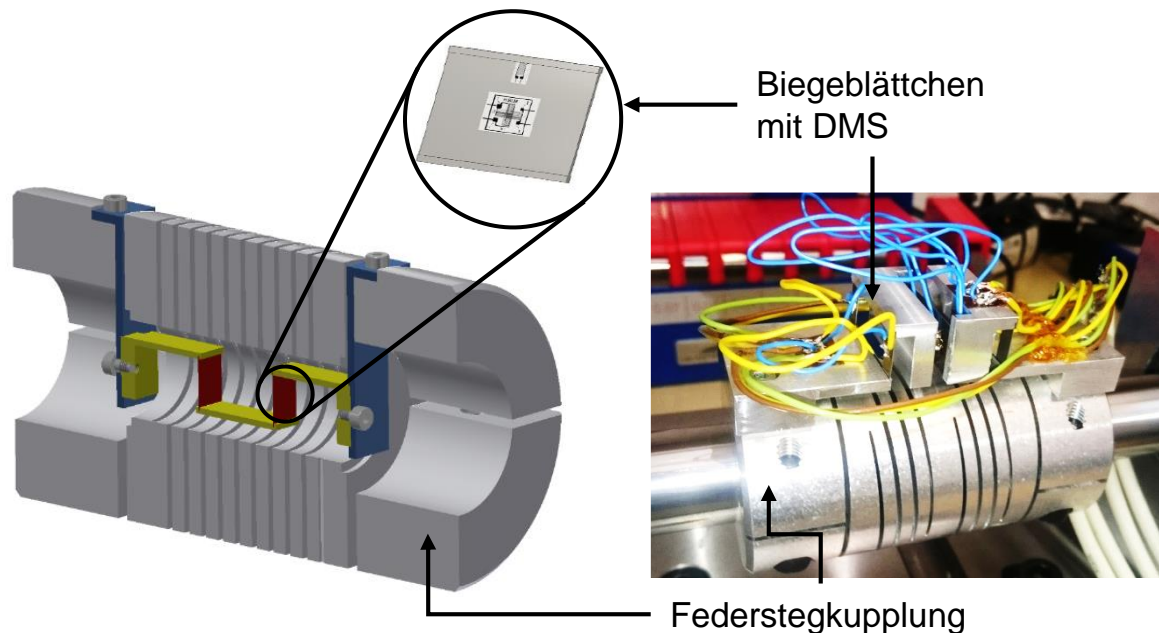
<sup>2</sup> Vgl. Groche und Brenneis (2014).

<sup>3</sup>Nähere Informationen zu „Predictive Maintenance“ finden sich beispielsweise in Mobley (2002).

<sup>4</sup> Vgl. Schork et al. (2016).

<sup>5</sup> Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2019).

(links) zur Messung des Wellenversatzes verbundener Wellen und einen dazu entwickelten physischen Prototyp (rechts). Bereits der optische Vergleich zwischen Konzept und Prototyp zeigt, dass deutliche Unterschiede zwischen diesen bestehen. Fraglich ist daher, inwieweit die mittels Prototyp erhaltenen Ergebnisse zu neuen Erkenntnissen im Produktentwicklungsprozess der sensorintegrierenden Federstegkupplung führen.



**Abbildung 1-1: Konzept und erste Prototyp einer sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>6</sup>**

Durch die Neuheit sensorintegrierter Maschinenelemente rückt besonders der Einsatz von Prototypen im Entwicklungsprozess in den Vordergrund, da diese Prototypen eine zentrale Rolle in der Entwicklung innovativer Lösungen spielen.<sup>7</sup> Einerseits können Prototypen dazu eingesetzt werden, neue Lösungsmöglichkeiten und den Lösungsraum zu erkunden sowie die Kreativität der Entwickelnden zu begünstigen, andererseits können Prototypen dazu eingesetzt werden, Konzepte im Rahmen der Validierung und Verifikation zu überprüfen. Die Validierung ist demnach ein essentieller Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses und Anstoß zur Entwicklung von Prototypen.<sup>8</sup> Es liegt nahe, dass die dabei eingesetzten Prototypen derart beschaffen sein müssen, dass die im Rahmen der Verifikation und Validierung erhaltenen Ergebnisse auch auf das Produkt in Entwicklung übertragbar sind.

Bereits im Jahr 2008 betragen die Kosten für Forschung und Entwicklung neuer 141,8 Milliarden Dollar.<sup>9</sup> Zusätzlich sinkt die für den Entwicklungsprozess zur Verfügung stehende Zeit stetig, da Produktlebenszyklen immer kürzer werden und eine rechtzeitige Platzierung des Produkts am Markt essentiell für den wirtschaftlichen Erfolg des Produkts ist.<sup>10</sup> Trotz des dadurch erhöhten Drucks auf die Produktentwicklung, muss verhindert werden,

<sup>6</sup> Eigene Darstellung.

<sup>7</sup> Vgl. Elverum und Welo (2014), S. 496.

<sup>8</sup> Vgl. Albers et al. (2016b), S. 563.

<sup>9</sup> Vgl. Cooper (2008).

<sup>10</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 85ff.

dass Produkte nach vorangeschrittener Entwicklungszeit ohne Markteinführung bereits eingestellt werden und es muss verhindert werden, dass Produkte eingeführt werden, die nicht den Anforderungen der möglichen Kunden entsprechen und sich dementsprechend nicht verkaufen oder gar eine Gefahr für Kunden und deren Umfeld darstellen. Der Einsatz von Prototypen in frühen Phasen bietet dabei das Potential, Konzepte bereits zu Beginn der Entwicklung hinsichtlich deren Eignung zu bewerten, wohingegen in späteren Phasen eingesetzte Prototypen zur Sicherstellung des Erfolgs des Produkts beitragen.<sup>11</sup> Durch die Entwicklung und den Einsatz Prototypen entsteht dabei zunächst ein Großteil der Entwicklungskosten, jedoch ist der Entwicklungsprozess der Prototypen im Vergleich zum Entwicklungsprozess von Produkten wenig erforscht und verstanden.<sup>12</sup> Studien zeigen jedoch, dass methodisches Vorgehen in der Entwicklung von Prototypen sowohl vorteilhaft für einzelne Entwickelnde<sup>13</sup>, als auch für Entwicklungsteams<sup>14</sup> und letztendlich für das zu entwickelnde Produkt<sup>15</sup> sind. Daher besteht Forschungsbedarf im Bereich der Prototypenentwicklung und dem Einsatz von Prototypen um Entwickelnden methodische Hilfsmittel zur Optimierung der Prototypenentwicklung zur Verfügung zu stellen.

In einer Vielzahl von Veröffentlichungen, die die Entwicklung neuer Produkte beschreiben, werden Prototypen dieser Produkte gezeigt, anhand derer das Produkt einerseits vorgestellt wird und anhand derer andererseits gezeigt wird, dass das Produkt einen Beitrag zur Lösung des Problems, zu dem das Produkt entwickelt wird, leistet. Im Allgemeinen wird dabei die Entwicklung des jeweiligen Prototyps an sich nicht näher beschrieben und die Übertragbarkeit der Ergebnisse der prototypischen Untersuchungen auf das Produkt in Entwicklung wird als gegeben angesehen. Auch die Bewertung der Aussagekraft der Ergebnisse der prototypischen Untersuchung hinsichtlich der Übertragbarkeit auf das Produkt in Entwicklung bleibt zumeist aus und es mangelt an einem klaren Verständnis darüber, wie das durch den Einsatz von Prototypen gewonnene Wissen beschrieben werden kann.<sup>16</sup> Auch zeigt sich, dass der Einsatz mehrere Prototypen zwar als vorteilhaft beschrieben wird, jedoch auch, dass nicht jeder entwickelte Prototyp zum Fortschritt des Entwicklungsprojekts führt.<sup>17</sup> Neben der Beantwortung der Frage hinsichtlich der Effektivität des Prototypings erscheint daher die Steigerung der Effizienz des Prototypings zur Ausnutzung des Kosteneinsparpotenzials<sup>18</sup> prototypischer Untersuchungen aussichtsreich. Beide dieser Faktoren motivieren damit den im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Ansatz zur Verschiebung der intuitionsbasierten Entwicklung von Prototypen hin zu einer methodischeren Entwicklung von und mit Prototypen.

## 1.2 Struktur dieser Arbeit

Diese Arbeit setzt sich aus neun Kapiteln zusammen, beginnend mit der Einleitung und Motivation sowie der Struktur der Arbeit in den ersten beiden Abschnitten des ersten Kapitels. Daran schließt sich die Zusammenfassung des Stands der Forschung in den relevanten Themengebieten in Kapitel 2 an. Basierend auf dem Stand der Forschung beschreibt

---

<sup>11</sup> Vgl. Elverum und Welo (2014), S. 491ff.

<sup>12</sup> Vgl. Camburn et al. (2015a), S. 2.

<sup>13</sup> Vgl. Dunlap et al. (2014).

<sup>14</sup> Vgl. Viswanathan und Linsey (2011).

<sup>15</sup> Vgl. Christie et al. (2012) und Menold et al. (2016).

<sup>16</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a,) S. 25.

<sup>17</sup> Vgl. Böhmer et al. (2017), S. 962.

<sup>18</sup> Vgl. Kampker et al. (2018), S. 30.

Kapitel 3 die wissenschaftliche Herangehensweise und die Ziele, die für diese Arbeit gesetzt werden. Im Zuge dessen werden auch die Forschungsfragen und Hypothesen, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet und überprüft werden sollen, vorgestellt.

In Kapitel 4 werden mechatronische Maschinenelemente und insbesondere sensorintegrierende Maschinenelemente näher thematisiert, da diese später zur Verifikation der in dieser Arbeit vorgestellten Methoden als Beispiele herangezogen werden. In Kapitel 5 werden das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung sowie das detaillierte Prozessmodell der Prototypen inklusive deren Herleitung über die Zweck-Mittel-Differenzierung erörtert. Darauf folgt Kapitel 6, in dem das Thema der Anforderungsermittlung im Zusammenhang mit der Entwicklung von Prototypen diskutiert wird. Dabei werden die typischen Unterschiede zwischen Produktanforderungen und Prototypenanforderungen ermittelt woraus sich Hinweise auf die Ermittlung von Anforderungen an Prototypen ergeben. Zusammen mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 werden in Kapitel 6 Möglichkeiten zur Identifikation und Festlegung von Prototypenanforderungen aufgezeigt. Dies wird methodisch unterstützt durch die in Kapitel 7 vorgestellten Methoden zur Analyse des zu entwickelnden Produkts hinsichtlich dessen kritischer Konfigurationen und deren Zusammenhang mit den Merkmalen und Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts im House of Configurations, woraus sich Entwicklungsschwerpunkte für die Prototypenentwicklung ableiten lassen. Die Anwendbarkeit dieser Methoden wird durch die beispielhafte Entwicklung von Prototypen zu sensorintegrierenden Maschinenelementen in Kapitel 8 verifiziert. Kapitel 9 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und diskutiert diese kritisch. Den Abschluss stellt der in Kapitel 10 gegebene Ausblick auf offene Fragestellungen und den weiteren Forschungsbedarf dar. Unterstützende Dokumente sind im Anhang enthalten.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Entwicklung von und mit Prototypen erläutert sowie erste wichtige, in der Literatur verwendete, Definitionen im Rahmen dieser Arbeit eingeführt. Dazu werden Prototypen in Abschnitt 2.1 allgemein beschrieben und deren Ziele und Klassifikation in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Die Rolle, die Prototypen im Entwicklungsprozess neuer Produkte einnehmen sowie die existierenden Strategien, Rahmenwerke und Herangehensweisen zur Nutzung und dem Einsatz von Prototypen sind in Abschnitt 2.3 beschrieben. Abschnitt 2.4 behandelt die für diese Arbeit relevanten Produktentwicklungsmethoden und -modelle und schafft generelle Grundlagen des Modell-, Methoden- und Systemverständnisses. Sensorintegrierende Maschinenelemente, die in dieser Arbeit dazu eingesetzt werden den Einsatz der vorgestellten Methoden und Modelle beispielhaft zu zeigen, werden aufgrund der Aktualität und dem hohen Anteil eigener Veröffentlichungen in Kapitel 4 vorgestellt.

### 2.1 Prototypen im Allgemeinen

Der Begriff *Prototyp* leitet sich aus der Zusammensetzung der griechischen Wörter *protos* (dt. *das Erste*) und *typos* (dt. *Urbild, Vorbild*) ab und bezeichnet somit bezogen auf Produkte eine erste Manifestation eines Produkts, wobei ein Vielzahl von Definitionen zur Beschreibung des Begriffs verwendet wird.<sup>19</sup> Prototypen werden dabei im Entwicklungsprozess des entsprechenden Produkts eingesetzt, um verschiedene Ziele, die in Abschnitt 2.2 näher erläutert werden, zu erreichen. Dabei tragen besonders Prototypen in frühen Phasen entscheidend zum Erfolg bei.<sup>20</sup> Im Rahmen dieser Arbeit werden in Anlehnung an ALBERS ET AL. (2018) Produkte, die sich im Entwicklungsprozess befinden und zu denen offene Fragen existieren, als *Produkt in Entwicklung* bezeichnet, siehe Definition 1.<sup>21</sup> Nach Abschluss des Entwicklungsprozesses liegt das *finale Produkt* vor. Prototypen geben bereits während des Produktentwicklungsprozesses einen Ausblick auf das finale Produkt und dienen zur Beantwortung offener Fragen hinsichtlich dieses finalen Produktes. Obwohl die genaue Begriffsdeutung lediglich das erste Abbild des finalen Produkts bezeichnet, werden umgangssprachlich und im Rahmen dieser Arbeit alle Abbilder des finalen Produkts, die im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden, als Prototypen bezeichnet.<sup>22</sup>

#### **Produkt in Entwicklung**

Def. 1

*Das Produkt in Entwicklung ist das Produkt, das sich zurzeit in der Entwicklung befindet und zu dem offene Fragen existieren.*

Das Problemlösen in der Produktentwicklung wird im Rahmen der VDI RICHTLINIE 2221 – angelehnt an Modellvorstellungen unseres Denken und Handelns – als Regelungszyklus zwischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen beschrieben.<sup>23</sup> *Aktivitäten* beschreiben dabei die notwendigen Schritte, um von der Zielstellung zu Ergebnissen und schließlich zur *Lösung* zu gelangen. Im Rahmen der Aktivitäten wird dabei einerseits *Synthese* betrieben,

<sup>19</sup> Vgl. Petrakis et al. (2019), S. 1643.

<sup>20</sup> Vgl. Elsen et al. (2012), S. 9.

<sup>21</sup> Vgl. Albers et al. (2018), S. 6ff.

<sup>22</sup> Vgl. Ulrich und Eppinger (1995), Wood und Otto (1999).

<sup>23</sup> Vgl. VDI Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 9.

durch die Ergebnisse erzeugt werden und andererseits werden diese Ergebnisse im Rahmen der *Analyse* mit den Zielen verglichen, wie in Abbildung 2-1 dargestellt. Werden bei dieser Analyse Abweichungen zwischen den gesetzten Zielen und den erarbeiteten Ergebnissen festgestellt, so werden die Ergebnisse durch weitere Syntheseschritte angepasst, bis eine zufriedenstellende Lösung erreicht ist. In diesem Regelungszyklus können Prototypen im Rahmen der Analyse eingesetzt werden, um die vorliegenden Ergebnisse, beispielsweise Konzepte eines Produkts in Entwicklung, auf deren Konformität mit den angestrebten Zielen zu überprüfen.<sup>24</sup> Weiter Ziele, zu deren Erreichung Prototypen im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden, werden in Abschnitt 2.2 näher beschrieben.

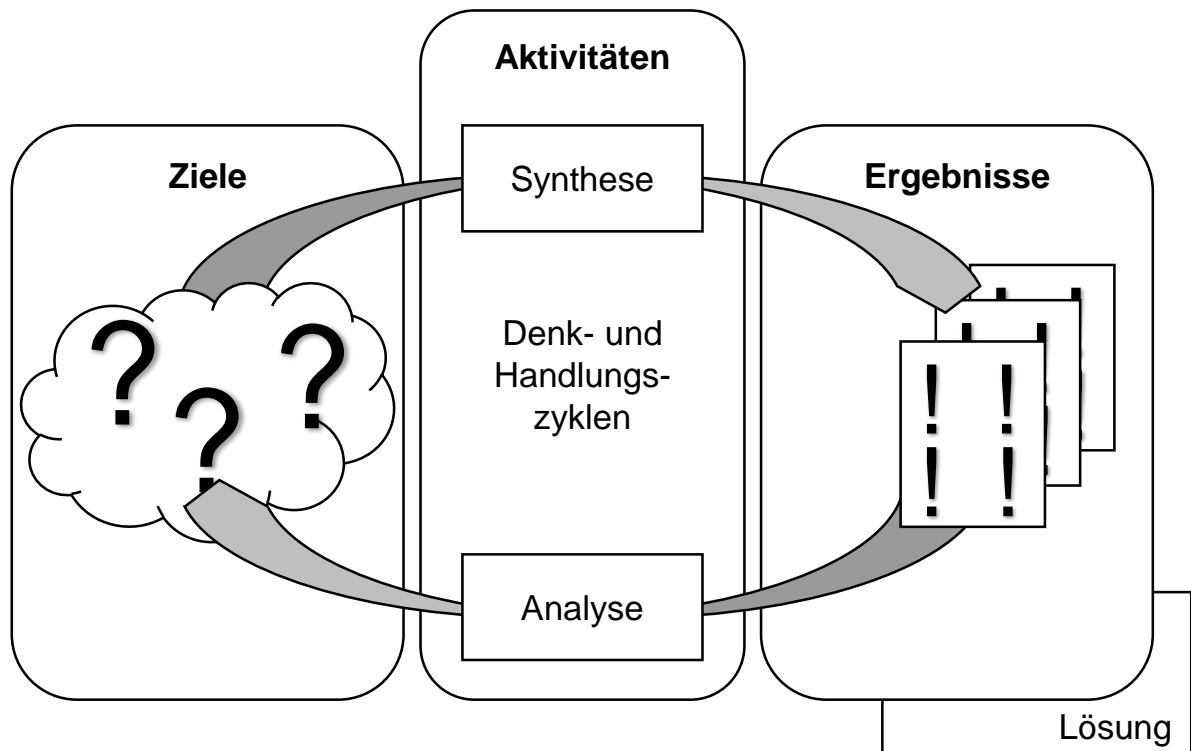


Abbildung 2-1: Regelungszyklus des Problemlösungsprozesses in der Produktentwicklung<sup>25</sup>

## 2.2 Ziele und Klassifikation von Prototypen

Prototypen werden im Produktentwicklungsprozess unter Vorgabe verschiedener Ziele eingesetzt. Dabei wird in der Literatur eine Vielzahl von Zielen beschrieben, die sich jedoch nicht vollkommen voneinander trennen lassen und zeigen somit Überschneidungen in der Beschreibung der Ziele.<sup>26</sup> ULRICH UND EPPINGER (1995) beschreiben dabei beispielsweise die vier Ziele *Lernen*, *Kommunikation*, *Integration* und *Meilensteine*. *Lernen* bezieht sich dabei auf das Gewinnen neuer Informationen über das Produkt in Entwicklung und insbesondere hinsichtlich der Fragestellungen, ob ein Produkt in Entwicklung funktionieren wird, ob dieses den Anforderungen der späteren Nutzer entspricht und ob der Entwurf frei

<sup>24</sup> Vgl. VDI Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 21.

<sup>25</sup> Eigene Darstellung basierend auf VDI Richtlinie 2221.

<sup>26</sup> Vgl. Petrakis et al. (2019), S. 1643.

von kritischen Fehlern ist.<sup>27</sup> Zudem kann mittels Prototypen über das vorliegende Problem und die Rahmenbedingungen gelernt werden, wodurch die Klärung der Entwicklungsaufgabe unterstützt wird.<sup>28</sup> Durch den Einsatz physischer Prototypen wird dabei auch der Gewinn impliziten Wissens hinsichtlich komplexer Phänomene unterstützt.<sup>29</sup> Das Ziel der Verbesserung der *Kommunikation* bezieht sich hingegen darauf, dass Prototypen dazu eingesetzt werden, allen an der Entwicklung Beteiligten ein einheitliches Verständnis über das Produkt in Entwicklung zu vermitteln und die Grundlage für Diskussionen, beispielsweise hinsichtlich des weiteren Vorgehens, zu geben. Dabei können bereits zu Beginn des Produktentwicklungsprozess erste Prototypen eingesetzt werden, um die Klärung der Aufgabenstellung weiter zu unterstützen und die Interaktion der Nutzer mit dem Produkt in Entwicklung zu begutachten.<sup>30</sup> Die Kommunikation kann dabei sowohl intern im Rahmen der Entwickelnden<sup>31</sup> als auch extern zu den Kunden, zum Beispiel im Sinne der Präsentation von Designstudien, stattfinden. Das Ziel der *Integration* beschreibt den Einsatz von Prototypen zur Untersuchung des Produkts in Entwicklung hinsichtlich dessen Integration in dessen späteres Gesamtsystem. Dabei stehen beispielsweise Fragestellungen hinsichtlich der Einhaltung mechanischer und elektrischer Schnittstellen sowie des verfügbaren Bau- raums oder hinsichtlich der Einbindung des Produkts in Entwicklung in einen Regelkreis im Vordergrund. Bezüglich der *Meilensteine*, die im Produktentwicklungsprozess, beispielsweise in Form von Gates im Stage-Gate-Prozess,<sup>32</sup> festgelegt werden, können Prototypen dazu eingesetzt werden, das Erreichen der Meilensteine zu beweisen und das erwartete Verhalten eines Konzepts zu verifizieren.<sup>33</sup> Ein weiteres in der Literatur beschriebenes Ziel ist die *Exploration*. Dabei werden Prototypen dazu eingesetzt, den Konzeptprozess zu unterstützen. Dies geschieht einerseits mit dem Ansatz, bestehende Konzepte zu verbessern und andererseits, um neue Konzepte zu erstellen.<sup>34</sup>

Neben der Einteilung von Prototypen anhand der bei deren Einsatz verfolgten Ziele lassen sich Prototypen nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Dadurch kann der sehr oberflächlich und allgemein verwendete Begriff des Prototyps, der von verschiedenen Parteien unterschiedlich interpretiert wird,<sup>35</sup> spezifiziert werden, wodurch die Kommunikation zwischen den an der Entwicklung beteiligten Parteien verbessert wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden die nachfolgenden Gesichtspunkte voneinander unterschieden.

### **Virtuelle und physische Prototypen**

Als virtuelle Prototypen werden Abbilder des Produkts in Entwicklung bezeichnet, die lediglich in virtueller Form vorliegen. Dabei handelt es sich beispielsweise um einfache analytische Berechnungen, Strömungs- und Mehrkörpersimulationen, Zeichnungen und CAD-Modelle des Produkts in Entwicklung, anhand derer erste Tests, Analysen und Präsentationen durchgeführt werden können.<sup>36</sup> Virtuelle Prototypen verursachen aufgrund der nicht

---

<sup>27</sup> Vgl. Gordon und Bieman (1988).

<sup>28</sup> Vgl. Hess und Summers (2013), S. 257.

<sup>29</sup> Vgl. Telenko et al. (2016), S. 135.

<sup>30</sup> Vgl. Kurvinen et al. (2008).

<sup>31</sup> Vgl. Reed Doke (1990), S. 171, Buchenau und Suri (2000), S. 424.

<sup>32</sup> Vgl. Cooper (1983), S. 7.

<sup>33</sup> Vgl. Lemons et al. (2010), S. 289.

<sup>34</sup> Vgl. Hess und Summers (2013), S. 257.

<sup>35</sup> Vgl. Houde und Hill (1997), S. 368.

<sup>36</sup> Vgl. Hamon et al. (2014), S. 2, Zorriassatine et al. (2005), S. 517.

benötigten Materialien und Herstellungsprozesse weniger Kosten<sup>37</sup> und erlauben das Testen mehrerer Entwürfe in kurzem zeitlichem Abstand.<sup>38</sup> Dabei muss jedoch im Allgemeinen ein hoher Detaillierungsgrad erreicht werden, um deren Genauigkeit bezüglich der Abbildung des Verhaltens des Produkts in Entwicklung sicherzustellen.<sup>39</sup> Dazu wird bereits ein gutes Verständnis des Produkts in Entwicklung vorausgesetzt um entsprechende Modelle zu erstellen. Im Gegensatz dazu stellen physische Prototypen Abbilder des Produkts in Entwicklung dar, die bereits greifbar sind. Physische Prototypen können dabei teilweise oder vollständig funktionsfähig sein und erlauben die haptische Interaktion der Testenden mit dem Prototyp.<sup>40</sup> Um abzuschätzen, ob physische oder virtuelle Prototypen zur Beantwortung der vorliegenden Fragen eingesetzt werden sollten kann beispielsweise die von HAMON ET AL. (2014) vorgestellte Likert-Skala eingesetzt werden. Dabei werden der geschätzte Aufwand zur Erstellung des Prototyps, deren erwartete Genauigkeit und Aussagefähigkeit sowie die Anzahl der erwarteten, notwendigen Iterationen berücksichtigt.<sup>41</sup> ULRICH UND EPPINGER (1995) stellen eine ähnliche Möglichkeit zur Entscheidung vor, wobei jedoch lediglich das Verhältnis des Aufwands zur Erstellung eines virtuellen Prototyps zum physischen Prototyp mit dem Verhältnis der Aussagefähigkeit des virtuellen Prototyps zum physischen Prototyp in die Entscheidungsfindung einbezogen wird. Neben rein physischen und rein virtuellen Prototypen, existieren auch Mischformen, die beispielsweise als hybride Prototypen<sup>42</sup>, gemischte Prototypen (übersetzt aus dem Englischen: mixed-prototypes)<sup>43</sup> oder gemischt physisch-virtuelle Prototypen<sup>44</sup> bezeichnet werden und physische mit virtuellen Elementen verknüpfen.<sup>45</sup> Auch Hardware-in-the-Loop, beziehungsweise X-in-the-Loop Prüfstände, verbinden virtuelle und physische Elemente im prototypische Gesamtsystem, wodurch diese auch als gemischt physisch-virtuelle Prototypen bezeichnet werden können. Dabei kommt insbesondere der Kopplung zwischen physischen und virtuellen Komponenten mittels Koppelsystemen bestehend aus Aktoren und Sensoren eine zentrale Rolle zu, da diese den prototypischen Versuch nicht verfälschen dürfen.<sup>46</sup>

---

<sup>37</sup> Vgl. Mitchell (2004), S. 1473.

<sup>38</sup> Vgl. Christie et al. (2012)

<sup>39</sup> Vgl. Zorriassatine et al. (2005), S. 523.

<sup>40</sup> Vgl. Hamon et al. (2014), S. 2.

<sup>41</sup> Vgl. Hamon et al. (2014), S. 8.

<sup>42</sup> Vgl. Buchholz et al. (2018).

<sup>43</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), S. 19, Camere und Bordegoni (2016), S. 159, Bordegoni et al. (2009), S. 177ff.

<sup>44</sup> Vgl. VDI Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 21.

<sup>45</sup> Die Bezeichnungen *hybrider Prototyp* nach Buchholz et al. (2018), *gemischte Prototypen* (engl.: *Mixed-prototypes*) nach Camburn, Camere und Bordegoni sowie gemischt physisch-virtuelle Prototypen nach VDI 2221 werden in der entsprechenden Literatur nicht näher definiert bzw. von den jeweils anderen Begriffen abgegrenzt, so dass diese synonym verwendet werden können, wenn eine Verbindung aus physischen und virtuellen Komponenten im Rahmen eines prototypischen Versuchs vorliegt.

<sup>46</sup> Vgl. Albers et al. (2008).



Abbildung 2-2: Vergleich eines Prototyps mit niedriger Wiedergabetreue (links)<sup>47</sup> und hoher geometrischer Wiedergabetreue (rechts)<sup>48</sup>

### Wiedergabetreue und Umfang des Prototyps

Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung und Klassifizierung von Prototypen besteht anhand deren Wiedergabetreue und deren Umfangs, wobei Überschneidungen dieser beiden Kriterien bestehen. Die Wiedergabetreue (engl.: fidelity) beschreibt die Nähe des Prototyps zum Produkt, wobei ein Prototyp mit hoher Wiedergabetreue (engl.: high-fidelity) einer sehr nahen und voll funktionsfähigen Abbildung des Produkts entspricht, zum Beispiel einem Vorserienfahrzeug im Automobilbereich, und ein Prototyp mit niedriger Wiedergabetreue (engl.: low-fidelity) einer abstrakteren Abbildung, beispielsweise eine Designstudie eines Fahrzeugs, beschreibt.<sup>49</sup> Abbildung 2-2 zeigt den Vergleich zweier Prototypen mit jeweils niedriger und vergleichsweise hoher Wiedergabetreue. Die Wiedergabetreue bezieht sich dabei nicht nur auf die Anzahl der im Prototyp abgebildeten Funktionen, sondern beschreibt auch die Nähe des Prototyps hinsichtlich verwendeter Materialien und der Nutzbarkeit.<sup>50</sup> Im Allgemeinen wird die Verwendung von Prototypen mit höherer Wiedergabetreue in späteren Phasen der Produktentwicklung empfohlen, da dadurch zuvor Kosten reduziert werden können und bereits ein verbessertes Grundverständnis des Problems durch den Einsatz von Prototypen mit niedriger Wiedergabetreue in früheren Phasen erreicht werden kann.<sup>51</sup>

ULRICH UND EPPINGER (1995) klassifizieren Prototypen anhand eines zweidimensionalen Koordinatensystems, dessen eine Achse die Unterscheidung zwischen *virtuellen* und *physischen* Prototypen darstellt, wohingegen die andere Achse den Umfang des Prototyps von *fokussiert* bis *vollständig* beschreibt. Fokussierte Prototypen zeigen dabei lediglich einen geringen Funktionsumfang und beantworten nur einzelne und gezielte Fragen hinsichtlich des Produkts in Entwicklung. Vollständige Prototypen beschreiben wiederum Prototypen, deren Funktionsumfang nah am Funktionsumfang des Produkts in Entwicklung ist und die damit eine erhöhte Anzahl an Fragen hinsichtlich dieses Produkts beantworten können.<sup>52</sup>

<sup>47</sup> Bildquelle: „C-X17 Sports Crossover Concept Revealed“ by jaguarmena is licensed under CC BY 2.0

<sup>48</sup> Bildquelle: "Tesla Model S Claymobile" by jurvetson is licensed under CC BY 2.0

<sup>49</sup> Vgl. Walker et al. (2002), S. 661, Sauer et al. (2008), S. 71.

<sup>50</sup> Vgl. Virzi et al. (1996), S. 237.

<sup>51</sup> Vgl. Camburn et al. (2017b), S. 7.

<sup>52</sup> Vgl. Ulrich und Eppinger (1995).

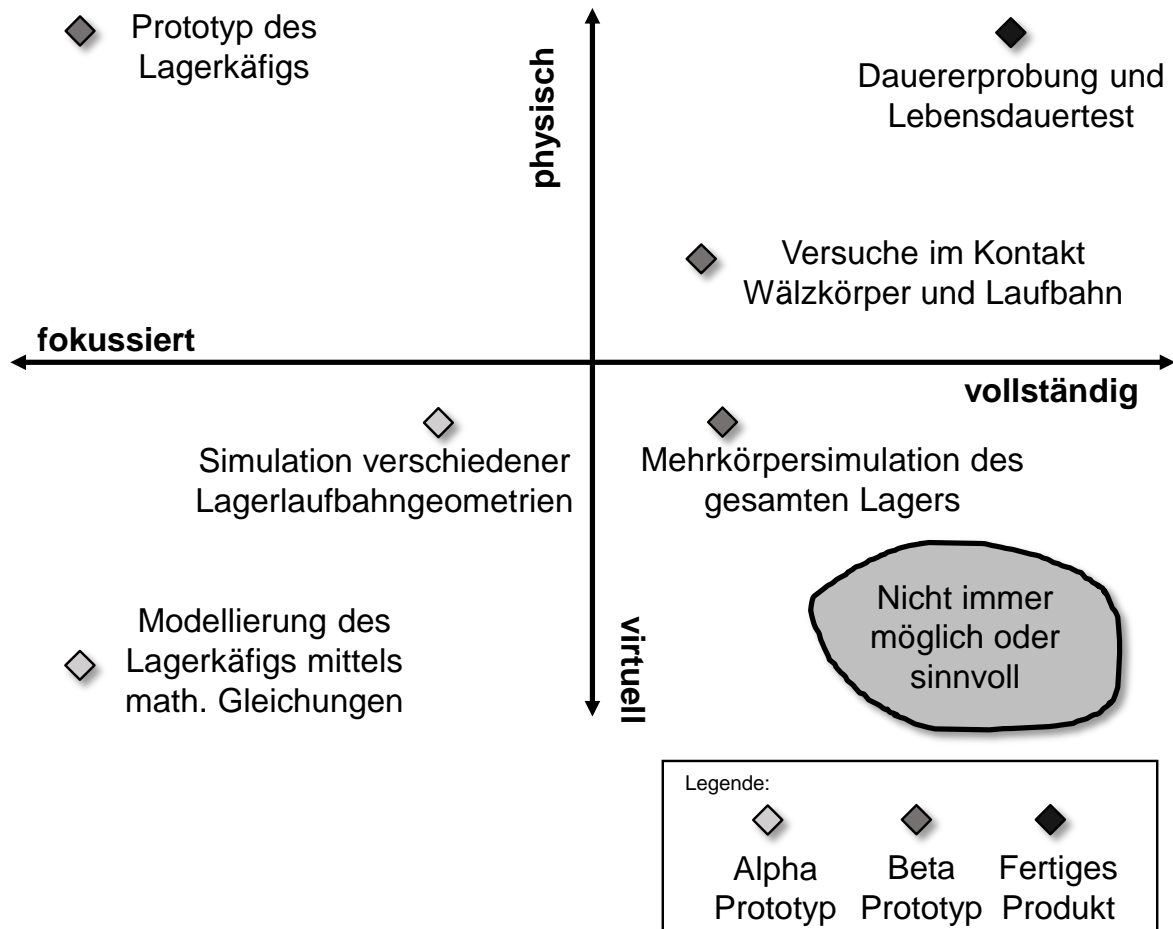


Abbildung 2-3: Klassifizierung von Prototypen am Beispiel eines Wälzlagers<sup>53</sup>

Aufbauend darauf kombiniert KIRCHNER (2020) die Darstellung der Klassifikation im zweidimensionalen Koordinatensystem mit einer im Bereich der Fahrzeugtechnik gängigen Einteilung verschiedener Produktreifegrade.<sup>54</sup> Alphaprototypen beschreiben dabei einen Reifegrad, zu dem die Funktionserfüllung des Produkts in der vorliegenden Gestalt bereits vorliegt, Fertigungs- und Montageprozesse jedoch noch nicht serienreif, beziehungsweise seriennah, sind. Zu diesem Reifegrad überwiegen daher prototypische Untersuchungen im virtuellen Umfeld. Betaprototypen hingegen entsprechen in ihrer Gestalt bereits dem Serienprodukt, lediglich die Fertigungs- und Montageprozesse weichen noch von der späteren Serienproduktion ab. Liegt das Produkt in diesem Reifegrad vor, können physische Prototypen einzelner Bauteile und Baugruppen getestet werden. Für die Dauererprobung, beispielsweise hinsichtlich der Lebensdauer, eignet sich wiederum nur das fertige Produkt, wie in Abbildung 2-3 am Beispiel eines Wälzlagers dargestellt.<sup>55</sup>

Neben der Unterscheidung zwischen vollständigen und fokussierten Prototypen, werden auch die Bezeichnungen des *vertikalen* und *horizontalen* Prototyps, besonders im Bereich

<sup>53</sup> Vgl. Ulrich und Eppinger (1995) sowie Kirchner (2020), S. 382.

<sup>54</sup> Vgl. Kirchner (2020), 369.

<sup>55</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 381f.

der Softwareentwicklung, verwendet. Horizontale Prototypen beschreiben dabei Prototypen, die viele Funktionen des Produkts in Entwicklung abbilden, wobei die Funktionalität dieser Funktionen eingeschränkt ist. Vertikale Prototypen beschreiben hingegen Prototypen, die nur wenige Funktionen abbilden, diese jedoch mit einer sehr hohen Funktionalität.<sup>56</sup> Ein horizontaler Prototyp eines Infotainmentsystems bildet beispielsweise die Menüführung durch verschiedene Untermenüs und Applikationen ab, wohingegen ein vertikaler Prototyp das im Infotainmentsystem enthaltene Navigationssystem mit voller Funktionalität abbildet.

### Unterschiedliche Prototypenarten

Im Rahmen des Einsatzes von Prototypen werden verschiedene Bezeichnungen für Prototypen verwendet, die sich an den zu untersuchenden Eigenschaften des Produkts orientieren. Nach VDI-Richtlinie 3404 werden beispielsweise *Konzeptmodelle* zur Überprüfung des ästhetischen Eindrucks, *Geometrieprototypen* zur Überprüfung der Geometrie, *Funktionsprototypen* zur Überprüfung von (Teil-)Funktionen und *technische Prototypen* die im Rahmen von Vorserienuntersuchungen eingesetzt werden, unterschieden.<sup>57</sup> Diese Prototypenarten stellen dabei lediglich Sammelbegriffe für untergeordnete Prototypenarten dar. So existieren beispielsweise Aerodynamikprototypen, Montageprototypen und Handlingprototypen, die alle zur Gruppe der Geometrieprototypen zählen. Zur Verbesserung der Kommunikation zwischen den an der Produktentwicklung beteiligten Parteien, wird daher empfohlen, bereits frühzeitig eine möglichst genaue Benennung des zu entwickelnden Prototyps hinsichtlich dessen Art durchzuführen.<sup>58</sup>

## 2.3 Strategien, Rahmenwerke und Herangehensweisen zur Entwicklung und Nutzung von Prototypen

Aufbauend auf den generellen Grundlagen zu Prototypen wird in diesem Abschnitt ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung hinsichtlich der Strategien, Rahmenwerke und Herangehensweisen des Prototypings gegeben. Dabei werden einerseits die Erkenntnisse hinsichtlich der Nutzung von Prototypen sowie die Erkenntnisse hinsichtlich der Entwicklung dieser Prototypen zusammengefasst.

Im Bereich der Entwicklung von Prototypen lassen sich nach CAMBURN ET AL. (2017a) zwei Hauptforschungsrichtungen feststellen. Diese sind zum einen die Verbesserung der Effektivität der Prototypen und zum anderen die Reduktion des Aufwands sowie der Kosten des Prototypings.<sup>59</sup> Bezüglich der Untersuchung und Verbesserung der Effektivität des Prototypings, werden *iteratives Prototyping* und *paralleles Prototyping* unterschieden. Iteratives Prototyping beschreibt dabei, dass sequentielle Untersuchungen mit Prototypen durchgeführt werden, die eine inkrementelle Verbesserung des Produkts in Entwicklung zulassen.<sup>60</sup> Besonders bei hoher Unsicherheit in der Entwicklung<sup>61</sup> und dem Ziel der Erreichung herausfordernder Anforderungen zeigt sich der Einsatz iterativer Prototypen als sinnvoll.

<sup>56</sup> Vgl. Paliokas et al. (2013), S. 122.

<sup>57</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 3404, S. 4.

<sup>58</sup> Vgl. Michaelraj (2012), S. 4.

<sup>59</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), 7f.

<sup>60</sup> Vgl. Christie et al. (2012), S. 13 und Ely und Mendelson (1998), S. 2.

<sup>61</sup> Vgl. Moe et al. (2004), S. 75 und Zemke (2012), S. 11.

Da die Anzahl der iterativ entwickelten Prototypen in Verbindung mit der jeweiligen Wiedergabetreue, zum Beispiel hinsichtlich der eingesetzten Materialien und Herstellungsverfahren, einen hohen Einfluss auf die Gesamtkosten der Entwicklung hat, empfehlen CAMBURN ET AL. (2017a) das iterative Prototyping besonders dann, wenn damit deutliche Verbesserungen des Produkts in Entwicklung erwartet werden und die einzelnen Iterationen mit niedrigen Kosten verbunden sind.<sup>62</sup> Im Gegensatz zum iterativen Prototyping werden beim parallelen Prototyping im Rahmen jeder Untersuchung mehrere Prototypen gleichzeitig entwickelt und hergestellt, was beispielsweise die Auswahl zwischen verschiedenen Konzepten erleichtert.<sup>63</sup> Besonders wenn explorative Ziele im Vordergrund stehen, wird das parallele Prototyping daher empfohlen.<sup>64</sup>

Zur Reduktion der mit dem Prototyping verbundenen Kosten und des Aufwands, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Vor allem das Lockern von Anforderungen steht dabei im Vordergrund, da dadurch sowohl die Kosten des Prototypings als auch die zur Herstellung der entwickelten Prototypen geringer ist.<sup>65</sup> *Lockern* bezieht sich dabei darauf, dass gewisse Anforderungen an das Produkt in Entwicklung, zum Beispiel hinsichtlich der geometrischen Toleranzen oder der Oberflächengüte, im Rahmen der Untersuchung nicht vollständig eingehalten werden müssen. Der Einsatz von Prototypen, die nur ein Minimum der Anforderungen einhalten, kann dabei besonders zu Beginn eines Projekts das Entwicklungsrisiko senken, wenn dadurch schnell grobe Einblicke gewonnen werden.<sup>66</sup> Besonders bei stark gelockerten Anforderungen und damit einhergehend niedriger Wiedergabetreue des Prototyps stellen sich zusätzlich psychologisch positive Effekte bei den Entwickelnden ein, beispielsweise das Gefühl des erfolgreichen Projektfortschritts ohne dabei die Vorfixierung auf ein bestimmtes Konzept hervorzurufen.<sup>67</sup>

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Kosten und des Aufwands besteht in der Identifikation von Subsystemen des Produkts in Entwicklung, die isoliert untersucht werden können. Prototypen der isolierten Subsysteme können daraufhin speziell für die offenen Fragen bezüglich dieses Subsystems entwickelt werden.<sup>68</sup> Im Vergleich zum Prototyp des Gesamtsystems, können Prototypen isolierter Subsysteme deutlich detaillierter und mit hoher Wiedergabetreue ausgeführt werden, ohne dass dadurch hohe Kosten entstehen.<sup>69</sup> Derartige Prototypen entsprechen den in Abschnitt 2.2 vorgestellten fokussierten Prototypen. Die Anforderungen an die für das jeweilige Subsystem entwickelten Prototypen können dabei gänzlich unabhängig voneinander festgelegt werden, wobei je nach Eignung physische, virtuelle und hybride Prototypen eingesetzt werden können.<sup>70</sup> Die isolierte Untersuchung von Subsystemen kann jedoch dazu führen, dass nicht antizipierte Anforderungen und Wünsche des Nutzers unter Umständen nicht erkannt werden.<sup>71</sup> Generell wird die Effizienz des Prototypings positiv beeinflusst, wenn zur Beantwortung einer offenen

---

<sup>62</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), S. 9.

<sup>63</sup> Vgl. Christie et al. (2012), S. 13.

<sup>64</sup> Vgl. Moe et al. (2004), S. 75.

<sup>65</sup> Vgl. Dunlap et al. (2014), S. 4.

<sup>66</sup> Vgl. Drezner und Huang (2009), S. 23.

<sup>67</sup> Vgl. Gerber und Carroll (2012), S. 67.

<sup>68</sup> Vgl. Christie et al. (2012), S. 13.

<sup>69</sup> Vgl. Horváth und Du Bois (2012), S. 9.

<sup>70</sup> Vgl. Yan et al. (2002), S. 1735.

<sup>71</sup> Vgl. Rogers et al. (2013).

Frage hinsichtlich des Produkts in Entwicklung eine geringe Anzahl an aussagekräftigen Prototypen einer hohen Anzahl an weniger aussagekräftigen Prototypen vorgezogen wird.<sup>72</sup>

Ebenfalls zur Reduktion der Kosten und des Aufwands des Prototypings trägt die Verwendung von skalierten Prototypen bei.<sup>73</sup> Skalierung beschreibt dabei die Änderung der Geometrie oder der Komplexität des Systems unter Beibehaltung charakteristischer Größen, so dass anhand der skalierten Systeme auf das Ausgangssystem geschlossen werden kann.<sup>74</sup> Diese Möglichkeit sollte in Betracht gezogen werden, wenn die Herstellung des Prototyps nicht machbar ist oder wenn dadurch Ressourcen geschont werden können.<sup>75</sup>



**Abbildung 2-4: Geometrisch skaliertes Prototyp eines Flugzeugs in einem Windtunnel in entsprechender Größe<sup>76</sup>**

Ein bekannter Anwendungsbereich geometrisch skalierten Prototypen ist die Entwicklung von Flugzeugen, deren Prototypen wie in Abbildung 2-4 dargestellt in verkleinerter Form im Windtunnel untersucht werden können. Dabei ist zu beachten, dass auch der Aufwand zur Erstellung der Prüfinfrastruktur, in diesem Fall des Windtunnels, deutlich reduziert werden kann.

Bereits in Abschnitt 2.2 wurde der Unterschied zwischen physischen und virtuellen Prototypen erläutert. Virtuelle Prototypen bieten dabei ein großes Potential zur Einsparung von Kosten, da keine physische Herstellung erfolgt.<sup>77</sup> Dabei kann in vielen Fällen eine gleichwertige Aussagekraft festgestellt werden<sup>78</sup> und Vorlaufzeiten eingespart werden.<sup>79</sup>

Bezüglich der Entwicklung von Prototypen finden sich signifikant weniger beschriebene Herangehensweisen und Methoden, verglichen mit der Anzahl der zuvor beschriebenen

<sup>72</sup> Vgl. Elsen et al. (2012), S. 9.

<sup>73</sup> Vgl. Camburn et al. (2013a), S. 6.

<sup>74</sup> Vgl. Bridgman (1963).

<sup>75</sup> Vgl. Christie et al. (2012), S. 14.

<sup>76</sup> Bildquelle: NASA Ames Research Center of the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA) unter Photo ID: AC95-0203-37., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1526611>

<sup>77</sup> Vgl. Christie et al. (2012), S. 13 und Camburn et al. (2015a), S. 10.

<sup>78</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), S. 17.

<sup>79</sup> Vgl. Sefelin et al. (2003), S. 779.

Einflussfaktoren.<sup>80</sup> Im Allgemeinen wird dabei empfohlen, Prototypen mit möglichst geringer Teileanzahl zu entwickeln, da die damit erreichten Ergebnisse eine vergleichbare Qualität zu den mittels Prototypen mit hoher Teileanzahl erreichten Ergebnissen aufweisen.<sup>81</sup> Basierend auf einer empirischen Studie im Bereich der Do-it-Yourself-Community, die sich durch möglichst kostengünstiges Prototyping auszeichnet, identifizieren CAMBURN ET AL. (2015b) generelle Richtlinien, die zu einer effektiven und effizienten Entwicklung beitragen können. Diese sind die *Wiederverwendung bestehender Produkte*, *Nutzung einfachster Fertigungsverfahren*, *Anfertigung genauer Fertigungszeichnungen*, *Nutzung des gleichen Fertigungsverfahrens für mehrere Bauteile*, *Nutzung von Leichtbaukonzepten*.<sup>82</sup> Hinsichtlich einfacher Fertigungsverfahren sind an dieser Stelle die Möglichkeiten der *additiven Fertigung*<sup>83</sup> zu nennen, da besonders die auf dem *Fused Filament Fabrication* Verfahren basierenden „3D-Drucker“ Kunststoffbauteile mit ausreichender Genauigkeit bereits bei sehr niedrigen Kosten herstellen können.<sup>84</sup> Abbildung 2-5 zeigt einen Prototyp eines Kugelabsperrventils, der mittels *selektivem Laserschmelzen*, einem Fertigungsverfahren zur additiven Herstellung von Metallbauteilen, hergestellt wurde und zur Untersuchung der Perforierung zur graduellen Öffnung des Ventils entwickelt wurde. Zu beachten ist dabei, dass auch bei additiv gefertigten Bauteilen Nacharbeiten durchgeführt werden müssen. Diese betreffen in diesem Fall einerseits die Entfernung der für die Herstellung notwendigen Stützstrukturen und andererseits die Bearbeitung funktionaler Oberflächen, beispielsweise der Dichtfläche und der Aufnahme der Lagerung, da die Anforderungen an die Qualität dieser Oberflächen nicht mit dem additiven Herstellungsverfahren erreicht werden können.

---

<sup>80</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), S. 22.

<sup>81</sup> Vgl. Yang (2005), S. 649.

<sup>82</sup> Vgl. Camburn et al. (2015b), S. 5.

<sup>83</sup> Additive Fertigungsverfahren sowie weitere Fertigungsverfahren zur schnellen Herstellung von Prototypen (Rapid Prototyping) werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher beschrieben, da diese keine essentielle Grundlage der nachfolgend vorgestellten Methoden und Modelle darstellen.

<sup>84</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), S. 22.

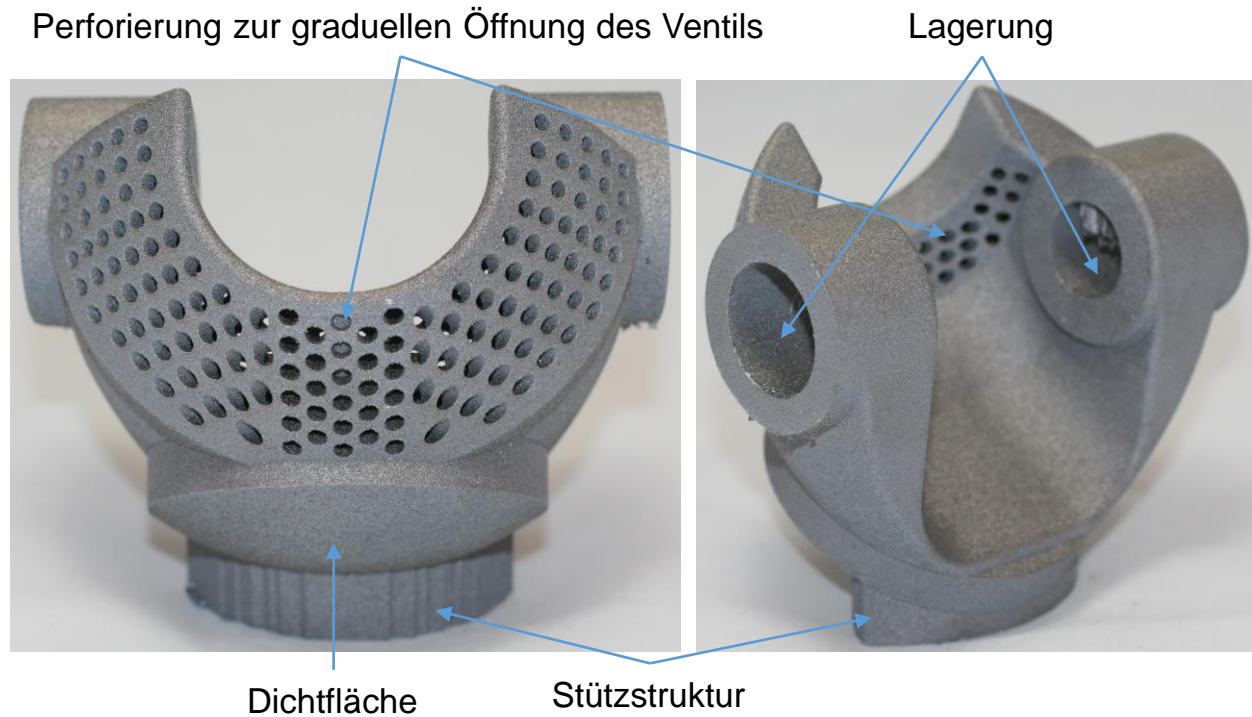


Abbildung 2-5: Prototyp eines Kugelabsperrentils<sup>85</sup>

Bezüglich der von CAMBURN ET AL. (2015b) vorgestellten Richtlinien ist jedoch festzustellen, dass diese sich einerseits an die Entwicklung von Prototypen mit stark explorativem Charakter wenden und andererseits, dass nicht beschrieben wird, *wie* Entwickelnde diese Richtlinien im Rahmen der Prototypenentwicklung möglichst sinnvoll umsetzen können, so dass die entwickelten Prototypen weiterhin eine hohe Aussagekraft und damit Effektivität aufzeigen.

In der Literatur beschriebene Strategien zum Prototyping beantworten ebenfalls hauptsächlich die Frage, wie Prototypen am geschicktesten eingesetzt werden können. DUNLAP ET AL. (2014) beschreiben dazu beispielsweise sechs *Strategievariablen*<sup>86</sup>, über deren Ausprägung anhand der Bewertung mittels Likert-Skala entschieden werden kann.<sup>87</sup> Offen bleibt dabei jedoch, wie die ermittelte Strategie in die Entwicklung des einzusetzenden Prototyps überführt werden kann. Ergibt die Bewertung mittels Likert-Skala beispielsweise, dass die Lockerung von Anforderungen für die Entwicklung des Prototyps vorteilhaft ist, gibt dies keinen Aufschluss darüber, welche Anforderungen in welchem Maß gelockert werden dürfen, ohne dabei die Aussagekraft des Prototyps negativ zu beeinflussen.

<sup>85</sup> Eigene Darstellung

<sup>86</sup> Diese sind: Anzahl der parallel eingesetzten Prototypen, Anzahl der Iterationen, Skalierung, Isolierung von Subsystemen, Lockerung von Anforderungen, Physische oder virtuelle Prototypen.

<sup>87</sup> Vgl. Dunlap et al. (2014), S. 4.

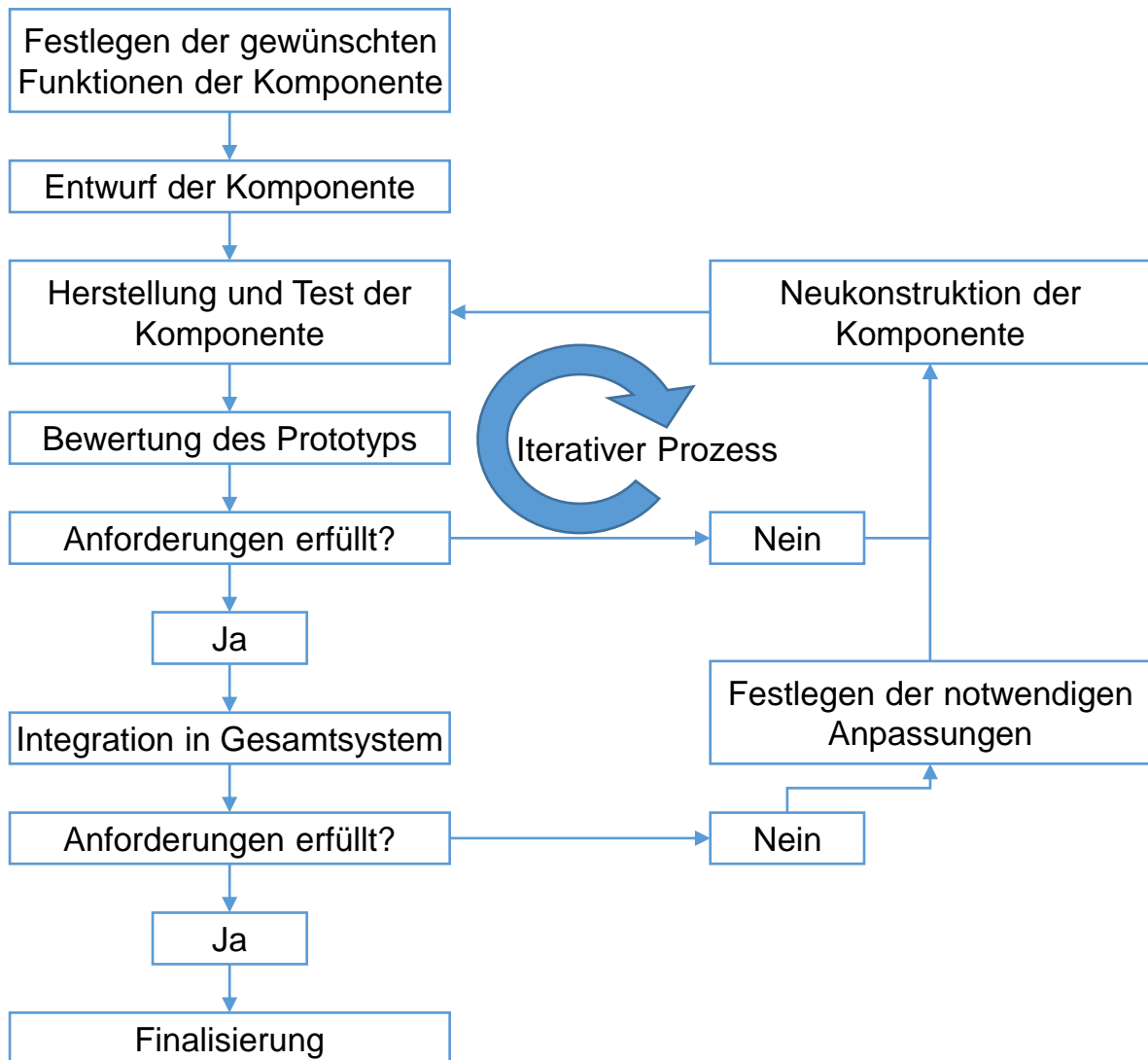


Abbildung 2-6: Strategie zur Entwicklung mit Prototypen<sup>88</sup>

Auch ELVERUM ET AL. (2016) stellen eine Herangehensweise zur Unterstützung der Erarbeitung einer kontextbezogenen Prototypingstrategie basierend auf empirisch abgeleiteten Richtlinien, beispielsweise der Definition des Ziels und der Bestrebung, Prototypen möglichst einfach zu gestalten, vor.<sup>89</sup> Die Umsetzung der im Rahmen der Strategie gesetzten Ziele wird jedoch nicht näher thematisiert. HILTON ET AL. (2015) identifizieren auf Basis der Analyse eines erfahrenen Designteams die in Abbildung 2-6 dargestellte Strategie zur Entwicklung mit Prototypen. Auch in diesem Fall wird weder die Entwicklung des Prototyps an sich noch das Vorgehen zur Festlegung der an den Prototyp gestellten Anforderungen näher beschrieben.

MENOLD (2017) stellt zur Entwicklung von Prototypen das *Prototype for X* Rahmenwerk vor. Dieses umfasst die Planung, den Aufbau und den Test von Prototypen, speziell hinsichtlich des zu erreichenden Ziels. Das Ziel wird dabei in der Planungsphase festgelegt,

<sup>88</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Hilton et al. (2015).

<sup>89</sup> Vgl. Elverum et al. (2016), S. 120.

wobei die Hauptziele in diesem Rahmenwerk das Überprüfen der Begehrtheit (engl.: Desirability), der Machbarkeit (engl.: Feasibility) und der Validität (engl.: Viability) sind. Darauf aufbauend zeigen MENOLD ET AL. (2019), dass die Reihenfolge, in der die unterschiedlichen Ziele verfolgt werden, einen deutlichen Einfluss auf nachfolgende prototypische Untersuchungen hat. Dabei kann jedoch keine eindeutig zu bevorzugende Reihenfolge festgestellt werden.<sup>90</sup> Auch dieses Rahmenwerk zeigt damit einerseits, dass die Beschreibung und Festlegung der Ziele ein wichtiger Schritt in der Entwicklung von Prototypen ist, andererseits bleibt jedoch auch hier die Erklärung aus, wie diese Ziele möglichst methodisch erreicht werden können.

## 2.4 Relevante Produktentwicklungsmodelle und -methoden

Im Rahmen dieser Arbeit werden parallelen zwischen Prototypen und Produkten gezogen. Dabei steht insbesondere die Frage im Vordergrund, ob und wie Produktentwicklungsmodelle und -methoden auch zur Entwicklung von Prototypen eingesetzt werden können. Die detaillierte Beschreibung der Ziele dieser Arbeit findet sich in Kapitel 3.

### 2.4.1 Grundlagen zu Modellen, Methoden, Produkten und Prozessen

Zunächst werden in diesem Unterabschnitt die Grundlagen und Definitionen zu den in dieser Arbeit betrachteten Begriffen der methodischen Produktentwicklung dargelegt. Diese werden ebenfalls auf die methodische Entwicklung von Prototypen übertragen und sind somit für das Verständnis der in dieser Arbeit vorgestellten Prototypenentwicklungsmodelle und -methoden essentiell.

#### Technische Systeme und technische Prozesse

Ein geordnetes Ganzes, das aus einer endlichen Menge von Elementen besteht, wird als System bezeichnet.<sup>91</sup> Das System kann dabei in Form eines offenen Systems mit seiner Umgebung in Kontakt stehen. Zur Abgrenzung ist es durch die Systemgrenze begrenzt.<sup>92</sup> Nach ROPOHL (2009) werden *strukturelle*, *funktionale* und *hierarchische Systemkonzepte* unterschieden.<sup>93</sup> Funktionale Konzepte beschreiben dabei ein System anhand der Ein- und Ausgangsgrößen sowie den Zuständen der Elemente innerhalb des Systems. Strukturelle Konzepte hingegen beschreiben das System mittels der darin enthaltenen Elemente und deren Relation zueinander und hierarchische Konzepte fassen Elemente als Subsysteme innerhalb eines Systems auf, wobei dieses wiederum Teil eines übergeordneten Supersystems ist. Die drei Systemkonzepte schließen sich dabei nicht gegenseitig aus, vielmehr werden je nach Betrachtungszweck gewisse Aspekte der einzelnen Konzepte bei der Beschreibung des Systems in den Vordergrund gerückt. Systeme können dabei entweder natürlich vorkommen oder durch Menschen geschaffen werden. Letztere, die zu einem bestimmten Zweck erschaffen wurden, werden *technische Systeme* genannt und sind für diese Arbeit relevant.<sup>94</sup> Abbildung 2-7 zeigt am Beispiel eines Automobils die Beschreibung eines technischen Systems mittels des hierarchischen Systemkonzepts. Das *Fahrzeug* ist dabei

<sup>90</sup> Vgl. Menold et al. (2019), S. 197.

<sup>91</sup> Vgl. Hubka (1984), S. 11.

<sup>92</sup> Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2017a), S. 22.

<sup>93</sup> Vgl. Ropohl (2009), S. 75.

<sup>94</sup> Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2017a), S. 28.

Teil des Supersystems *Verkehr* und ist den Subsystemen *Triebstrang*, *Getriebe*, *Planetensatz*, *Wälzlager* und *Wälzkörper* übergeordnet.<sup>95</sup>

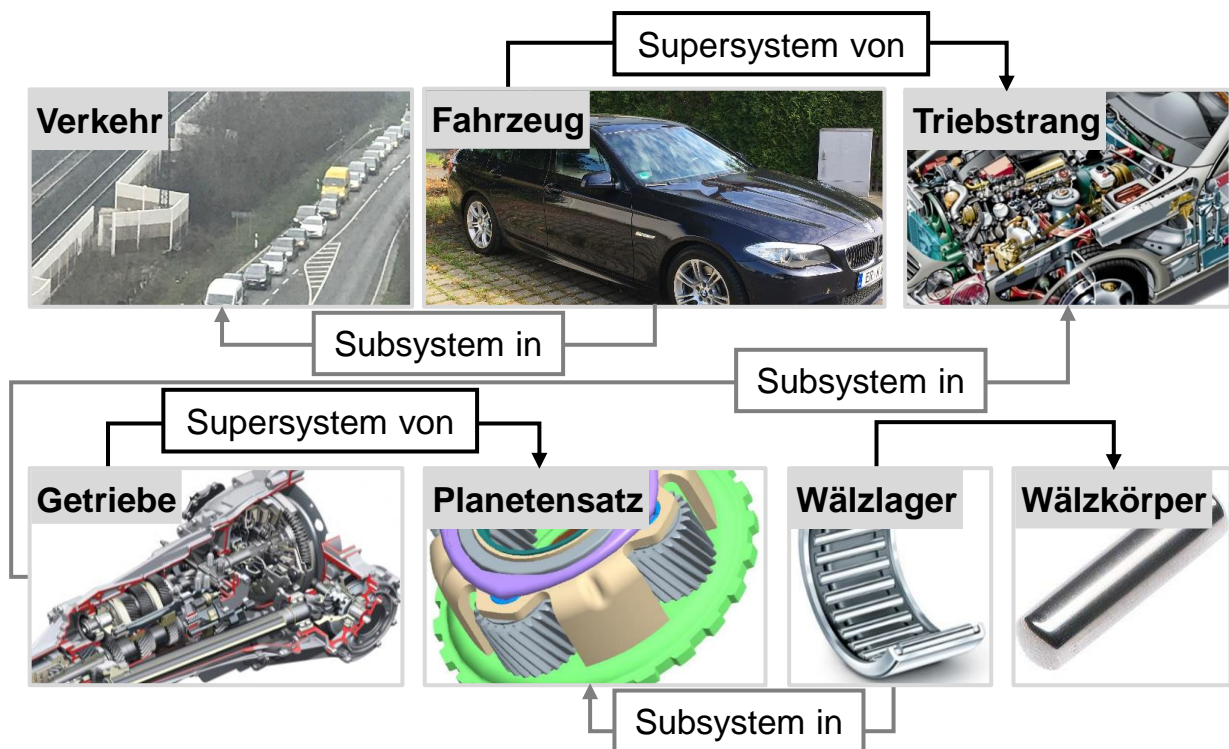


Abbildung 2-7: Beispiel des hierarchischen Systemkonzepts anhand eines Automobils im Supersystem *Verkehr*<sup>96</sup>

Innerhalb technischer Systeme finden *Prozesse* statt, die eine Zustandsänderung eines Objekts (beziehungsweise Operanden) in einem bestimmten Zeitintervall beschreiben.<sup>97</sup> Im Rahmen dieser Arbeit ist bezogen auf Prozesse insbesondere das Prozessmodell nach HEIDEMANN (2001) relevant, weshalb dieses in Unterabschnitt 2.4.3 explizit erläutert wird.

### Modelle und Methoden

Unter einem Modell wird im Bereich der Produktentwicklung ein gedankliches oder stoffliches Gebilde verstanden, dass gegenüber dem Original zweckorientiert vereinfacht wurde und anhand der bestehenden Analogien Rückschlüsse auf das Original zulässt.<sup>98</sup> Dieses Modellverständnis wird im Rahmen dieser Arbeit auch auf die Prototypenentwicklung übertragen, da auch hier das Verständnis des Systems gefördert und ein Beitrag zur Beherrschung dessen Komplexität geliefert wird.<sup>99</sup> Prototypen stellen dabei selbst stoffliche Gebilde und damit Modelle des Originals, in diesem Fall des Produkts in Entwicklung,

<sup>95</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 102.

<sup>96</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 102.

<sup>97</sup> Vgl. Hubka (1984), S. 17.

<sup>98</sup> Vgl. Lindemann (2009), S. 331.

<sup>99</sup> Vgl. Lindemann (2009), S. 11.

dar. Dabei ist zu bedenken, dass die Unterschiede zwischen Modell und Original stets beachtet werden müssen, da die Aussagekraft des Modells ansonsten überschätzt wird.<sup>100</sup> Das Ziel der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse ist es daher, Prototypen zu entwickeln, deren Unterschiede hinsichtlich des Originals bezogen auf den untersuchten Bereich gering sind, sodass vertrauenswürdige Untersuchungsergebnisse erzielt werden können. Das grundlegende Modellverständnis beruht dabei auf der von STACHOWIAK (1973) vorgestellten allgemeinen Modelltheorie. Danach besitzen Modelle die drei Hauptmerkmale *Abbildungsmerkmal*, *Verkürzungsmerkmal* und *pragmatisches Merkmal*.<sup>101</sup> Das Abbildungsmerkmal entspricht dabei der bereits getroffenen Annahme, dass Modelle jeweils Abbildungen eines Originals sind. Das Verkürzungsmerkmal beschreibt darüber hinaus, dass im Rahmen der Abbildung des Originals gewisse Attribute, beziehungsweise Elemente, des Originals nicht, nur in vereinfachter oder in abgeänderter Form übernommen werden.<sup>102</sup> Das pragmatische Merkmal wiederum beschreibt, dass Modelle für einen bestimmten Zweck und Nutzen erschaffen werden und daher auf einen gewissen Betrachtungsbereich festgelegt sind.<sup>103</sup>

Neben Modellen sind *Methoden* wichtige Hilfsmittel im Produktentwicklungsprozess und damit auch im Prototypenentwicklungsprozess. Methoden stellen dabei ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen dar, um durch die Ausführung bestimmter Tätigkeiten ein gewisses Ziel zu erreichen.<sup>104</sup> Methoden beschreiben dabei vor allem, *wie* etwas zu tun ist, beispielsweise auf welche Art und Weise verschiedene Schritte eines Vorgehensmodells durchzuführen sind.<sup>105</sup> Dadurch stellen Methoden Hilfsmittel dar, die Komplexität der Sachverhalte des Produktentwicklungsprozesses besser handhaben zu können.<sup>106</sup> Im Rahmen dieser Arbeit werden aufbauen darauf Vorgehensmodelle und zugehörige Methoden vorgestellt, die Produktentwickelnde bei der Entwicklung und Nutzung von Prototypen unterstützen.

#### 2.4.2 Das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung

Das Modell der ganzheitlichen Produktentwicklung, das in Abbildung 2-8 dargestellt ist, beschreibt den Zusammenhang zwischen der *Prozesskette der Produktentwicklung* und der *Prozesskette des Produktlebenslaufs*. Die Prozesskette des Produktentwicklungsprozesses beginnt mit dem *Klären der gegebenen Aufgabe*. In Rahmen dieses Prozesses wird geklärt, welchen Zweck der Aufgabensteller mit dem zu entwickelnden Produkt verfolgt und welche Nutzungsprozesse mit diesem Produkt durchgeführt werden müssen. Die Ergebnisse des Prozesses des Klärens der Aufgabenstellungen werden im Rahmen der Anforderungsliste an das zu entwickelnde Produkt gesammelt und dokumentiert. Um diese Anforderungen zu erfüllen werden im Rahmen des *Konzipierens* erste Ideen gesammelt, die die Grundlage zum *Entwerfen* von Lösungen bilden. Diese werden in der *Ausarbeitung* detailliert und stellen dann das zu fertigende Produkt dar.

---

<sup>100</sup> Vgl. Lindemann (2009), S. 11.

<sup>101</sup> Vgl. Stachowiak (1973).

<sup>102</sup> Vgl. Stachowiak (1973).

<sup>103</sup> Vgl. Stachowiak (1973), 132f.

<sup>104</sup> Vgl. Lindemann (2009), S. 56.

<sup>105</sup> Vgl. Lindemann (2009), S. 57.

<sup>106</sup> Vgl. Lindemann (2009), S. 57, Ehrlenspiel und Meerkamm (2017a), S. 51.

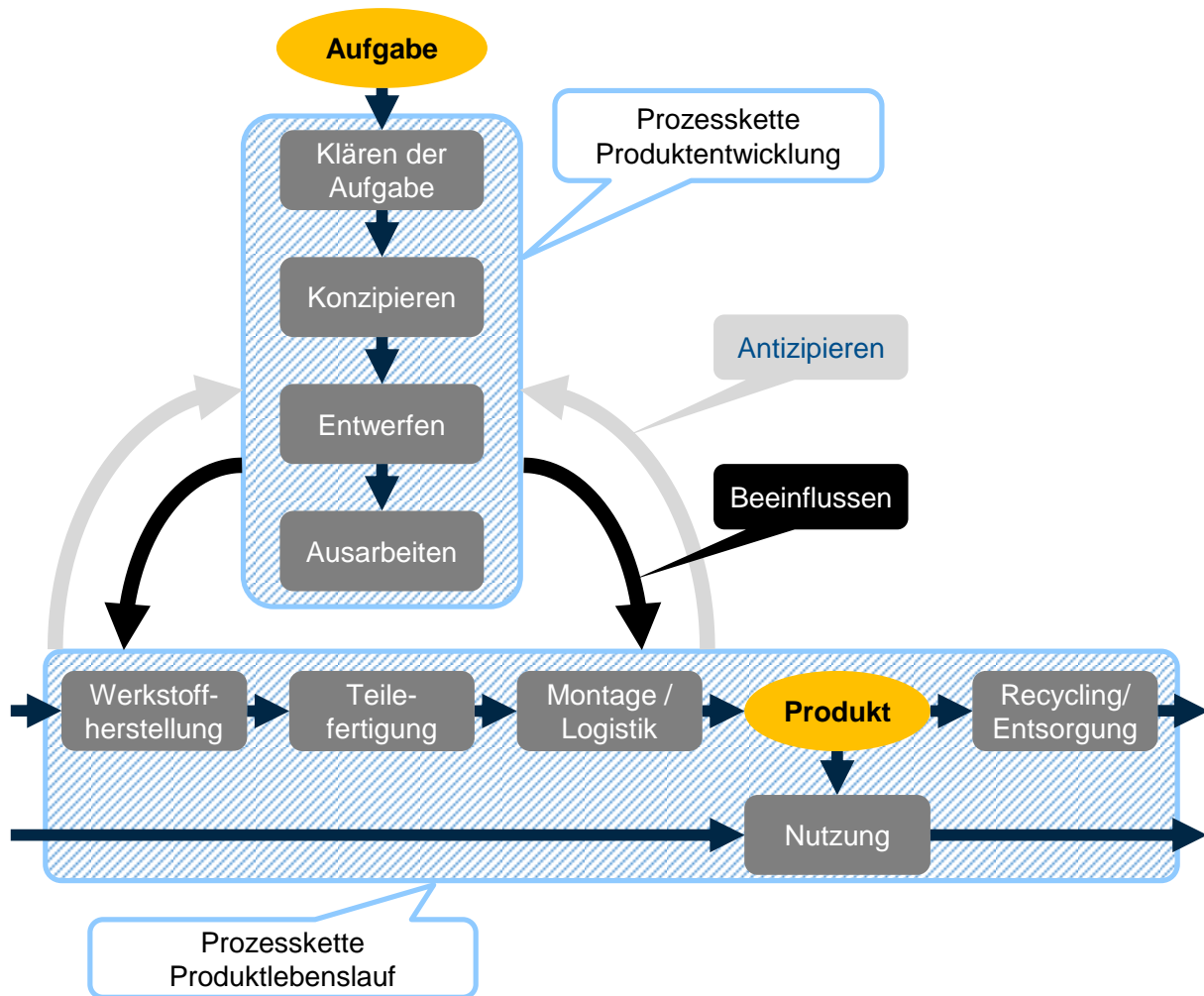


Abbildung 2-8: Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung<sup>107</sup>

Neben der Prozesskette der Produktentwicklung stellt das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung die Prozesskette des Produktlebenslaufs dar. Diese beginnt mit dem Prozess der *Werkstoffherstellung*, der die Bereitstellung der Werkstoffe und Materialien für den anschließenden Prozess der *Teilefertigung* beschreibt. Daran knüpft der *Montage und Logistik* Prozess an, in dem die zuvor gefertigten Einzelteile zu Baugruppe und schließlich zum *Produkt* zusammengefügt werden. Das Produkt durchläuft daraufhin den Prozess der *Nutzung*. Den finalen Prozess des Produktlebenslaufs bildet das *Recycling beziehungsweise die Entsorgung* des Produkts.

Das Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung visualisiert zudem, dass Produktentwickelnde einerseits die Möglichkeit haben, mit den im Rahmen der Produktentwicklung getroffenen Entscheidungen den Produktlebenslauf zu *beeinflussen* und andererseits, dass sie *antizipieren* müssen, welche Folgen sich aus den getroffenen Entscheidungen auf den Produktlebenszyklus ergeben. So müssen Entwickelnde antizipieren, wie Nutzende mit dem Produkt interagieren und welchen ergonomischen und funktionalen Anforderungen sich daraus ergeben. Darüber hinaus muss antizipiert werden, welchen Einfluss die Wahl bestimmter Materialien auf den Materialherstellungsprozess und den

<sup>107</sup> Eigene Darstellung basierend auf Grüner (2001) mit der durch Kirchner (2020) vorgestellten Aufteilung des Produktionsprozesses.

anschließenden Herstellungs- sowie Montageprozess hat. Bei der Bewertung verschiedener prinzipieller Lösungen müssen dementsprechend alle Teilprozesse des Produktlebenslaufs miteinbezogen werden. Ein weiteres Beispiel hinsichtlich der Beeinflussung des Produktlebenslaufs durch Produktentwickelnde ist die Festlegung eines bestimmten Fertigungsverfahrens, um die damit verbundenen fertigungsinduzierten Eigenschaften auszunutzen.<sup>108</sup>

### 2.4.3 Das Prozessmodell nach Heidemann

HEIDEMANN (2001) beschreibt, dass ein zu entwickelndes Produkt lediglich das Mittel zur Erfüllung eines Zwecks des Nutzers darstellt. Dies umfasst die Ansicht, dass ein Nutzer ein Produkt nicht des Produktes wegen anschafft, sondern aufgrund des damit erfüllbaren Zwecks. Dieser Zweck lässt sich durch den Prozess beschreiben, der mit dem Produkt durchgeführt wird. Der Prozess wird dabei von HUBKA (1984) beschrieben als die Transformation oder der Wandel eines vorliegenden Anfangszustands eines Systems oder Objekts hin zu einem Endzustand über einen gewissen Zeitraum. Diese Prozesse können entweder natürlich, zum Beispiel Alterung und Korrosion, ablaufen oder durch technische Eingriffe hervorgerufen werden. Die technische Durchführung von Prozessen steht dabei für diese Arbeit im Vordergrund, da sich diese Prozesse durch das zu entwickelnde Produkt gezielt hervorrufen lassen. Diese Eingrenzung des Prozesses findet sich auch in der Beschreibung durch HEIDEMANN (2001), weshalb dessen Definition wie folgt übernommen wird:

#### **Prozess**

*Ein technischer Prozess beschreibt die nutzbare Zustandsänderung eines Objekts oder Systems in einem Zeitintervall. Der Prozess kann durch die Beschreibung der Zwischenzustände des betrachteten Objekts oder Systems beschrieben werden.*

Def. 2

Mit dieser Definition können die durch Produkte ermöglichten Prozesse analysiert werden und damit auf den Zweck der jeweiligen Produkte geschlossen werden. Dabei können verschiedene Produkte zur Durchführung des gleichen Prozesses eingesetzt werden. Ein beispielhafter Prozess ist an dieser Stelle die Anpassung der Ausgangsdrehzahl und des Ausgangsmoments eines Verbrennungsmotors, der eine vergleichsweise hohe Drehzahl zur korrekten Funktionstüchtigkeit benötigt, um das Anfahren und Anhalten zu ermöglichen. Da derartige Motoren auch eine obere Drehzahlgrenze aufweisen, die das Fahren im geforderten Geschwindigkeitsbereich nicht direkt ermöglicht, muss auch hierzu eine Anpassung stattfinden. Zur Anpassung werden daher Getriebe und Anfahrerelemente als Mittel eingesetzt, deren Zweck es ist, Drehzahlen und Drehmomente je nach Fahrsituation anzupassen.

Die Zweck-Mittel-Differenzierung ist im Produktentwicklungsprozess einsetzbar um eine Aufgabenstellung zu abstrahieren und das Produkt zu entwickeln, das den vom Nutzer gewünschten Zweck erfüllt. Für das Beispiel hinsichtlich der Anpassung des Drehmoments und der Drehzahl eines Verbrennungsmotors sowie der Ermöglichung des Anfahrens und Anhaltens können beispielsweise automatische Getriebe, die auf der Zusammenschaltung von Planetensätzen in Kombination mit einem hydrodynamischen Drehmomentwandler beruhen verwendet werden. Daneben können Doppelkupplungsgetriebe auf Basis von

<sup>108</sup> Vgl. Gramlich (2013), S. 90.

Stirnrädern und Reibkupplung oder auch stufenlose Getriebe, deren Anpassung der Eingangsgrößen infolge der Variation der Wirkdurchmesser eines Umschlingungs- oder Konusgetriebes geschieht, eingesetzt werden. Als manuelle Alternative steht auch das Handschaltgetriebe in Verbindung mit einer Reibkupplung zur Verfügung. Abbildung 2-9 zeigt verschiedene Getriebearten, die verschiedene Mittel für den gleichen Zweck darstellen.

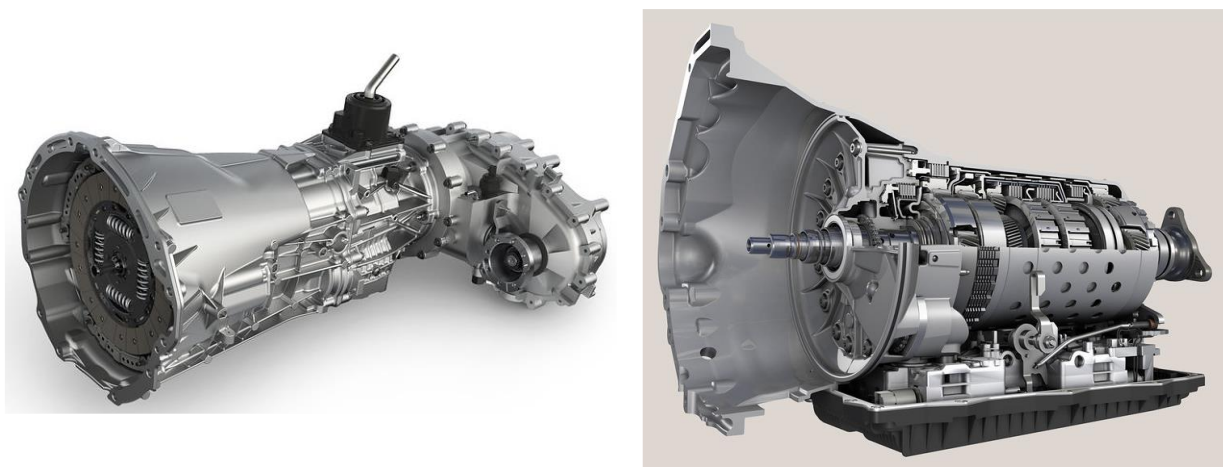


Abbildung 2-9: Manuelles Handschaltgetriebe (links)<sup>109</sup> und Automatikgetriebe (rechts) zur Anpassung der Drehzahl und des Drehmoments eines Verbrennungsmotors im Fahrzeug<sup>110</sup>

#### 2.4.4 Die Produktmodellpyramide

Produktmodelle stellen vereinfachte, abstrahierte und zweckmäßige Darstellungen eines Produkts auf einer abstrakten Ebene dar.<sup>111</sup> Diese Modelle repräsentieren Daten und Informationen, die für das Produkt relevant sind und während des Produktentwicklungsprozesses benötigt werden.<sup>112</sup> Im Rahmen der Konstruktionsmethodik liegt der Zweck dieser Produktmodelle darin, die von Produktentwicklern durchgeführte methodische Lösungsfindung zu unterstützen.<sup>113</sup> Beschreiben Produktmodelle nur eine geschlossene Menge an Produktmerkmalen anstelle des gesamten Produkts, ergeben sich Partialproduktmodelle. Diese Partialproduktmodelle lassen sich im Anschluss einzelnen Ebenen einer Produktmodellpyramide zuordnen.<sup>114</sup> Die Pyramidenform ergibt sich dabei aus der Anzahl an Eigenschaften und Lösungsmöglichkeiten je Ebene. Die Ebenen wiederum zeigen den Konkretisierungsgrad des in der Entwicklung befindlichen Produkts auf, der zusammen mit der Komplexität des Produkts zu den unteren Ebenen hin ansteigt.<sup>115</sup>

Die Produktmodellpyramide nach EHRENSPIEL UND MEERKAMM (2017b) besteht aus den Ebenen der *funktionellen Lösungsmöglichkeiten*, der *prinzipiellen physikalischen Lösungsmöglichkeiten* und der *gestalterischen Lösungsmöglichkeiten*. SAUER (2006) wiederum teilt

<sup>109</sup> Bildquelle: "2012 Jeep Wrangler 6-speed Manual Transmission" by FCA: Corporate is licensed under CC BY-NC-ND 2.0

<sup>110</sup> Bildquelle: "Eight-speed automatic transmission" by AlBargan is licensed under CC BY-ND 2.0

<sup>111</sup> Vgl. Wäldele (2012), S. 28.

<sup>112</sup> Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2017b), S. 709.

<sup>113</sup> Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2017b), Gramlich (2013).

<sup>114</sup> Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm ((2017b, 39f), Sauer (2006), S. 67ff.

<sup>115</sup> Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2017b), S. 40.

die Produktmodellpyramide in die Ebenen *Verfahren, Funktion, Effekte, Wirkprinzip* und *Gestalt* ein. Darüber stellt SAUER (2006) die technischen Prozesse, die mittels des zu entwickelnden Produktes durchgeführt werden sollen, wodurch der Zusammenhang zwischen dem Einsatzzweck und dem Produkt als Mittel betont wird.<sup>116</sup> KIRCHNER (2020) verwendet zur Beschreibung von Variationsarten im Rahmen der Entwicklung neuer Produkte aufbauend auf Vorgängerprodukten ebenfalls eine Produktmodellpyramide, die in Abbildung 2-10 zu sehen ist.<sup>117</sup> Dies ist auf den von ALBERS ET AL. (2015) vorgestellten Ansatz zurückzuführen, nachdem neue Produkte zumeist auf Vorgängerprodukten, beziehungsweise Vorgängergenerationen, basieren. Die Entwicklung eines neuen Produkts stellt damit die Entwicklung einer neuen Produktgeneration dar, deren zugrundeliegenden Produkte als Referenzprodukte bezeichnet werden.<sup>118</sup> Die höchste Variationsebene bilden dabei der Prozess und dessen Variation.<sup>119</sup> Dabei werden Prozessstrukturen, beginnend mit der Festlegung einer Systemgrenze, gezielt verändert um Teilprozesse und deren Zusammenwirken zu optimieren. Änderungen an den Teilprozessen betreffen die Reihenfolge beziehungsweise die zeitliche Anordnung einzelner Prozessschritte, das Zusammenfassen oder Parallelisieren von Prozessschritten sowie das Verschieben von Prozessen in die Systemgrenze beziehungsweise aus der Systemgrenze heraus.

Auf die Ebene der Prozesse folgt nach KIRCHNER (2020) die Ebene des Verfahrens, das nach SAUER (2006) der konkreten Realisierung von Prozessen dient. Auf dieser Ebene wird folglich die verfahrenstechnische Umsetzung der zuvor festgelegten Prozesse entwickelt.

Die Ebene der Funktion, beziehungsweise der Funktionsstruktur, bildet die dritte Ebene der Produktmodellpyramide nach KIRCHNER (2020). Auf dieser Ebene werden grundlegende funktionale Eigenschaften festgelegt und die Funktionsstruktur des Produkts variiert zur Verbesserung des Zusammenwirkens von Teilfunktionen. SAUER (2006) beschreibt ebenfalls die Ebene der Funktion im Anschluss an die Ebene des Verfahrens, auf der das Produkt in Form der Gesamtfunktion und wesentlicher Teilfunktionen modelliert wird.

Die vierte Ebene der Produktmodellpyramide beschreibt den physikalischen Effekt. Der physikalische Effekt ist durch physikalische Gesetze beschreibbar und für technische Anwendungen nutzbar.<sup>120</sup> Auf dieser Ebene werden den festgelegten Funktionen und Teilfunktionen physikalische Effekte zugeordnet, die zur Erfüllung der (Teil-)Funktionen verwendet werden können. Beispielsweise können Bauteilverbindungen durch Ausnutzung des *Coulombschen Reibungsgesetzes* reibkraftschlüssig ausgeführt werden.<sup>121</sup>

Sowohl nach KIRCHNER (2020) als auch nach SAUER (2006) folgt auf die Ebene des physikalischen Effekts die Ebene des Wirkprinzips. Auf dieser Ebene werden Wirkprinzipien zur Konkretisierung der physikalischen Effekte durch Festlegung von Wirkflächen, Wirkkörpern, Wirkräumen und Wirkbewegungen, entwickelt.<sup>122</sup> Durch Verknüpfung der verschiedenen Wirkprinzipien entsteht die Wirkstruktur des Produkts.<sup>123</sup>

<sup>116</sup> Vgl. Zweck-Mittel-Differenzierung in Unterabschnitt 2.4.3

<sup>117</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 112ff.

<sup>118</sup> Vgl. Albers et al. (2016a), S. 3.

<sup>119</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 114ff.

<sup>120</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 119.

<sup>121</sup> Vgl. Lüders et al. (2012), S. 241.

<sup>122</sup> Vgl. Pahl et al. (2007), S. 54.

<sup>123</sup> Vgl. Ponn und Lindemann (2008), S. 79.

Zur vollständigen Festlegung der Produktgestalt werden auf der Ebene der Gestalt die zuvor festgelegten Wirkelemente der Wirkstruktur durch Gestaltelemente geometrisch und werkstofflich konkretisiert.<sup>124</sup> Das entstehende Gestaltmodell beziehungsweise die Produktgestalt beschreibt daher die Gesamtzahl der geometrisch und stofflich beschreibbaren Eigenschaften.<sup>125</sup> Zur Dokumentation und Darstellung der Produktgestalt können CAD-Programme und technische Zeichnungen eingesetzt werden, die zusätzlich als Schnittstelle zur Fertigung des Produkts dienen.<sup>126</sup>

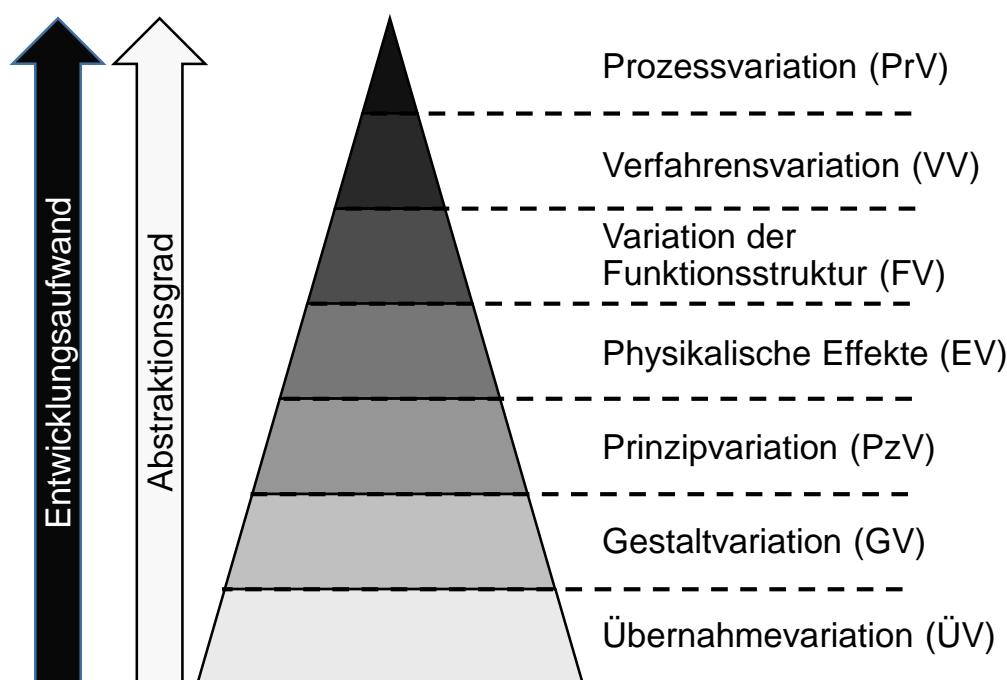


Abbildung 2-10: Produktmodellpyramide der Variationsarten bei der Entwicklung neuer Produkte<sup>127</sup>

Als Basis der auf Variationen ausgerichteten Produktmodellpyramide beschreibt KIRCHNER (2020) die Übernahme von Lösungs- und Gestaltprinzipien aus vorangegangenen Produkten. Im Fall der Übernahmevariation werden im Zuge der Entwicklung der neuen Produktgeneration Teilsysteme aus einem oder mehreren Referenzprodukten zunächst ohne Anpassungen übernommen, wenn diese den Anforderungen an die neue Produktgeneration entsprechen.<sup>128</sup> Wie in Abbildung 2-10 zu erkennen ist, steigen sowohl der Abstraktionsgrad als auch der Entwicklungsaufwand mit der Ebene der Produktmodellpyramide an, angefangen bei niedriger Abstraktion und niedrigem Aufwand auf Ebene der Übernahmevariation, bis hin zu einem hohen Abstraktionsgrad und entsprechend hohem Entwicklungsaufwand auf Ebene der Prozessvariation.<sup>129</sup>

<sup>124</sup> Vgl. Wäldele (2012), S. 33.

<sup>125</sup> Vgl. Ponn und Lindemann (2008), S. 124.

<sup>126</sup> Vgl. Wäldele (2012), S. 33, Ehrlenspiel und Meerkamm (2017b), S. 707f.

<sup>127</sup> Eigene Darstellung in Übereinstimmung mit Kirchner (2020), S. 114.

<sup>128</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 126f.

<sup>129</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 114.

### 2.4.5 Das Contact&Channel-Modell

Zur systematischen Analyse technischer System, die auf Wirkprinzipien der Mechanik, der Fluidmechanik und auf Feldern basieren, stellt MATTHIESEN (2002) den Contact&Channel-Ansatz (beziehungsweise das Contact&Channel-Modell) vor, durch den die Funktion der technischen Systeme durch deren Wirkflächen (Contacts) und Leitstützstrukturen (Channel) beschrieben werden kann. Alle Elemente, die das funktionale Verhalten des technischen Systems beeinflussen können, werden durch die Wirkstruktur definiert.<sup>130</sup> Da eine detaillierte Funktionsanalyse des vorliegenden technischen Systems im Rahmen dieser Arbeit auch zur Entwicklung von Prototypen beitragen wird, werden die essentiellen Bestandteile des Contact&Channel-Modells an dieser Stelle näher erläutert.

Als Wirkflächen werden feste Oberflächen von Körpern sowie Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern bezeichnet, die zeitweise oder dauerhaft in Kontakt zu weiteren Wirkflächen stehen und am Austausch von Stoffen, Energien oder Informationen beteiligt sind.<sup>131</sup> Wirkflächen können dabei je nach Auflösungsgrad der Betrachtung in kleinere Wirkflächen unterteilt werden.<sup>132</sup> In Kontakt stehende Wirkflächen werden als Wirkflächenpaar bezeichnet.<sup>133</sup>

Den Wirkflächen gegenüber stehen Begrenzungsflächen, die ebenfalls feste Oberflächen und Grenzflächen von Fluiden und Feldern darstellen, jedoch nicht mit weiteren Wirkflächen in Kontakt stehen und damit nicht am Austausch von Energien, Stoffen und Informationen beteiligt sind.<sup>134</sup>

Stehen Wirkflächen nicht in direktem Kontakt, sondern werden durch Körper, Fluide oder felddurchsetzte Räume miteinander verbunden, so wird diese Verbindung, die die dauerhafte oder zeitweise Leitung von Stoffen, Energien oder Informationen ermöglicht, als Leitstützstruktur bezeichnet.<sup>135</sup>

Die Funktionsanalyse beruht auf der Identifikation von Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaaren.<sup>136</sup> Als Beispiel kann die Übertragung des Drehmoments an einer Stirnradstufe herangezogen werden. Die Zahnflanken der beteiligten Zahnräder stellen die Wirkflächen dar, die bei Kontakt im Zahneingriff zum Wirkflächenpaar werden. Die Zahnräder an sich stellen die Leitstützstruktur dar, die das auftretende Moment leiten. Durch Wirkflächenpaare in der Verbindung der Zahnräder zu den Wellen, wird das Moment letztendlich an diese übertragen.<sup>137</sup>

---

<sup>130</sup> Matthiesen (2002), S. 51.

<sup>131</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 49.

<sup>132</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 71.

<sup>133</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 50.

<sup>134</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 50 und S. 68

<sup>135</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 51.

<sup>136</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 54.

<sup>137</sup> Vgl. Matthiesen (2002), S. 111.

### 3 Wissenschaftliche Herangehensweise und Ziele dieser Arbeit

Die wissenschaftliche Herangehensweise in dieser Arbeit basiert auf der *Design Research Methodology* nach BLESSING UND CHAKRABARTI (2009). In Abschnitt 3.1 werden dazu zunächst der Zweck, die Ziele und der Kontext dieser Arbeit erläutert. In Abschnitt 3.2 folgt darauf die Vorstellung der Forschungsfragen und Hypothesen, deren Beantwortung und Überprüfung mit den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Forschungsmethoden und Herangehensweisen im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführt wird.

#### 3.1 Zweck, Ziel und Kontext

Der oberste Zweck dieser Arbeit und der generellen Forschung hinsichtlich der Entwicklung von Prototypen besteht in der Unterstützung, Erleichterung und Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses durch die Entwicklung und den Einsatz effektiver und effizienter Prototypen. Eng damit verbunden sind die Erhöhung der Produktqualität und die Senkung der Kosten, wodurch eine höhere Kundenzufriedenheit erreicht wird. Die Zusammenhänge zwischen der Verbesserung des Einsatzes von Prototypen durch Verwendung von Entwicklungsmethoden und der Kundenzufriedenheit wird in Abbildung 3-1, dem *Impact Model*,<sup>138</sup> visuell aufbereitet. Es wird angenommen, dass durch den verstärkten Einsatz von Prototypingmethoden, die Qualität des Umfangs des Prototyps verbessert wird, wodurch die benötigte Entwicklungszeit des Prototyps, die Menge nicht benötigter Funktionen sowie die Menge der aufzubringenden Ressourcen gesenkt werden. Dies steigert die Effizienz des Prototypings und senkt bei gleichbleibenden anderen Faktoren, zum Beispiel den Kosten benötigter Materialien, die Kosten der Produktentwicklung. Dies kann bei gleichbleibendem Profit in die Reduktion der Produktkosten überführt werden, wodurch die Kundenzufriedenheit positiv beeinflusst wird. Der Einsatz von Prototypingmethoden führt zusätzlich zur Erhöhung des Wissenszuwachses durch Prototypen und trägt dazu bei, die Qualität der Anforderungen den zu entwickelnden Prototyp zu steigern. Dies entspricht einer Erhöhung der Effektivität des Prototypings, wodurch der Umgang mit Unsicherheiten in der Entwicklung verbessert wird, da offene Fragen gezielt untersucht werden können. Geringe Unsicherheiten senken das Risiko auftretender Fehler, was einerseits zu geringeren Entwicklungskosten durch vermiedene Nacharbeiten führt und andererseits zu einer erhöhten Produktqualität. Dadurch wird die Kundenzufriedenheit weiter positiv beeinflusst.

Basierend auf diesen Zusammenhängen ergeben sich drei Ziele für diese Arbeit:

1. Optimierung des Wissenszuwachses bei der Nutzung von Prototypen im Produktentwicklungsprozess
2. Erhöhung der Effektivität des Prototypings
3. Erhöhung der Effizienz des Prototypings

Um den Kontext zu beschreiben, in dessen Rahmen diese Arbeit angesiedelt ist, werden die in der VDI Richtlinie 2221 vorgestellten Kontextfaktoren verwendet, wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Auf makro- und mikroökonomischer Ebene treten dabei keine signifikanten Einschränkungen auf. Allerdings wird mit steigenden Marktrisiken in Verbindung mit hohen Qualitäts- und Leistungsansprüchen der Kunden an das Produkt, eine Erhöhung der

---

<sup>138</sup> Vgl. Blessing und Chakrabarti (2009).

Wichtigkeit der Entwicklung zufriedenstellender Produkte und damit auch steigender Bedarf an effektiven Prototypen zur Absicherung erwartet.

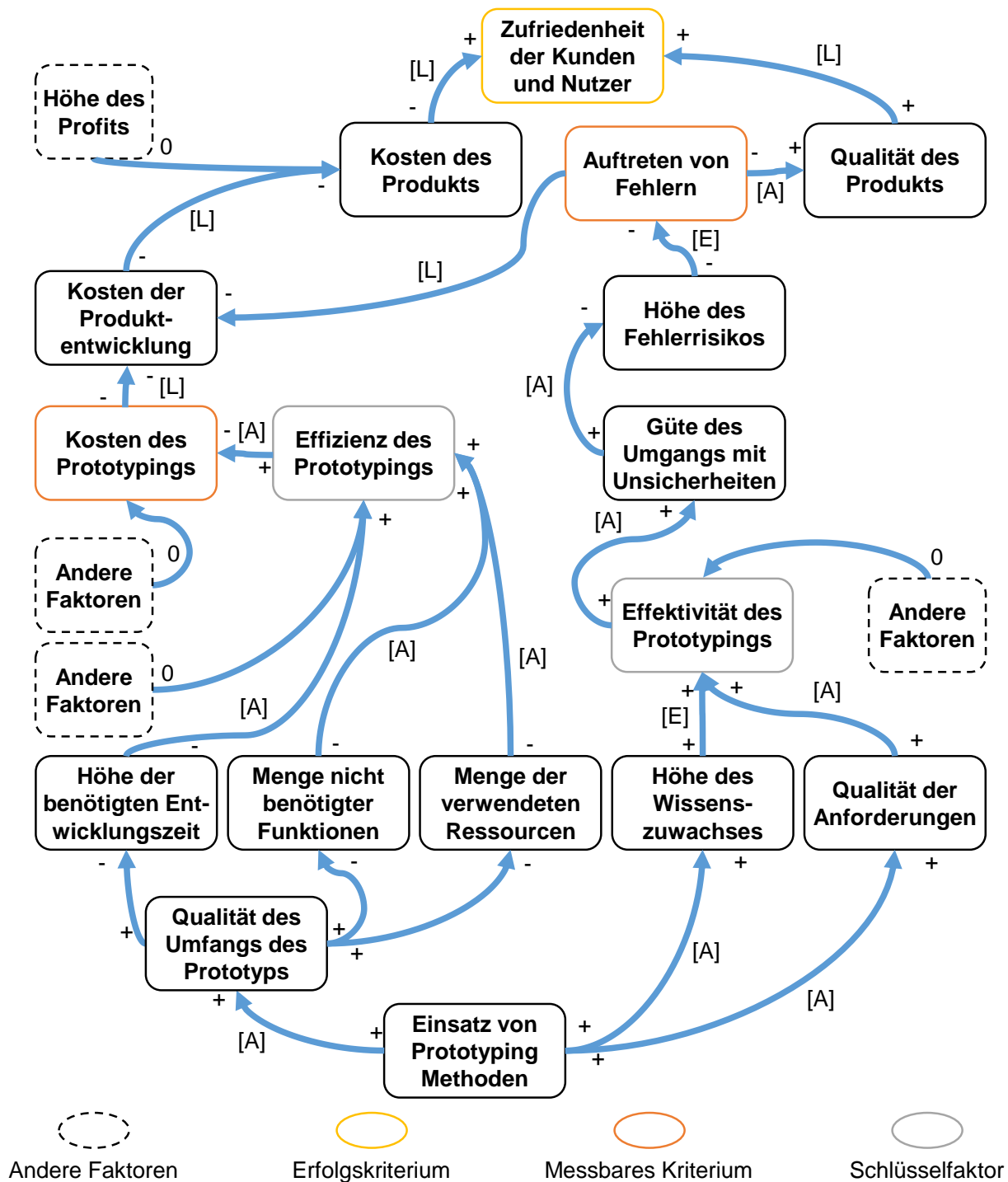


Abbildung 3-1: Impact Model zur Visualisierung der Verbindung zwischen dem Einsatz von Prototyping Methoden zur Entwicklung effizienter und effektiver Prototypen (unten) und der Entwicklung besserer Produkte, durch die die Kundenzufriedenheit gesteigert wird (oben) (eigene Abbildung).

Auf Unternehmensebene sind besonders diese Unternehmen interessant, die sich im Sektor mechanischer und mechatronischer Produkte aufhalten. Hierbei stehen besonders Produkte im Vordergrund, die bestehende mechanische Signale als Eingangsgröße zur Ableitung eines elektrischen Messsignals nutzen und sich damit als *Mechatronische Maschinenelement*, beziehungsweise *sensorintegrierende Maschinenelemente*, klassifizieren lassen.<sup>139</sup> Dies ist jedoch keine Beschränkung auf nur diesen Sektor, weshalb die Anwendbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit auch in Hinblick auf weitere Sektoren diskutiert wird. Zur effektiven und effizienten Entwicklung von Prototypen ist es vorteilhaft aber nicht zwingend erforderlich, dass das Unternehmen die Mittel und Möglichkeiten zur eigenen Herstellung der Prototypen hat. Selbiges gilt für eine hohe Produktionstiefe und verfügbare Fertigungskapazität sowie das Vorhandensein einer Prüfumgebung.

Auf Projektebene wird eine ausgeprägte Innovationskultur und vorhandenes Innovationsmanagement erwartet. Derart innovative und offene Projekte können am meisten davon profitieren, wenn das Prototyping unterstützt wird. Zudem sollten die Qualitätsansprüche an das zu entwickelnde Produkt hoch sein. Die Komplexität und Neuheit der zu entwickelnden Produkte ist idealerweise hoch, da dies in Kombination mit den Qualitätsansprüchen die Bereitschaft zur Erhöhung des Entwicklungsaufwands einzelner Prototypen zur Steigerung der Effektivität ermöglichen kann. Die Verwendung von Produktentwicklungsmethoden sollte innerhalb der am Projekt beteiligten Personen verbreitet und anerkannt sein um die Akzeptanz einer weiteren Methode nicht zu gefährden. Die Teammitglieder sollten zudem ermutigt werden die Methoden im Entwicklungsprozess zu verwenden und der dafür aufzubringende Aufwand sollte unter dem Aspekt des *Frontloadings* nicht in Frage gestellt werden.

Die letzte Gruppe der Kontextfaktoren betrifft die am Entwicklungsprozess beteiligten Individuen. Im Allgemeinen richtet sich die Methode an Entwickelnde, die den Umgang mit Methoden bereits kennen und offen für neue Methoden sind. Dabei wird erwartet, dass der Erfahrungslevel der Entwickelnden einen Einfluss auf das Ergebnis der Anwendung der Methode hat und dass besonders unerfahrene Entwickelnde deutlicher von der Methode profitieren, da diese noch keine persönliche Herangehensweise für sich entwickelt haben. In Übereinstimmung mit den Qualitätsansprüchen auf Ebene des Unternehmens wird auch von den Entwickelnden, die diese Methode nutzen, der Anspruch an eine hohe Qualität der entwickelten Produkte vorausgesetzt.

### 3.2 Forschungsfragen und Hypothesen

Basierend auf den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Kontextfaktoren und den Ergebnissen der Literaturrecherche in Kapitel 2, werden in diesem Abschnitt die Forschungsfragen und Hypothesen aufgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet und überprüft werden.

Die Forschungsfragen und Hypothesen beziehen sich dabei auf das folgende übergeordnete Phänomen.<sup>140</sup>

**Phänomen:** Die Verwendung und Entwicklung von Prototypen im Produktentwicklungsprozess

<sup>139</sup> Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2019) und Kapitel 4

<sup>140</sup> Im Rahmen der Design Research Methodology nach Blessing und Chakrabarti (2009) wird das zu erforschende Phänomen, das sich beobachten und wahrnehmen lässt, äußerst abstrakt und übergeordnet beschrieben, wodurch zunächst ein sehr breites Feld eröffnet wird.

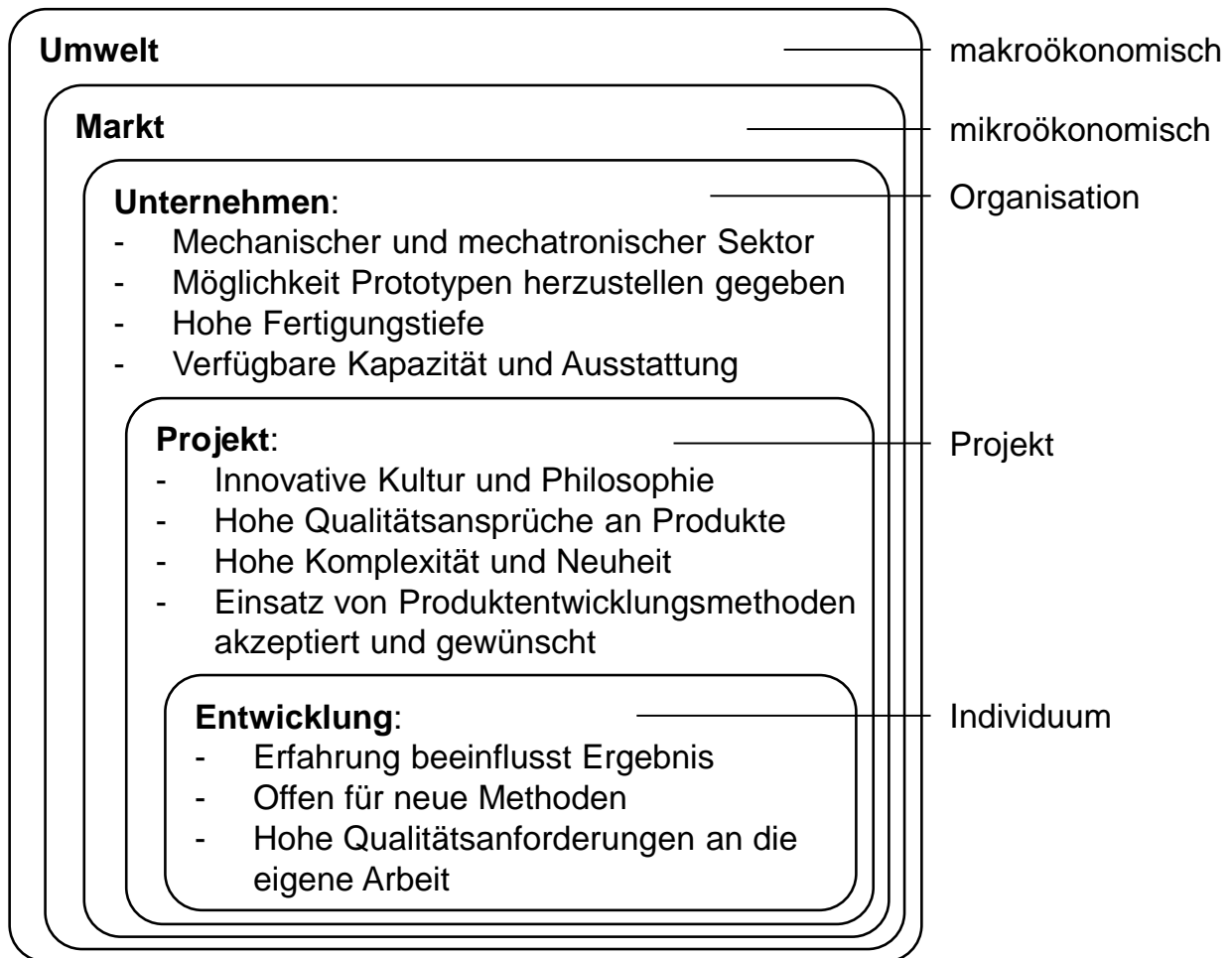


Abbildung 3-2: Für diese Arbeit wichtige Kontextfaktoren<sup>141</sup>

Die Literaturrecherche in Kapitel 2 hat gezeigt, dass die Verwendung von Prototypen im Produktentwicklungsprozess neuer Produkte aufgrund der vielen Vorteile im Allgemeinen empfohlen ist, jedoch die Methoden zur Entwicklung der Prototypen an sich häufig nicht näher beschrieben sind. Es zeigt sich zudem, dass die Anzahl an bestehenden Prototypenentwicklungsmethoden zur Entwicklung effizienter und effektiver Prototypen im Vergleich zur Anzahl an Produktentwicklungsmethoden mit vergleichbarem Ziel deutlich niedriger ist. Die existierenden Prototypenentwicklungsmethoden, -rahmenwerke und -ansätze beziehen sich dabei meist auf die Identifikation und Festlegung der richtigen Ziele des Prototypings zur richtigen Zeit, beispielsweise ob zuerst hinsichtlich der Brauchbarkeit, der Machbarkeit oder der Begehrtheit getestet werden sollte<sup>142</sup>, auf die Auswirkungen verschiedener Materialien und Repräsentationsformen auf das Ergebnis der Versuche<sup>143</sup> oder dem Aufbau des Gesamtprüfstands inklusive der wichtigen Koppelsysteme in XiL-Prüfständen<sup>144</sup>. Dabei bleibt jedoch die methodische Herangehensweise an die Entwicklung der eingesetzten Prototypen offen.

<sup>141</sup> Basierend auf VDI Richtlinie 2221

<sup>142</sup> Vgl. Menold et al. (2018).

<sup>143</sup> Vgl. Dunlap et al. (2014).

<sup>144</sup> Vgl. Albers et al. (2013).

Im Gegensatz dazu beziehen sich die Ziele dieser Arbeit direkt auf die Entwicklung von Prototypen für verschiedene Einsatzzwecke und die Bereitstellung von Methoden um diese Entwicklung zu unterstützen. Um dies zu erreichen, muss zunächst der Prozess des Prototypings in einem Modell beschrieben werden, das als Basis zur Findung von Prototypenentwicklungsmethoden dient. Dieser Zusammenhang findet sich ebenfalls in der Forschung an Produktentwicklungsmethoden.<sup>145</sup> Daher liegt folgende Hypothese nahe, die im Laufe der Arbeit überprüft wird.

**Hypothese 1:** Produktentwicklungsmodelle und -methoden sind als Basis für die Erstellung von Prototypenentwicklungsmodellen und -methoden durch geringe Anpassungen verwendbar.

Aufbauend auf dieser Hypothese werden drei Forschungsfragen (FF 1, FF 2, FF 3) formuliert. Der Fokus der ersten Forschungsfrage liegt dabei auf dem Vergleich zwischen Produkten und Prototypen sowie dem Herausarbeiten deren Gemeinsamkeiten und Unterschieden.

### **Forschungsfrage 1**

**FF 1**

*Welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Produkten und Prototypen bestehen und welche Auswirkungen haben diese Unterschiede und Gemeinsamkeiten auf die jeweiligen Entwicklungsmodelle und -methoden?*

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage stellt die Grundlage für die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit dar. Bei dieser zweiten Forschungsfrage liegt der Fokus darauf, welche bestehenden Produktentwicklungsmethoden auch für die Prototypenentwicklung verwendet werden können. Dabei werden auch die Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen einbezogen, um die notwendigen Anpassungen an Produktentwicklungsmodelle zur Verwendung in der Entwicklung von Prototypen herauszuarbeiten. Die zweite Forschungsfrage wird daher wie folgt formuliert:

### **Forschungsfrage 2**

**FF 2**

*Welche existierenden Produktentwicklungsmodelle und -methoden können zur Entwicklung von Prototypen eingesetzt werden und welche Anpassungen müssen basierend auf den Unterschieden und Gemeinsamkeiten zwischen Produkten und Prototypen durchgeführt werden?*

Ausgehend davon, dass die ersten beiden Forschungsfragen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden können, schließt sich die dritte Forschungsfrage an, die sich mit den Auswirkungen der Anwendung der Prototypenentwicklungsmethoden auf das Ergebnis der Prototypenentwicklung beschäftigt. Weiterführend stehen dabei auch die Effekte der veränderten Prototypenentwicklung und deren Ergebnisse auf die Resultate des Produktentwicklungsprozesses an, in dem die Prototypenentwicklungsmethoden angewendet wurden.

<sup>145</sup> Vgl. Stachowiak (1973).

### Forschungsfrage 3

FF 3

Welchen Effekt hat die Anwendung von Prototypenentwicklungsmethoden auf das Ergebnis der Prototypenentwicklung und weiterführend auf das Ergebnis des Produktentwicklungsprozesses, in dem die entwickelten Prototypen eingesetzt werden?

### 3.3 Forschungsmethoden und Herangehensweise

Zur Beantwortung der Forschungsfragen und dem Überprüfen der Hypothese aus Abschnitt 3.2 werden verschiedene Forschungsmethoden eingesetzt, die in diesem Abschnitt vorgestellt und erläutert werden. Auch an dieser Stelle wird die von BLESSING UND CHAKRABARTI (2009) vorgestellte Herangehensweise verwendet. Die vier Phasen sind dabei *research clarification*, *first descriptive study*, *prescriptive study* und *second descriptive study*<sup>146</sup>. Den visuellen Überblick über die Inhalte dieser vier Phasen, die im weiteren Verlauf näher erläutert werden, gibt Abbildung 3-3.

Im Rahmen der *research clarification* stehen zunächst das Verständnis des Forschungsthemas und die Identifikation des Forschungsbedarfs im Vordergrund. Dazu wurde eine Literaturrecherche zum Stand der Technik und Forschung hinsichtlich der Entwicklung und dem Einsatz von Prototypen durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Diese Ergebnisse und deren Analyse bildeten bereits die Basis für die in Abschnitt 3.1 erörterten Forschungsfragen.

Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Literaturrecherche dazu genutzt die Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen und deren Einfluss auf die jeweiligen Entwicklungsmethoden in der *first descriptive study* herauszuarbeiten und zu analysieren. Diese Ergebnisse werden wiederum dazu genutzt, Produktentwicklungsmodelle zu identifizieren, die sich unter Einbringungen von Anpassungen für die Verwendung in der Entwicklung von Prototypen eignen. Die Ergebnisse dieser Phase finden sich in Kapitel 4.

In der dritten Phase, der *prescriptive study*, steht die Einführung von Prototypenentwicklungsmodellen und -methoden im Vordergrund, deren Ursprung in Produktentwicklungsmodellen liegt. Die Ergebnisse dieser Phase sind daher die in den Kapiteln 4, 6 und 7 vorgestellten Prototypenentwicklungsmodelle und -methoden. Dabei wird auf die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie Fallstudien zu entwickelten Prototypen zurückgegriffen, um die Anwendbarkeit der postulierten Modelle zu verifizieren.

Die vierte Phase, die *second descriptive study*, beschäftigt sich dann mit der initialen Verifikation der Anwendbarkeit der vorgestellten Prototypenentwicklungsmethoden. Dazu werden die Methoden beispielhaft im Produktentwicklungsprozess verschiedener sensorintegrierender Maschinenelemente angewendet. Die herangezogenen sensorintegrierenden Maschinenelemente befinden sich dabei im Konzeptstatus und sollen hinsichtlich deren Funktionalität und Machbarkeit überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Phase finden sich in Kapitel 8 und der anschließenden Diskussion der Gesamtergebnisse in Kapitel 9.

<sup>146</sup> Da es sich bei der referenzierten Quelle dieser Herangehensweise um eine Englische handelt, wird die Bezeichnung der vier Phasen nicht ins Deutsche übersetzt.

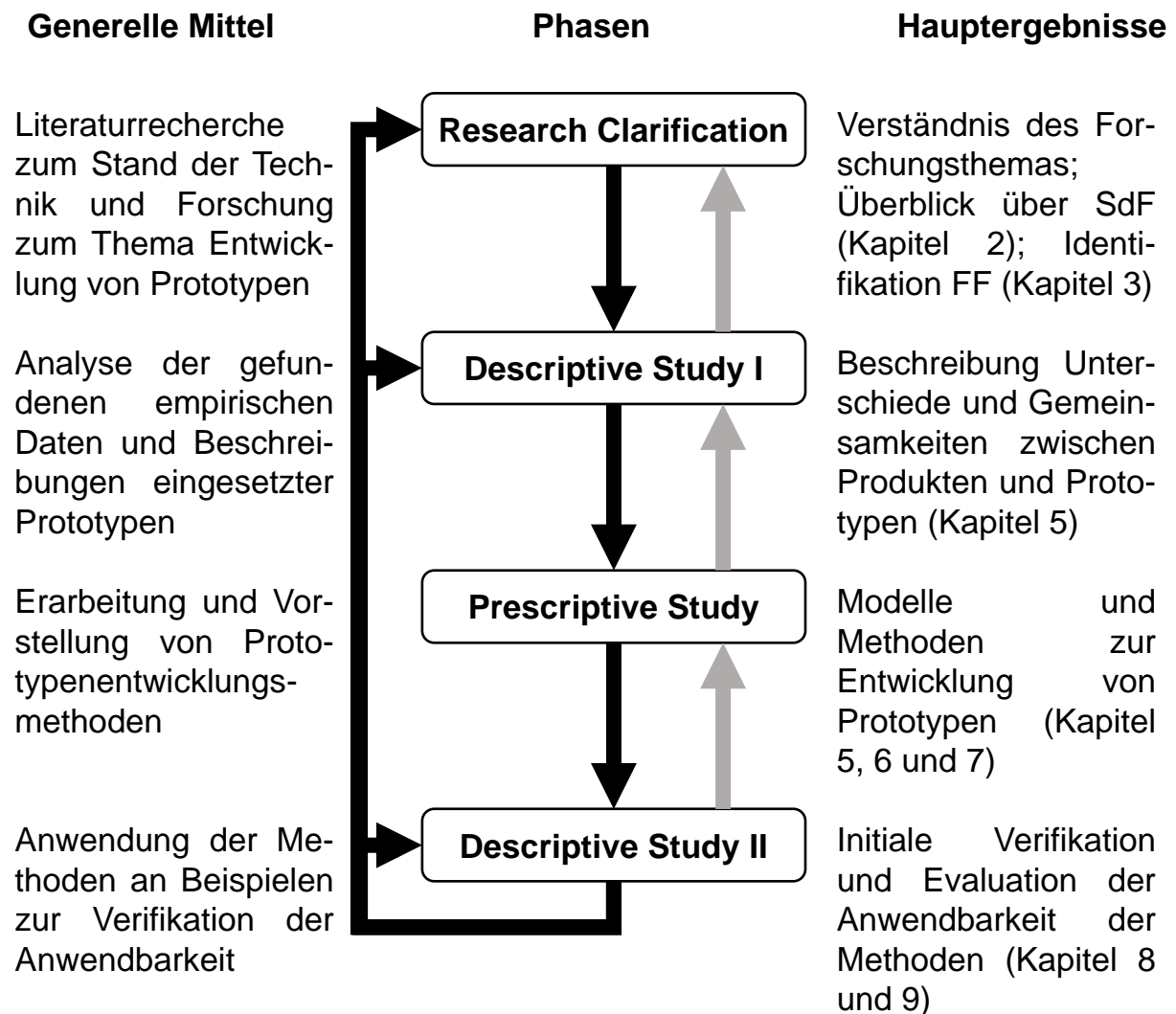


Abbildung 3-3: Wissenschaftliche Herangehensweise basierend auf der *design research methodology*<sup>147</sup>

<sup>147</sup> In Anlehnung an Blessing und Chakrabarti (2009).

#### 4 Sensorintegrierende Maschinenelemente

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, stellen sensorintegrierende Maschinenelemente, die zu den mechatronischen Maschinenelementen zählen, einen essentiellen Bestandteil des Kontexts dieser Arbeit dar. Im weiteren Verlauf werden sensorintegrierende Maschinenelemente an verschiedenen Stellen zur Veranschaulichung der Ergebnisse dieser Arbeit beispielhaft herangezogen. Daher werden mechatronische Maschinenelemente und insbesondere die Klasse der sensorintegrierenden Maschinenelemente in diesem Kapitel näher erläutert.

Maschinenelemente beschreiben Bauteile und Baugruppen des Maschinenbaus, die in ähnlicher Form und Funktion in vielen verschiedenen technischen Systemen eingesetzt werden und nicht weiter unterteilbar sind, ohne dass deren Funktion eingeschränkt wird.<sup>148</sup> Als Beispiele derartiger Maschinenelemente können Schrauben, Wälzlager und Wellenkupplungen genannt werden, wie in Abbildung 4-1 visualisiert. Maschinenelemente erfüllen dabei zumeist Kraft- und Energieleitungsfunktionen und werden in einer Vielzahl technischer Systeme, durch die im jeweiligen Prozess entstehenden Kräfte belastet. Beispielsweise werden Radialkräfte, die durch das übertragene Drehmoment an einer Zahnradstufe entstehen, über die Wellenlagerung an das Gehäuse übertragen. Diese Maschinenelemente, deren Funktionsumfang rein mechanisch ist, werden im Folgenden *konventionelle Maschinenelemente* genannt, um sie von den nachfolgend beschriebenen, durch elektronische und informationstechnische Funktionen erweiterten *mechatronischen Maschinenelementen* eindeutig zu unterscheiden.

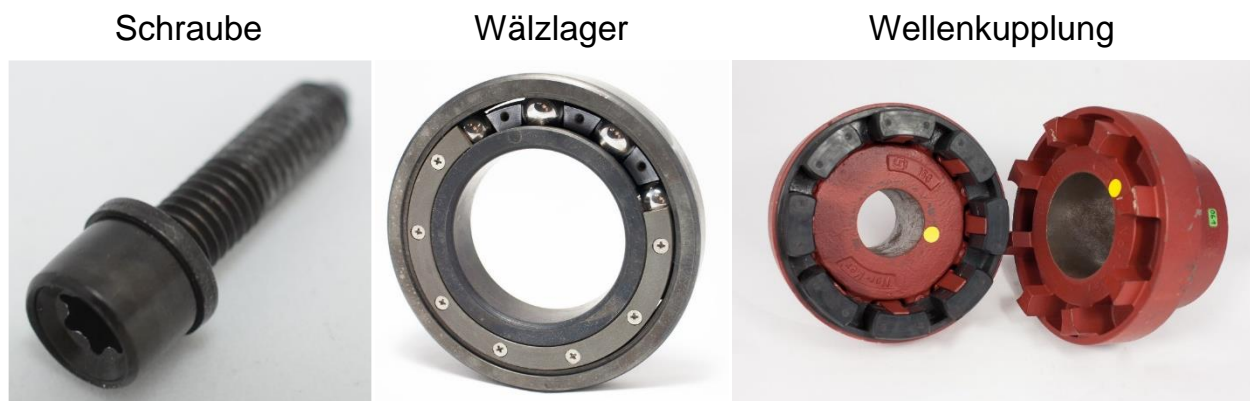


Abbildung 4-1: Zusammenstellung verschiedener konventioneller Maschinenelemente<sup>149</sup>

Durch die Digitalisierung der Industrie, zum Beispiel durch Zukunftsprojekte wie Industrie 4.0 und das Internet of Things, die eine flächendeckende Vernetzung von Maschinenbauprodukten und -anlagen sowie technischen Systemen entlang des gesamten Produktlebenslaufs anstreben, steigen der Bedarf und die Anforderungen an Daten und Informationen über die technischen Systeme und die in diesen Systemen ablaufenden Prozesse.<sup>150</sup> Dazu zählen beispielsweise Informationen über Fertigungsprozesse in Fertigungsanlage, die die Überwachung des Fertigungsprozesses und die Einhaltung der Fertigungstoleranzen des hergestellten Bauteils zulassen, Informationen über die Fertigungsanlage an sich,

<sup>148</sup> Vgl. Binz und Bartholdt (2014).

<sup>149</sup> Eigene Darstellung

<sup>150</sup> Vgl. Abramovici und Herzog (2016).

um den Zustand dieser Anlage zu überwachen und deren Wartung vorausschauend zu planen sowie Informationen über das Produkt während dessen Nutzungsphase, um die antizipierte Nutzung mit der tatsächlichen Nutzung abzugleichen und nachfolgende Generationen des Produkts besser für dessen Anwendungsbereich zu entwickeln.<sup>151</sup> Darüber hinaus werden auch im Rahmen der Validierung neuer Produkte und Komponenten aussagekräftige Messungen durchgeführt werden müssen, durch die die Belastungen im Realbetrieb ermittelt werden können.<sup>152</sup>

Um den neuen Anforderungen zu genügen, stellt die Integration von Sensorik zur prozessnahen Messung einen essentiellen Bestandteil verschiedener Forschungsvorhaben dar. Dies wird damit begründet, dass die Trennung physischer Komponenten und relevanter Informationen einer erfolgreichen Implementierung im Produktlebenszyklus entgegensteht.<sup>153</sup> Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 653 werden daher *gentelligente Bauteile* erforscht, durch die die Erfassung und Nutzung vererbbarer, bauteilinhärenter Informationen in der Produktionstechnik ermöglicht werden soll. Gentelligente Bauteile stellen dabei kommunikationsfähige Bauteile, Sensoren und Maschinen dar.<sup>154</sup>

Ein weiteres Forschungsvorhaben zielt auf die Entwicklung *hybrider intelligenter Konstruktionselemente* (HIKE) ab. Diese beschreiben die Beachtung der Funktionsintegration von Grundsystem, Aktorik und Sensorik von Beginn der Entwicklung des Konstruktionselements.<sup>155</sup> Dabei kommen einerseits hybride Fertigungstechnologien wie das Thixoschmieden als Kombination aus Schmieden und Gießen sowie hybride Werkstoffe wie Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz und andererseits erfüllen diese Konstruktionselemente hybride Funktionen in Regelkreisen.<sup>156</sup> Die Intelligenz dieser Konstruktionselemente wiederum besteht in der räumlichen Integration verschiedener Funktionseinheiten, der Fähigkeit, zielgerichtet zu agieren und sich der Umwelt selbst anzupassen sowie der Fähigkeit, Informationen zu speichern und zu kombinieren.<sup>157</sup> Neben der Erweiterung der Funktion der Konstruktionselemente steht auch die Standardisierung dieser und eine einfach Anwendbarkeit im Vordergrund, die durch eine abgestimmte Konstruktionsmethodik erreicht werden soll.<sup>158</sup>

Auch *mechatronische Maschinenelemente* (MME) setzen an dieser Stelle an und beschreiben Maschinenelemente, deren Funktionsumfang im Vergleich zu konventionellen Maschinenelementen hinsichtlich der Anforderungen der Digitalisierung erweitert wurde. Im Vergleich zu konventionellen Maschinenelementen, deren Funktionsumfang im Wesentlichen aus Leitungsfunktionen zur Übertragung von Kräften besteht, werden mechatronische Maschinenelemente um mechatronische Funktionen, wie zum Beispiel Sensor-, Aktor- und Kommunikationsfunktionen, erweitert. Dabei bleibt die den Maschinenelementen inhärente Eigenschaft erhalten, dass diese nicht sinnvoll weiter unterteilt werden können,

---

<sup>151</sup> Vgl. Martin et al. (2018a).

<sup>152</sup> Vgl. Matthiesen et al. (2016), S. 18ff.

<sup>153</sup> Vgl. Denkena et al. (2014).

<sup>154</sup> Vgl. Denkena und Morke (2017).

<sup>155</sup> Vgl. Crostack (2018), S. 17.

<sup>156</sup> Vgl. ebd.

<sup>157</sup> Vgl. Binz (2016), S. 36f.

<sup>158</sup> Vgl. Crostack (2018), S.5.

ohne dass deren Funktionsfähigkeit eingeschränkt wird<sup>159</sup> Der Aufwand zur Verwendung dieser mechatronischen Maschinenelemente ist dabei vergleichbar mit dem Aufwand zur Verwendung konventioneller Maschinenelemente und Schnittstellen zwischen konventionellen Maschinenelementen und dem technischen System, in dem diese appliziert sind, werden auch von mechatronischen Maschinenelementen genutzt, sodass eine Austauschbarkeit des konventionellen Maschinenelements durch das mechatronische Maschinenelement besteht.<sup>160</sup> Einerseits können dadurch mechatronische Maschinenelemente bei der Entwicklung neuer technischer Systeme vergleichbar zu konventionellen Maschinenelementen verwendet werden und andererseits können konventionelle Maschinenelemente in bestehenden Systemen durch mechatronische Maschinenelemente ersetzt werden, sodass auch ältere, bestehende Anlagen und Fertigungseinrichtungen digitalisiert werden können.

Zur Unterscheidung und Klassifizierung verschiedener mechatronischer Maschinenelemente, beschreiben STÜCHELI UND MEBOLDT (2013) eine Klassifizierung dieser Elemente bestehend aus sensorintegrierten Maschinenelementen (sensor-integrated machine elements), Semi-Aktoren (semi-actuators) und der Fusion aus Sensoren und Aktoren (sensor-actuator fusions).<sup>161</sup> Unter sensorintegrierenden Maschinenelemente werden dabei mechatronische Maschinenelemente zusammengefasst, die eine untrennbare räumliche und funktionelle Verknüpfung aus Maschinenelement und Sensor darstellen.<sup>162</sup> Semi-Aktoren hingegen erfüllen keine sensorische Funktion. Auch sind sie nicht in der Lage, Energien, zum Beispiel elektrische, in mechanische Energie zu wandeln. Jedoch agieren sie passiv im System durch Anpassung ihrer mechanischen Eigenschaften, beispielsweise eine Anpassung der Steifigkeit, wodurch bei geringem Energieverbrauch und Regelaufwand ein weiterer Freiheitsgrad geschaffen wird.<sup>163</sup> Die Möglichkeit, die Eigenschaft einer Komponente derart anzupassen, dass das System vorteilhaft beeinflusst wird, macht sich auch die Adaptronik zu Nutze, beispielsweise im Rahmen der Anpassung der Steifigkeit der Feder zur Abstimmung eines Tilgers je nach zu erreichender Tilgungsfrequenz.<sup>164</sup> Weiterführend beschreiben STÜCHELI UND MEBOLDT (2013) die Gruppe der Elemente, die eine Fusion aus Sensoren und Aktoren darstellen. Dabei wird ein Sensor in einen Aktor integriert um Platz zu sparen und um die Messstrecke zwischen Sensorposition und dem Angriffspunkt des Aktors zu verkürzen.<sup>165</sup>

MARTIN ET AL. (2018a) sowie VORWERK-HANDING ET AL. (2019) übernehmen die Benennung mechatronischer Maschinenelemente als übergeordneten Begriff, klassifizieren mechatronische Maschinenelemente jedoch basierend auf der Art der implementierten Funktionen und unterteilen dabei in *Maschinenelemente mit zusätzlichen Aktorfunktionen* und *Maschinenelemente mit zusätzlichen Sensorfunktionen*. Dies trägt der genaueren Unterscheidung der verschiedenen Elemente bei.<sup>166</sup> Maschinenelemente mit zusätzlichen Sensorfunktionen stehen dabei zunächst im Vordergrund, da die Integration von Aktorik aufgrund des begrenzten Bauraums zusätzliche Herausforderungen mit sich bringt. Maschinenelemente

<sup>159</sup> Vgl. Stücheli und Meboldt (2013), S. 6.

<sup>160</sup> Vgl. Martin et al. (2018a), Vorwerk-Handing et al. (2019).

<sup>161</sup> Vgl. Stücheli und Meboldt (2013), S. 8f.

<sup>162</sup> Vgl. ebd.

<sup>163</sup> Vgl. ebd.

<sup>164</sup> Vgl. Janocha (2007), S. 1f

<sup>165</sup> Vgl. Stücheli und Meboldt (2013), S. 9.

<sup>166</sup> Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2019), S. 4f.

mit zusätzlichen Sensorfunktionen werden daraufhin weiter unterteilt, basierende auf dem Zusammenhang zwischen den Kraftleitungsfunktionen des konventionellen Maschinenelements, das die Basis des mechatronischen Maschinenelements darstellt und der mittels dieses Elements gemessenen Größe. Drei Kategorien von Maschinenelementen mit zusätzlichen Sensorfunktionen werden dabei unterschieden. Die erste Kategorie bilden *sensortragende Maschinenelemente*, die lediglich einer räumlichen Integration des Sensors in das entsprechende Maschinenelement entsprechen. Die Messgröße des integrierten Sensors ist dabei unabhängig von der Funktion des Maschinenelements. Ein Beispiel eines sensortragenden Maschinenelements kann mit der Integration eines Temperatursensors in eine Schraube gegeben werden. Axialkräfte, die über diese Sensorschraube übertragen werden, beeinflussen das Sensorelement nicht. Die Messung der Temperatur wird nicht durch die übertragene Axialkraft beeinflusst.



Abbildung 4-2: Verallgemeinerter Zusammenhang der Teilfunktionen sensor-integrierender Maschinenelemente<sup>167</sup>

Die zweite Kategorie bilden sensorintegrierende Maschinenelemente, deren Sensorfunktionen auf die Kraftleitungsfunktionen des Maschinenelements angewiesen sind. Die mechanischen Kräfte und Energien, die mittels des Maschinenelements übertragen werden, werden vom Maschinenelement in mechanische Signale gewandelt, die wiederum durch den integrierten Sensor aufgenommen und in elektrische Signale umgeformt werden. Die mechanische und die sensorische Funktion des Maschinenelements stehen dabei in direkt Zusammenhang. Als Beispiel kann die Integration eines Dehnungssensors, beispielsweise eines Dehnmessstreifens, in eine Schraube gegeben werden, wobei die mittels der Schraube übertragene Axialkraft anhand der daraus resultierenden Dehnung der Schraube ermittelt wird. Das mechanische Signal entspricht in diesem Fall der Dehnung der Schraube, wohingegen das elektrische Signal der Widerstandsänderung des Dehnmessstreifens entspricht.<sup>168</sup> Dieser Zusammenhang wird durch Abbildung 4-2 visualisiert.

Die dritte Kategorie bilden sensorisch nutzbare Maschinenelemente. Das mechanische Signal, das aufgrund der mechanischen Funktion des Maschinenelements entsteht, entspricht in diesem Fall ebenfalls einem elektrischen Signal, das direkt zur Messung der ursächlichen mechanischen Größe verwendet werden kann. Ein Beispiel eines derartigen sensorisch nutzbaren Elements kann durch das kraftmessende Wälzlager gegeben werden.<sup>169</sup> Bei diesem Wälzlager wird die Impedanz gemessen. Die Impedanz ist dabei abhängig von

<sup>167</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Vorwerk-Handing et al. (2019), S. 5.

<sup>168</sup> Vgl. Groche und Brenneis (2014).

<sup>169</sup> Vgl. Schirra et al. (2019).

der Höhe des Schmierspalts und der Größe der Hertz'schen Fläche in der Belastungszone des Wälzlagers.

Im Rahmen dieser Arbeit stehen besonders sensorintegrierende Maschinenelemente im Vordergrund und werden in Kapitel 8 als Beispiele zur Verifikation der vorgestellten Methoden herangezogen.

## 5 Das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung

In diesem Kapitel wird auf den in der Literaturrecherche gefundenen Ergebnisse aufgebaut. Dabei werden in Abschnitt 5.1 zunächst Schlüsse aus dem Stand der Forschung gezogen und wichtige Definitionen eingeführt. Anschließend werden die Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen hinsichtlich deren methodischer Entwicklung in den Abschnitten 5.2 und 5.3 herausgearbeitet indem der mit Prototypen durchgeführte Prozess modelliert wird, der in der Nutzungsphase des Prototyps durchgeführt wird. Aufbauend darauf wird in Abschnitt 5.4 das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung vorgestellt. Die Produktmodellpyramide wird anschließend in Abschnitt 5.5 dazu herangezogen, die Unterschiede zwischen dem Produkt in Entwicklung und dessen entwickelter Prototypen zu beschreiben, um eine Möglichkeit der Bewertung der Aussagekraft der mit den entwickelten Prototypen erzielten Ergebnisse einzuführen.

### 5.1 Definitionen und Begriffsverständnis

Aufbauend auf den im Stand der Forschung, siehe Kapitel 2, dargelegten Grundlagen der Produktentwicklung und der Entwicklung von und mit Prototypen, werden in diesem Abschnitt zunächst wichtige Schlüsse aus dem vorliegenden Stand gezogen und weitere für diese Arbeit essentielle Definitionen für ein einheitliches Begriffsverständnis eingeführt.

Nach VDI RICHTLINIE 2221 kann der in der Entwicklung von Produkten durchgeführte Problemlösungsprozess durch die in Abbildung 2-1 dargestellte Modellvorstellung eines Regelungszyklus zwischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen beschrieben werden.<sup>170</sup> Diese Modellvorstellung wird nun auch im Rahmen dieser Arbeit auf die Entwicklung von Prototypen übertragen, da auch in der Entwicklung und dem Einsatz von Prototypen ein vergleichbarer Zyklus durchlaufen wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher der Begriff *Prototypingaktivität* eingeführt, um die Entwicklung und den Einsatz von Prototypen zur Erreichung der Ergebnisse aufbauend auf den gesetzten Zielen zu beschreiben. Eine Prototypingaktivität nach Definition 3 beginnt mit einem Ziel, beispielsweise einer offenen Frage hinsichtlich des Produkts in Entwicklung.<sup>171</sup> Im Rahmen der Prototypingaktivität wird aufbauend auf den festgelegten Zielen ein oder mehrere Prototypen entwickelt und eingesetzt, wodurch Ergebnisse, beispielsweise in Form von Antworten auf die offenen Fragen, erreicht werden. Aufbauend auf der Analyse dieser Ergebnisse und dem Abgleich mit den gesetzten Zielen, können neue Ziele für weitere Prototypingaktivitäten oder weitere Aktivitäten des Produktentwicklungsprozesses ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5-1 verdeutlicht.

---

<sup>170</sup> VDI Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 21.

<sup>171</sup> Allgemeine Ziele der Prototypenentwicklung sind in Abschnitt 2.2 näher beschrieben. Die genauen Ziele einer Prototypingaktivität werden zu Beginn des Prototypenentwicklungsprozesses festgelegt.

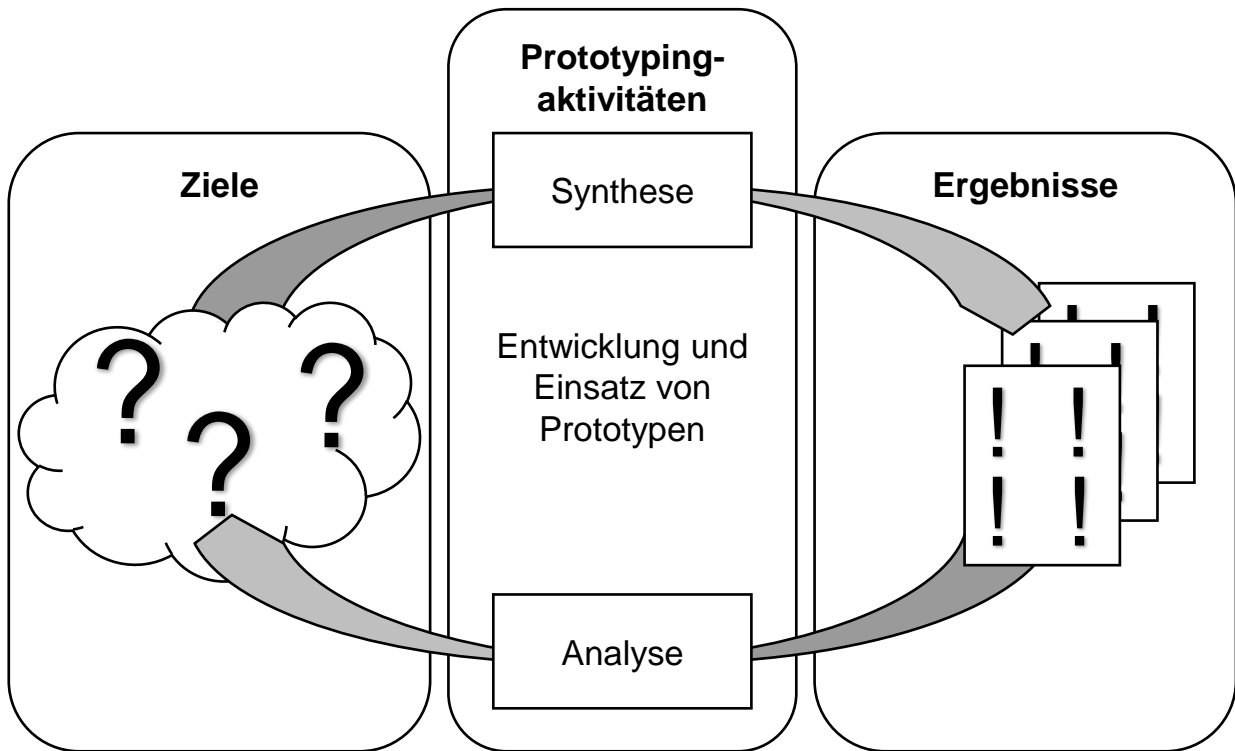


Abbildung 5-1: Einfacher Regelungszyklus zwischen Zielen, Prototypingaktivitäten und Ergebnissen<sup>172</sup>

Wichtig dabei ist, dass im Rahmen einer Prototypingaktivität jeweils nur eine festgelegte Menge von Zielen im Vordergrund steht und die Prototypingaktivität daher auf genau diese Menge an Zielen ausgerichtet wird. Werden die Ziele im Rahmen der Prototypingaktivität nicht erreicht, können weitere Prototypingaktivitäten mit gleichen, beziehungsweise ähnlichen Zielen gestartet werden. Diese weiteren Prototypingaktivitäten ziehen eine neue Entwicklung der eingesetzten Prototypen oder eine Anpassung der mit den bereits entwickelten Prototypen durchgeführten Versuche nach sich.

### Prototypingaktivität

*Die Prototypingaktivität beschreibt die Beantwortung, beziehungsweise den Versuch der Beantwortung, einer festgelegten Fragestellung bezüglich des Produkts in Entwicklung durch die Entwicklung und den Einsatz eines oder mehrerer Prototypen.*

Def. 3

Prototypingaktivitäten verfolgen dabei verschiedene Ziele, die sich anhand ihrer Ausprägung in zwei Gruppen einordnen lassen. Die erste Gruppe bilden Prototypingaktivitäten im Rahmen derer explorative, den Lösungsraum erweiternde Ziele verfolgt werden, beispielsweise wenn Neues über das Produkt in Entwicklung und die späteren Nutzungsprozesse gelernt werden soll<sup>173</sup>, wenn Wege zur Verbesserung bestehender Konzepte sowie zur Entwicklung neuer Konzepte gesucht werden<sup>174</sup> oder zum besseren Verstehen eines Produkts in Entwicklung und der Offenlegung unbekannter Unbekannter (engl.: unknown

<sup>172</sup> Eigene Darstellung aufbauend auf VDI Richtlinie 2221.

<sup>173</sup> Vgl. Ulrich und Eppinger (1995).

<sup>174</sup> Vgl. Hess und Summers (2013), S. 257.

unknowns).<sup>175</sup> Im Rahmen dieser Arbeit werden derartige Prototypingaktivitäten, die einen explorativen Charakter zur Gewinnung neuer Einblicke zum Produkt in Entwicklung zeigen als explorative Prototypingaktivitäten definiert, siehe Definition 4. Explorative Prototypingaktivitäten ziehen die Entwicklung neuer Konzepte nach sich, wodurch ein divergierendes Verhalten nach Abbildung 5-2 im Produktentwicklungsprozess angestoßen wird.

### Explorative Prototypingaktivitäten

Def. 4

*Explorative Prototypingaktivitäten fassen Prototypingaktivitäten zusammen, deren Ziele auf das Gewinnen neuer Informationen über das Produkt in Entwicklung ausgelegt sind und zur Erweiterung des Lösungsraums ein divergierendes Verhalten zeigen.*

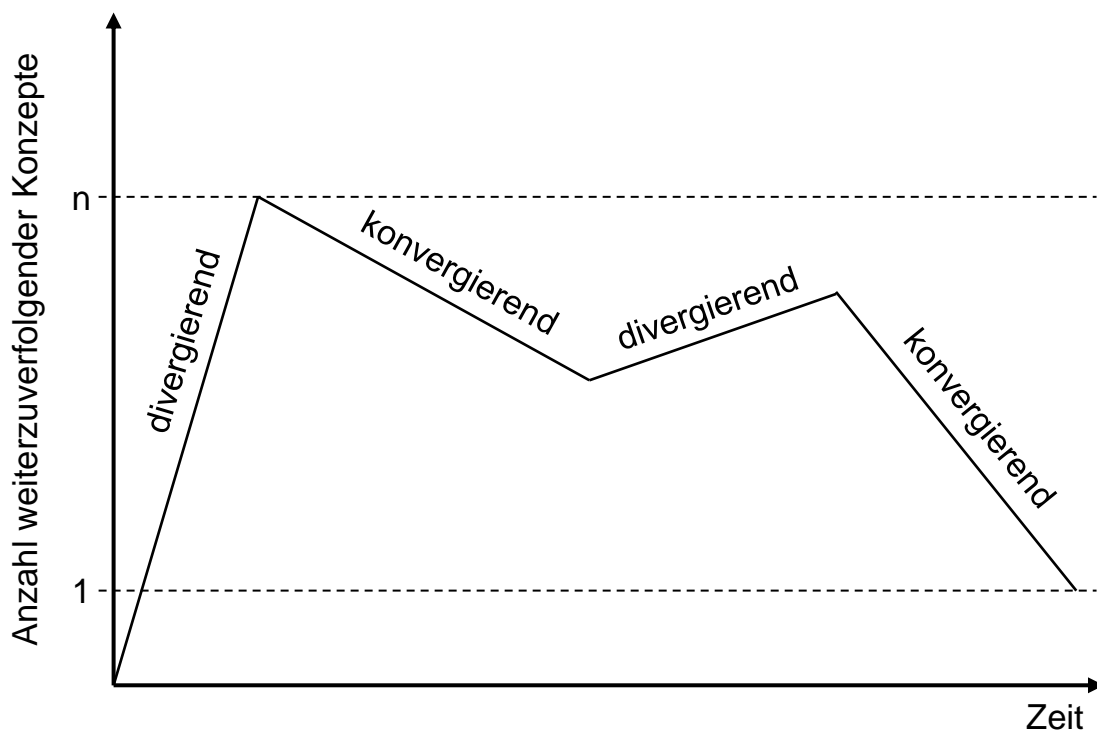


Abbildung 5-2: Visualisierung von divergierendem und konvergierendem Verlauf in der Produktentwicklung<sup>176</sup>

Die zweite Gruppe fasst Prototypingaktivitäten zusammen, deren Ziele sich auf die Verifikation und Validierung von gestellten Anforderungen belaufen. Prototypen dieser Gruppe werden dazu eingesetzt, eine Aussage über die Einhaltung der an das Produkt in Entwicklung gestellten Anforderungen, beispielsweise hinsichtlich deren Funktion oder der Einhaltung der Geometrie, zu überprüfen.<sup>177</sup> Validierende Prototypingaktivitäten sind daher

<sup>175</sup> Vgl. Jensen et al. (2017).

<sup>176</sup> Eigene Darstellung.

<sup>177</sup> Vgl. Albers et al. (2016b), S. 542.

durch Definition 5 beschrieben. Validierende Prototypingaktivitäten zeigen zudem einen konvergierenden Charakter, wie in Abbildung 5-2 visualisiert.

### Validierende Prototypingaktivitäten

Def. 5

*Validierende Prototypingaktivitäten fassen Prototypingaktivitäten zusammen, deren Ziele auf die Einhaltung der an das Produkt in Entwicklung gestellten Anforderungen ausgelegt sind und zeigen damit ein konvergierendes Verhalten.*

Im Vergleich zu Prototypingaktivitäten mit explorativem Charakter werden an Prototypen, die in Prototypingaktivitäten mit validierendem Charakter eingesetzt werden, strengere Anforderungen gestellt. Der explorative Charakter von Prototypingaktivitäten kann hingegen durch die offene Gestaltung von Anforderungen begünstigt werden, da dadurch schneller ein grober Lernerfolg hinsichtlich des Produkts in Entwicklung erzielt werden kann.

## 5.2 Prototypen als Mittel zum Zweck

Um Vergleiche zwischen Produkten und Prototypen durchzuführen, wird zunächst eine Zweck-Mittel-Differenzierung für Prototypen erarbeitet. Diese Differenzierung findet in Anlehnung an die von HEIDEMANN (2001) vorgestellte Zweck-Mittel-Differenzierung für Produkte statt.<sup>178</sup> Die Zweck-Mittel-Differenzierung trägt beispielsweise zur Abstraktion der Aufgabenstellung der prototypischen Entwicklung bei.<sup>179</sup>

Wie im Rahmen des Stands der Forschung in Kapitel 2 beschrieben, trägt der Einsatz von Prototypen im Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung nach Abbildung 2-8 der Beantwortung offener Fragen und damit der Verbesserung der Antizipation bei.<sup>180</sup> Die Verknüpfung zwischen der Antizipation und dem Einsatz von Prototypen soll an dieser Stelle zunächst näher erläutert werden, um die verschiedenen Einflüsse auf die Antizipationsgrundlage darzustellen und die verschiedenen Mittel der Verbesserung dieser Grundlage zu verdeutlichen.

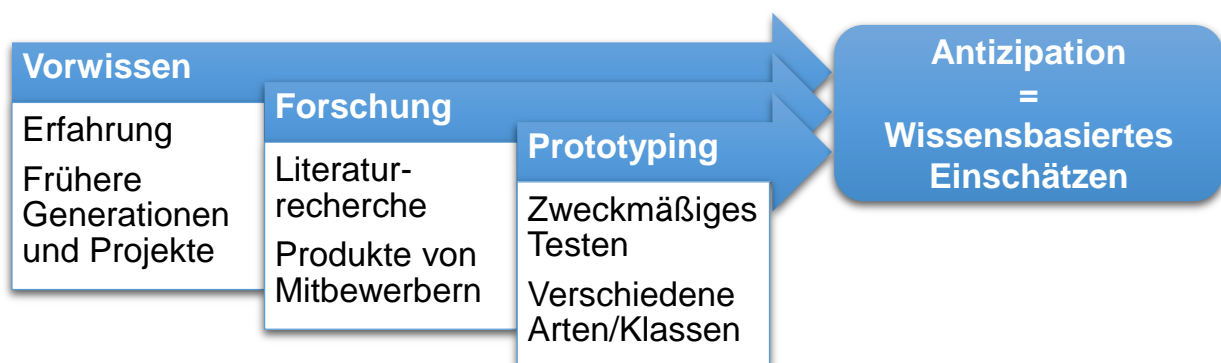


Abbildung 5-3: Wissensquellen die als Basis der Antizipation dienen<sup>181</sup>

<sup>178</sup> Siehe dazu Unterabschnitt 2.4.3

<sup>179</sup> Vgl. Schork und Kirchner (2019), S. 1576.

<sup>180</sup> Vgl. Al-Ghassani et al. (2006), S. 516.

<sup>181</sup> Eigene Darstellung

Unter Antizipation versteht man, beruhend auf dessen lateinischer Abstammung als Zusammensetzung der Wörter *ante* (vorher) und *capere* (nehmen) das Vorwegnehmen beziehungsweise das Vorhersehen einer in der Zukunft liegenden Gegebenheit. Bezogen auf die Produktentwicklung bedeutet dies, dass die Entwickelnden die Auswirkungen ihrer Entscheidungen auf das Produkt und die verschiedenen Prozesse des Produktlebenslaufs während der Entwicklung des Produkts vorhersehen, beziehungsweise abschätzen, müssen. Das Abschätzen erfolgt dabei auf Basis des vorhandenen Wissens, das aus verschiedenen Quellen resultiert. Im Rahmen dieser Arbeit sollen drei dieser Quellen näher betrachtet werden, die in Abbildung 5-3 dargestellt sind.

Die erste Quelle beschreibt das *Vorwissen* und die Erfahrung, die die Entwickelnden im Rahmen ihrer vorangegangenen Tätigkeiten bereits gesammelt haben. Besonders relevant ist dabei das Erfahrungswissen, das in direktem Zusammenhang mit dem Produkt in Entwicklung steht, beispielsweise, wenn bereits eine Vorgängergeneration des Produkts entwickelt wurde. Die *Produktgenerationsentwicklung* stellt dabei ein Paradebeispiel der Verwendung vorhandenen Wissens zur Antizipation der Auswirkungen von Entscheidungen dar.<sup>182</sup> Das Erfahrungswissen kann dabei in implizites, personales, situatives, episodisches und körperliches Wissen aufgeteilt werden.<sup>183</sup> Wenn dieses Wissen jedoch nicht ausreicht, um kritische Entscheidungen, die eine hohe Relevanz für den weiteren Verlauf des Projekts aufweisen, zu treffen, müssen Maßnahmen zur Steigerung der Wissensbasis ergriffen werden.

Die erste Maßnahme – und damit die zweite Quelle der Wissensbasis – ist durch *Forschung* gegeben. Hier stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, beispielsweise die Literaturrecherche zum vorliegenden Problem beziehungsweise zu den nicht mit signifikanter Sicherheit abschätzbaren Zusammenhängen. Eine weitere Möglichkeit stellt der kommunikative Erfahrungsaustausch mit Personen dar, die bereits derartige Probleme lösen konnten. Weiterführend können auch die Produkte von Mitbewerbern analysiert werden, um aus den dabei getroffenen Entscheidungen zu Lernen und die eigene Wissensbasis zu kräftigen.

Sollte auch dies nicht zum gewünschten Ergebnis führen und die Wissensbasis weiter zu gering für eine Entscheidung sein, kann die dritte Quelle – das *Prototyping* – herangezogen werden.<sup>184</sup> Der Einsatz von Prototypen zur Steigerung und Verbesserung der Wissensbasis ist der erste Hinweis auf die Definition des Zwecks, der mit dem Einsatz von Prototypen verfolgt wird. Zur Erfüllung dieses Zwecks stehen den Entwickelnden die in Abschnitt 2.2 klassifizierten Prototypen zur Verfügung, durch die die ebenfalls beschriebenen Ziele erreicht werden können. An dieser Stelle sollen die Ziele auf deren gemeinsamen Aspekt reduziert werden. ULRICH UND EPPINGER (1995) teilen die Ziele in *Lernen*, *Meilensteine*, *Integration* und *Kommunikation* auf. Diese Ziele können jedoch bei genauerer Betrachtung auf das zuerst genannte reduziert werden, da auch bei der Erfüllung von Meilensteinen ein gewisser Lerneffekt eintritt, was ebenso auf die Überprüfung der Integration des Produkts in Entwicklung in dessen spätere Umgebung und Unterstützung der Kommunikation zum Austausch verschiedener Ansichten bezüglich des Produkts in Entwicklung zutrifft. Das Ziel der *Exploration*, entspricht ebenfalls einem Lernprozess um ein besseres Verständnis für das vorliegende Problem zu erhalten. Trotz der unterschiedlichen Ausprägungen der dazu eingesetzten Prototypen werden sie also zur Erreichung eines einheitlichen

---

<sup>182</sup> Vgl. Albers et al. (2017).

<sup>183</sup> Vgl. Turki (2014), S. 42ff.

<sup>184</sup> Vgl. Wall et al. (1992), Albers et al. (2011).

Zwecks verwendet. Auch LEIFER UND STEINERT (2011) vertreten diese Meinung und beschreiben das Ziel des Einsatzes von Prototypen als *Lernen*. Daher kann der Zweck des Einsatzes von Prototypen allgemein als *Erhöhung der Wissensbasis* beschrieben und wie nachfolgend definiert werden:

### Zweck des Einsatzes von Prototypen

Def. 6

*Der Zweck des Einsatzes von Prototypen in der Produktentwicklung ist das Lernen und damit verbunden die Erhöhung der Wissensbasis hinsichtlich des Produkts in Entwicklung.*

Mit dieser Definition des Einsatzzweckes kann die Differenzierung des Zwecks und der Mittel bezüglich des Prototypings in Anlehnung an HEIDEMANN (2001) durchgeführt werden.<sup>185</sup> Der Zweck ist dabei wie beschrieben das *Lernen* und das Mittel ist der jeweils eingesetzte *Prototyp*. Diese Differenzierung ist in Abbildung 5-4 visualisiert. Der Lernprozess transformiert dabei den Anfangszustand, der sich als die *offenen Fragen* der Entwickelnden beschreiben lässt, in den Endzustand, der die Beantwortung dieser Fragen und den damit verbundenen *Wissenszuwachs* darstellt. Die Ein- und Ausgangsgröße ist in diesem Fall die vorhandene Wissensbasis der Entwickelnden.

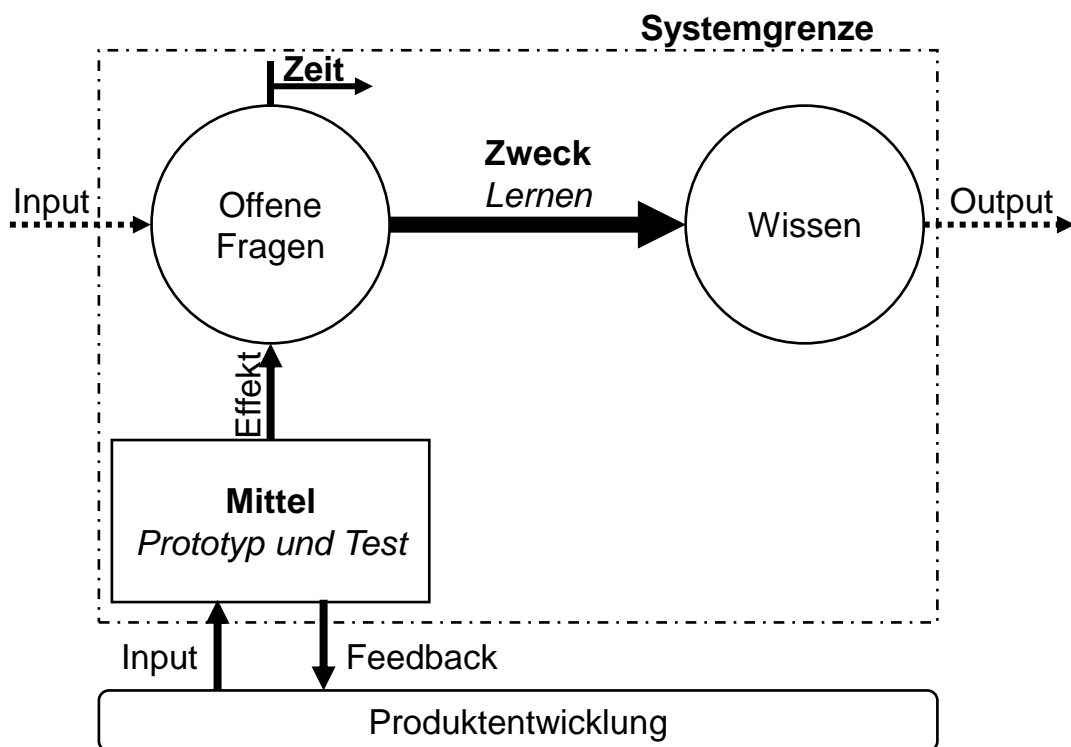


Abbildung 5-4: Zweck-Mittel-Differenzierung beim Einsatz von Prototypen in der Produktentwicklung<sup>186</sup>

Da es sich um einen Prozess nach Definition Def. 2 handelt, läuft dieser in einer gewissen Zeit in einem begrenzten System ab. Als *Mittel* zur Verrichtung des Lernprozesses wird der *Prototyp* samt der Durchführung der dazugehörigen Tests verwendet, wodurch der *Effekt*

<sup>185</sup> Siehe dazu Unterabschnitt 2.4.3

<sup>186</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Heidemann (2001)

auf den Anfangszustand gegeben ist. Die *Entwickelnden* stehen mit dem Prototyp zusätzlich in Verbindung, da beispielsweise eine Energieversorgung als Input gewährleistet werden muss und vom Lernprozess unabhängiges Feedback während der Versuche zurückgemeldet wird.

### 5.3 Das detaillierte Prozessmodell der Prototypen

Die in Abschnitt 5.2 eingeführte Zweck-Mittel-Differenzierung und die damit verbundene Modellierung des Lernprozesses, der mit Hilfe der Prototypen durchgeführt wird, in Abbildung 5-4 dienen nun als Basis zur *detaillierten* Prozessmodellierung des Lernprozesses. Ziel der detaillierten Prozessmodellierung ist es, den Lernprozess und die Einflussfaktoren auf diesen genauer zu modellieren, sodass dieses Modell zur Beschreibung und Dokumentation der Prototypingaktivitäten sowie zur Einschätzung der Aussagekraft der ermittelten Ergebnisse dienen kann. Das *detaillierte Prozessmodell des Lernprozesses*<sup>187</sup> wird ebenfalls in Analogie zu dem von HEIDEMANN (2001) vorgestellten detaillierten Prozessmodell für Produkte erarbeitet und ist in Abbildung 5-5 abgebildet.

#### 5.3.1 Beschreibung des detaillierten Prozessmodells des Prototypings

Das detaillierte Prozessmodell des Prototypings besteht aus *Zuständen, Prozessen, Operatoren, Operanden* und *Nutzern*, mit verschiedenen Formen der Interaktion untereinander. Der *Anfangszustand* und der *Endzustand* sind bereits aus der einfachen Prozessbetrachtung des Lernprozesses in Abbildung 5-4 bekannt. Der Lernprozess wird für die detaillierte Betrachtung nun jedoch aufgespalten in zwei Teilprozesse. Den ersten Teilprozess stellt der Prozess des *Sammelns von Informationen* dar, woran sich der zweite Teilprozess, das eigentliche *Lernen* anschließt. Zwischen diesen Prozessen, beziehungsweise zwischen dem Anfangs- und Endzustand, befindet sich der *Übergangszustand*.

Die Prozesse und Zustände werden durch die *Systemgrenze* eingegrenzt, die die durchgeführte Prototypingaktivität hin zur Umwelt aber auch zu weiteren Prototypingaktivitäten hin abgrenzt. Das detaillierte Prozessmodell beschreibt daher immer genau eine Prototypingaktivität. Die Prototypingaktivität umfasst dabei die Beantwortung einer offenen Frage mit einem dafür entwickelten Prototyp und dem dazugehörigen Versuchsaufbau. Dabei können auch mehrere, nominal identische Prototypen eingesetzt werden, beispielsweise zur Erreichung einer statistischen Relevanz<sup>188</sup> oder wenn verschiedene Designs parallel getestet werden zur Ermittlung der geeignetsten Lösung.<sup>189</sup> Ergeben sich während der Prototypingaktivität neue Fragestellungen, werden diese mit nachfolgenden, von dieser Prototypingaktivität getrennten Prototypingaktivitäten überprüft.

Der Operand, dessen Zustand durch die Prozesse geändert wird, ist die vorliegende Wissensbasis der Produktentwickelnden, die sich von einem niedrigen Niveau im Anfangszustand zu einem höheren Niveau im Endzustand ändert. Die Wissensbasis bezieht sich dabei allgemein auf das vorliegende Wissen zum Treffen von Entscheidungen und umfasst beispielsweise das Wissen hinsichtlich der Machbarkeit, Brauchbarkeit oder Begehrtheit.<sup>190</sup>

<sup>187</sup> Vgl. Schork und Kirchner (2019), S. 1576.

<sup>188</sup> Vgl. Wasserstein und Lazar (2016), S. 129–133.

<sup>189</sup> Vgl. Vgl. Dow et al. (2010), S. 18.

<sup>190</sup> Vgl. Menold (2017).

Zentrales Element dieser detaillierten Modellierung ist die Aufspaltung des Lernprozesses in die zwei Teilprozesse in Verbindung mit der Einführung des Übergangszustands und dem *Post-Processing* Operator, der den Übergangszustand in den Endzustand überführt. Der Hintergrund dessen ist, dass es sich bei den Ergebnissen der Versuche mit dem Prototyp zunächst nur um Ergebnisse handelt, die eine Aussage über den Prototyp zulassen. Diese Informationen müssen daher in einem weiteren Prozess unter Zuhilfenahme des weiteren Operators analysiert werden, um die Übertragbarkeit dieser auf das Produkt in Entwicklung zu prüfen. Dabei müssen die *Unterschiede zwischen Produkt und Prototyp*, beispielsweise die Änderung von Materialien oder Geometrien, berücksichtigt werden. Diese Analyse und Einschätzung wird als der *Effekt* beschrieben, den das Post-Processing auf den Übergangszustand ausübt.

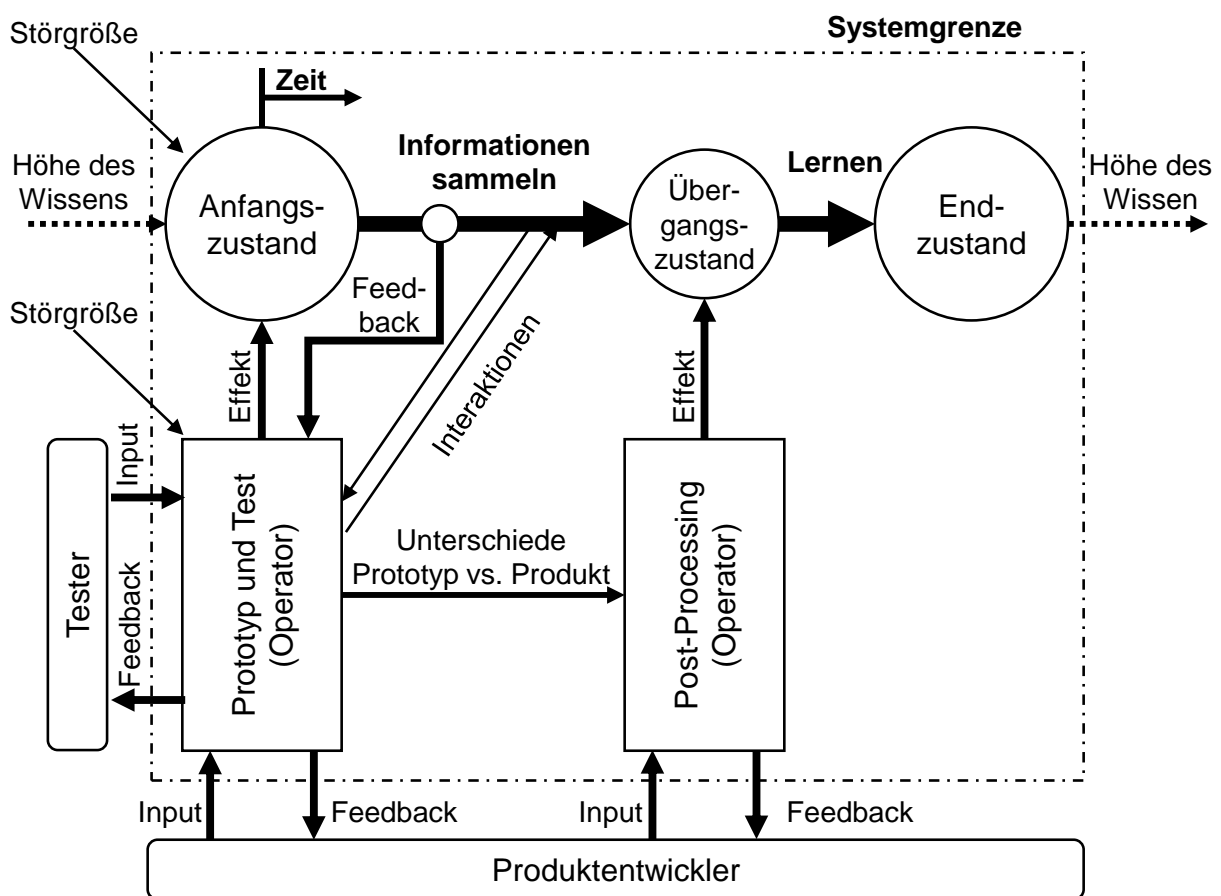


Abbildung 5-5: Das detaillierte Prozessmodell des Prototypings bei der Verwendung von Prototypen im Produktentwicklungsprozess<sup>191</sup>

Eine weitere deutliche Änderung des Aufbaus des detaillierten Prozessmodells des Prototypings im Vergleich zum detaillierten Prozessmodell für Produkte ist die Einführung einer zweiten Nutzergruppe. Bezogen auf das Produkt werden die Nutzer modelliert, die das Produkt später für die Durchführung des Prozesses einsetzen. Da der mit dem Prototyp durchgeführte Prozess in der detaillierten Modellierung für Prototypen der Lernprozess ist, sind die Nutzer des Prototyps die Produktentwickelnden. Zusätzlich dazu existiert eine

<sup>191</sup> In Anlehnung an Schork und Kirchner (2019), S. 1579.

Gruppe von Beteiligten, die mit dem Prototyp direkt interagieren, den Prototyp also ebenfalls nutzen. Die Nutzergruppen stehen dabei mit unterschiedlichen Inputs und Feedbacks in Verbindung mit dem Prototyp. Je nach Nutzergruppe, zum Beispiel Endnutzer, Kunden, Vorgesetzte oder Teammitglieder, resultieren andere Anforderungen an den Prototyp, da verschiedene Nutzergruppen unterschiedlich auf den gleichen Prototyp reagieren können, wodurch die Beantwortung der eigentlichen Frage in den Hintergrund geraten kann.<sup>192</sup> Wenn die Produktentwickelnden auch gleichzeitig die Testenden sind, kann gegebenenfalls auf die Aufteilung verzichtet werden.

Das Modell in Abbildung 5-5 zeigt zudem die Verknüpfungen zwischen dem Prototyp und dem Teilprozess des Sammelns der Information. Das *Feedback* beschreibt die Rückmeldungen während des Sammelns der Informationen an den Prototyp und insbesondere an die damit verknüpfte Durchführung der Tests. Im Rahmen dieses Feedbacks werden positive Auswirkungen auf den Verlauf der Tests und der Art und Weise, wie Testende mit dem Prototyp interagieren, beschrieben. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Testende zuvor keine Erfahrung mit dem Prototyp beziehungsweise mit dem Produkt in Entwicklung und dessen Vorgängergenerationen gemacht haben und bereits während der Durchführung der Versuche deutlich besser mit dem Prototyp umgehen können. Ein weiteres mögliches Beispiel ist die Einführung einer neuartigen Mensch-Maschine-Schnittstelle, deren Eingabemöglichkeiten sich deutlich vom Bekannten unterscheiden. Durch wiederholte Durchführung der Versuche wird die Bedienung intuitiver. Neben dem Feedback existieren jedoch auch negative Auswirkungen des Sammelns der Information auf die Durchführung der Versuche und vom Prototyp ausgehend auf den Sammelprozess. Diese treten dann auf, wenn das Ziel des Prototyps die Beantwortung einer gewissen Fragestellung ist, jedoch die Möglichkeit gegeben ist, den Prototyp in einer Art und Weise zu verwenden, die die Fragestellung umgeht. Dies trägt jedoch auch zur Sammlung von Informationen bei, da derartige Wege der Umgehung im späteren Produkt vermieden werden können.

Über die Systemgrenze hinweg stellt das Modell zudem verschiedene *Störgrößen* auf die Prototypingaktivität dar. Diese wirken im Modell auf den Anfangszustand sowie auf den Prototyp und die damit durchgeführten Versuche. Störgrößen, die auf den Anfangszustand einwirken sind dabei beispielsweise falsche Annahmen und Erwartungswerte hinsichtlich der Resultate, die mit dem Prototyp ermittelt werden. Dies kann dazu führen, dass bei Abweichungen zwischen den gesammelten Informationen und den erwarteten Werten, die im Post-Processing gefundenen werden, falsche Schlüsse hinsichtlich der Beantwortung der gestellten Fragen gezogen werden. Dies betrifft auch Änderungen an Merkmalen und Eigenschaften des Prototyps im Vergleich zum Produkt, die zwar zunächst als nicht ausschlaggebend eingeschätzt wurden, jedoch einen hohen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Werden beispielsweise Materialien von Halterungen von Metall zu Kunststoff geändert, da diese im Versuch nicht mechanisch beansprucht werden, können die thermisch und elektrisch isolierenden Eigenschaften dieser Halterungen das Versuchsergebnis negativ beeinflussen. Speziell diese Änderungen müssen daher im Post-Processing der gesammelten Informationen evaluiert und berücksichtigt werden.

---

<sup>192</sup> Vgl. Deininger et al. (2017).

### 5.3.2 Verifikation des detaillierten Prozessmodells des Prototypings anhand von Beispielen

Um aufzuzeigen, dass das detaillierte Prozessmodell des Prototypings auf bereits durchgeführte Prototypingaktivitäten angewendet werden kann, werden in diesem Abschnitt drei exemplarische Prototypingaktivitäten, die in der Literatur beschrieben sind, mit Hilfe des detaillierten Prozessmodells für Prototypen analysiert.

#### Das City eTaxi

Zunächst wird ein von KAMPKER ET AL. (2016) vorgestellter Prototyp des *City eTaxi*, das als Konzept zur urbanen Mobilität entwickelt wurde, untersucht. Das eTaxi ist ein kleines, dreisitziges Fahrzeug, das mittels eines Elektromotors mit einer Leistung von 15 kW angetrieben wird. Die drei Sitzplätze sollen eine optimale Ausnutzung des verfügbaren Bau- raums ermöglichen und die neuartige Gestaltung der Türen soll sowohl den Fahrenden als auch den Mitfahrenden einen komfortablen Einstieg ermöglichen. Trotz der Neuartigkeit dieses Konzepts im Vergleich zu bestehenden Konzepten, sollen die Fahreigenschaften und -leistungen nicht beeinträchtigt werden. Zur Überprüfung dieser Annahmen wurden daher verschiedene Prototypen entwickelt. Das Konzept und einer der entwickelten Prototypen sind in Abbildung 5-6 zu sehen.



Abbildung 5-6: Konzept und Prototyp des City eTaxis<sup>193</sup>

Die detaillierte Prozessmodellierung wird nun auf den in Abbildung 5-6 rechts gezeigten Prototyp angewendet, der speziell zur Überprüfung des Fahrverhaltens entwickelt worden ist. Das Ergebnis dieser Anwendung zeigt Abbildung 5-7. Die offenen Fragen, die den Anfangszustand beschreiben, sind im Fall dieses Prototyps ob die Fahreigenschaften und das Fahrerlebnis den Anforderungen beziehungsweise Erwartungen entsprechen. Zusätzlich sollten verschiedene Konzepte zum Austausch des Batteriepakets parallel untersucht werden. Der Operator zur Durchführung des Informationssammelprozesses war ein fokussierter, physischer Prototyp, der im Straßentest eingesetzt wird. Bei diesem Prototyp wurde zur Reduktion des Aufwands auf die Verwendung eines Chassis verzichtet und an dessen Stelle lediglich Standardprofile eingesetzt, die eine vergleichbare Steifigkeit zu dem für das Produkt in Entwicklung geplante Chassis aufweisen.<sup>194</sup> Da das Hauptaugenmerk auf

<sup>193</sup> Vgl. Kampker et al. (2016), S. 76.

<sup>194</sup> Vgl. Kampker et al. (2016), S. 77.

der Nutzererfahrung lag, wurden für die Gruppe der Testenden entsprechend die möglichen späteren Nutzenden herangezogen. Der Effekt, den der Prototyp und die durchgeführten Versuche auf den Anfangszustand haben, ist daher die Rückmeldung der Testenden zum Fahrverhalten und Handling des Prototyps. Während der Sammlung der Information konnten bereits Erkenntnisse aus diesem Prozess bei der Durchführung der Versuche einbezogen werden, beispielsweise, welches Konzept zum Batterietausch das vielversprechendste ist. Im Post-Processing mussten dann die Unterschiede zwischen Produkt und Prototyp analysiert werden und insbesondere die Frage geklärt werden, inwieweit der Tausch des Chassis durch Standardprofile zu verlässlichen Ergebnissen hinsichtlich der Fahrbarkeit des Produkts in Entwicklung führte. Der Endzustand ist im Rahmen der Quelle nicht erläutert.

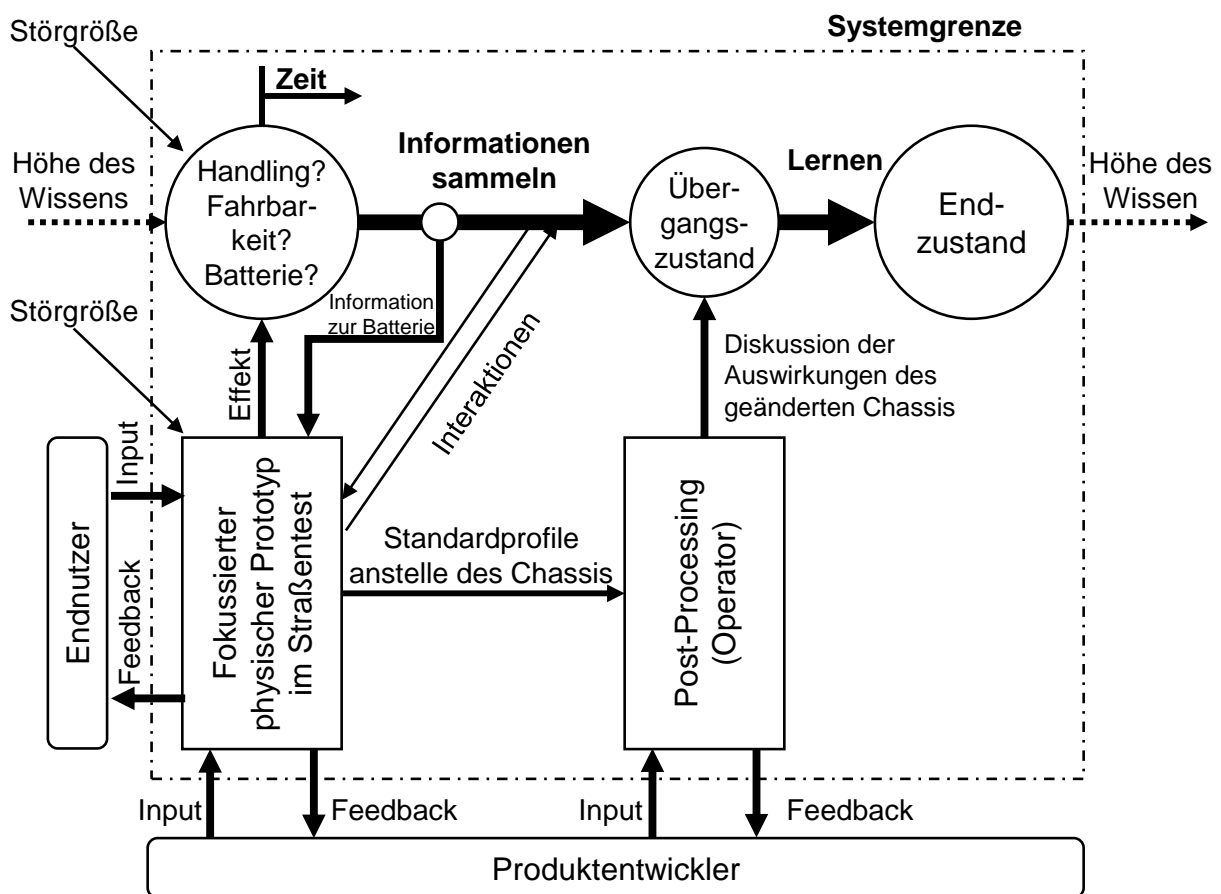


Abbildung 5-7: Detailliertes Prozessmodell der Prototypingaktivität im Rahmen der Entwicklung des City eTaxi<sup>195</sup>

### Der intelligente Reifen

Als zweites Verifikationsbeispiel wird die Veröffentlichung zum intelligenten Reifen von BREGGIO ET AL. (2019) herangezogen. Die Idee hinter dem Produkt in Entwicklung ist die Applikation von Sensorik in einem Reifen zur direkten Überwachung wichtiger Größen zur Überwachung und Kontrolle der Fahrzeugdynamik. Bisher werden diese Größen, die

<sup>195</sup> Eigene Darstellung aufbauend auf der von Kampker et al. (2016) beschriebenen Prototypingaktivität.

beispielsweise für Fahrassistenzsysteme wie ESP (elektronisches Stabilitätsprogramm) oder aktive Bremssysteme genutzt werden, über die Messung von Größen außerhalb des Reifens, zum Beispiel der Drehzahl der Antriebswelle, in Kombination mit Berechnungsmodellen ermittelt. Durch mögliche Störgrößen und Modellunsicherheiten können die berechneten Werte jedoch vom realen Wert abweichen, wodurch eine genaue Regelung erschwert wird. Die Messung der Reifenaufstandskräfte soll hier einen Vorteil bieten. Der eingesetzte Prototyp ist in Abbildung 5-8 gezeigt.

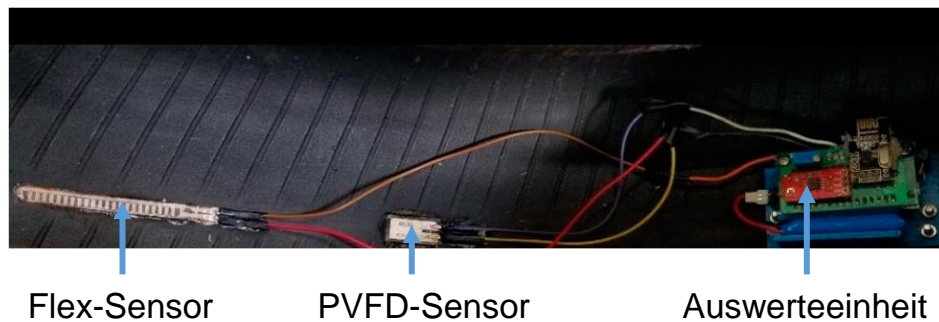


Abbildung 5-8: Prototyp des intelligenten Reifens<sup>196</sup>

Das Konzept des intelligenten Reifens sieht die Applikation eines *Flex Sensors* vor, dessen Widerstand sich in Folge der anliegenden Biegung ändert. Abbildung 5-9 zeigt einen derartigen Sensor. Zusätzlich wird ein Polyvinylidenfluoridsensor (PVFD Sensor) eingesetzt werden. Die Sensoren ermitteln die Verformung des Reifens im Bereich dessen Aufstandsfläche, die sich je nach Fahrsituation, beispielsweise der gefahrenen Geschwindigkeit und radialer Last, ändert. Die Sensordaten sollen mittels drahtloser Verbindung an das nicht rotierende System übertragen werden.



Abbildung 5-9: Exemplarischer Flex-Sensor<sup>197</sup>

<sup>196</sup> Aus Breglio et al. (2019), S. 52.

<sup>197</sup> Bildquelle: SparkFun Electronics aus Boulder, USA - Flex Sensor, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26785975>

Zur Berechnung der erwarteten Ausgangsspannungen des Flex-Sensors wurde ein von GARCIA-POZUELO ET AL. (2019) vorgestelltes Modell zur Beschreibung der Verformung des Reifens im Bereich der Aufstandsfläche verwendet. Die Verwendbarkeit dieses Modells wurde daraufhin mit einem Prototyp untersucht. Für diesen Prototyp wurde der Mikrocontroller auf einer additiv hergestellten Basisplatte im Inneren des Reifens angebracht. Der Prototyp wurde in einem Reifenprüfstand, bestehend aus einem Portalrahmen und einer Achse, die in Verbindung mit einem Hydraulikaktor verschiedene Radiallasten simulieren können und einem Förderband, das als Ersatz der Straße dient. Dieser Aufbau lässt die Aufbringung verschiedener radialer Lasten (1 kN – 2 kN) und verschiedener Geschwindigkeiten (bis zu 20 km/h) zu.

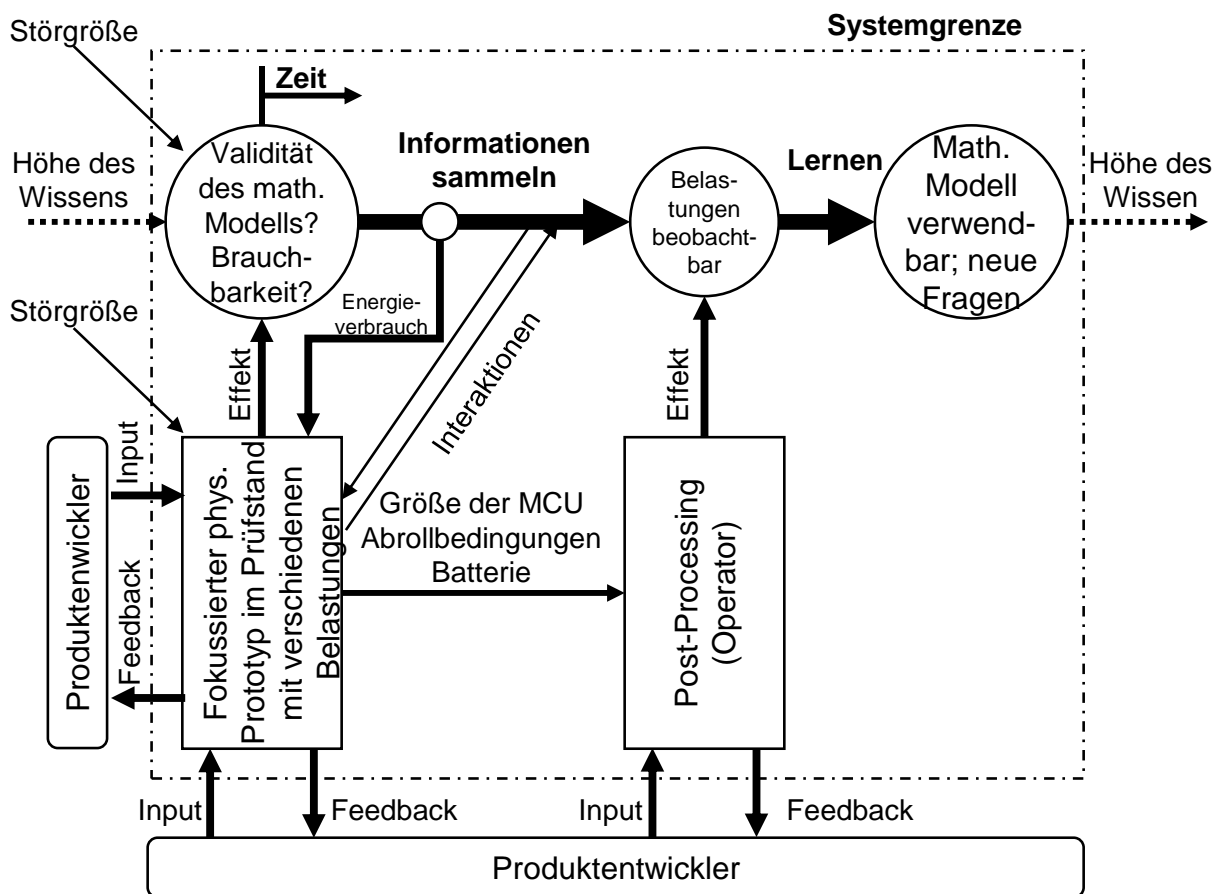


Abbildung 5-10: Detailliertes Prozessmodell der Prototypingaktivität im Rahmen der Entwicklung des intelligenten Reifens<sup>198</sup>

Abbildung 5-10 visualisiert die Anwendung des detaillierten Prozessmodell auf die beschriebene Prototypingaktivität. Der Anfangszustand entspricht in diesem Fall der Frage nach der Validität des mathematischen Modells und der Brauchbarkeit des Produkts in Entwicklung. Der Operator entspricht dem Betrieb des beschriebenen Prototyps in der Versuchsumgebung (siehe oben). Als Testende treten die Produktentwickelnde auf. Direktes Feedback des Informationssammelprozesses an die Durchführung der Versuche findet

<sup>198</sup> Eigene Darstellung aufbauend auf der von BREGGIO ET AL. (2019) vorgestellten Prototypingaktivität.

nach BREGGIO ET AL. (2019) hinsichtlich der Energieaufnahme des Moduls zur drahtlosen Übermittlung der Daten statt.

Die gesammelten Informationen im Übergangszustand zeigen, dass die verschiedenen Lastbedingungen am Reifen detektierbar sind und dass das mathematische Berechnungsmodell für die Anwendung valide erscheint. Im Post-Processing dieser Informationen wurde daraufhin diskutiert, inwiefern diese auch auf das Produkt in Entwicklung beziehungsweise auf die Anwendung des Reifens in der realen Welt zutreffen. Die Unterschiede zwischen dem Prototyp und dem Produkt in Entwicklung betreffen beispielsweise die nicht miniaturisierte Steuereinheit, die zu Unwucht führen kann, die Vernachlässigung verschiedener Abrollbedingungen, zum Beispiel Bremsen, Beschleunigen und Kurvenfahrt sowie das geänderte Batteriekonzept. Nach der Diskussion dieser Einflüsse im Post-Processing ist das Ergebnis des Lernprozesses, dass das mathematische Modell in der Tat valide ist und dass die Brauchbarkeit des Produkts in Entwicklung angedeutet ist, jedoch durch weitere Tests, besonders im realen Fahrversuch, durchgeführt werden müssen.<sup>199</sup>

### **Die sensorintegrierende Federstegkupplung**

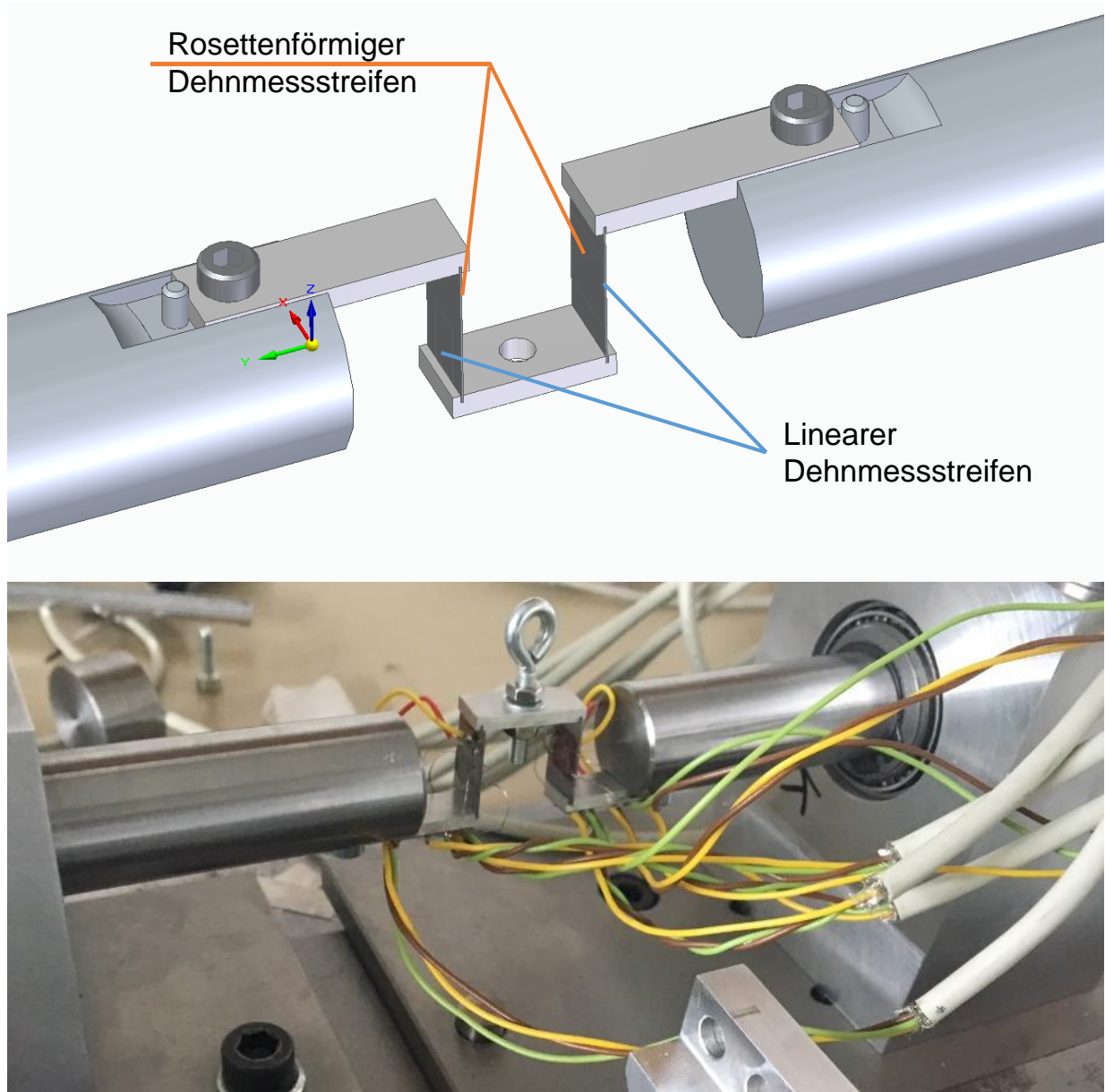
Als abschließendes Verifikationsbeispiel wird eine Prototypingaktivität zum Konzept einer sensor-integrierenden Federstegkupplung, die durch SCHORK UND KIRCHNER (2018b) vorgestellt wurde, mit dem detaillierten Prozessmodell modelliert. Die Kernidee dieses sensorintegrierenden Maschinenelements ist die Messung des Versatzes zweier Wellen, durch die Federstegkupplung verbunden werden. Dazu wird im inneren, nicht verwendeten Bauroum ein Sensorelement integriert, das einen parallelen Kraftpfad mit einer einfachen, definierten Geometrie darstellt. Das Sensorelement besteht aus drei Halterungen und zwei Biegeplättchen, die mit Dehnmessstreifen versehen sind. Durch die einfache Geometrie entsteht ein vergleichsweise geringer Aufwand zur Modellierung und Berechnung der auftretenden Dehnungen infolge des anliegenden Versatzes. Die äußeren Halterungen sind mit den Enden der Federstegkupplung verbunden, wodurch diese den Versatz bewegungstreu auf das Sensorelement übertragen. Basierend auf den an den Biegeplättchen auftretenden Dehnungen kann auf die Höhe und Richtung des ursächlichen Versatzes geschlossen werden. Die analytische Berechnung der auftretenden Dehnungen zeigt dabei einen sinusförmigen Verlauf der Dehnung an den Messstellen, wenn die Kupplung bei konstantem Versatz rotiert wird. Da die Steifigkeit des Sensorelements im Vergleich zur Kupplung gering ist, wird keine Einflussnahme des Sensorelements auf die Funktion der Kupplung erwartet.

Um die Machbarkeit und Brauchbarkeit zu überprüfen, wird ein physischer Prototyp entwickelt, der als Operator im detaillierten Prozessmodell fungiert. Das CAD-Modell und der physische Prototyp sind in Abbildung 5-11 abgebildet. Die vordergründlichen Fragen der Entwickelnden, die durch den Einsatz des Prototyps geklärt werden sollten, waren, ob die Dehnungskurve den erwartet charakteristischen Verlauf aufweist und damit brauchbar zur Ermittlung des anliegenden Versatzes ist und ob durch die Rotation der Kupplung auftretende Zentripetalkräfte einen negativen Einfluss auf das Ergebnis der Versatzmessung haben. Diese Fragestellungen stellen den Ausgangszustand im detaillierten Prozessmodell dar. Bei den Versuchen wurden lediglich einfache Drehungen um 360° durchgeführt, da die Übertragung der Daten kabelgebunden stattgefunden hat. Zur Beantwortung der Frage hinsichtlich der Zentripetalkraft musste diese daher von außen aufgebracht werden. Dazu

---

<sup>199</sup> Vgl. Breglio et al. (2019), S. 57.

wurde eine Masse verwendet, deren Gewichtskraft über ein Seil auf das mittlere Stück der Halterung aufgebracht wurde. Die Masse wurde entsprechend der höchsten erwarteten Zentripetalkraft gewählt, die infolge der Masse des Mittelstücks bei der höchsten erwarteten Drehzahl auftritt.

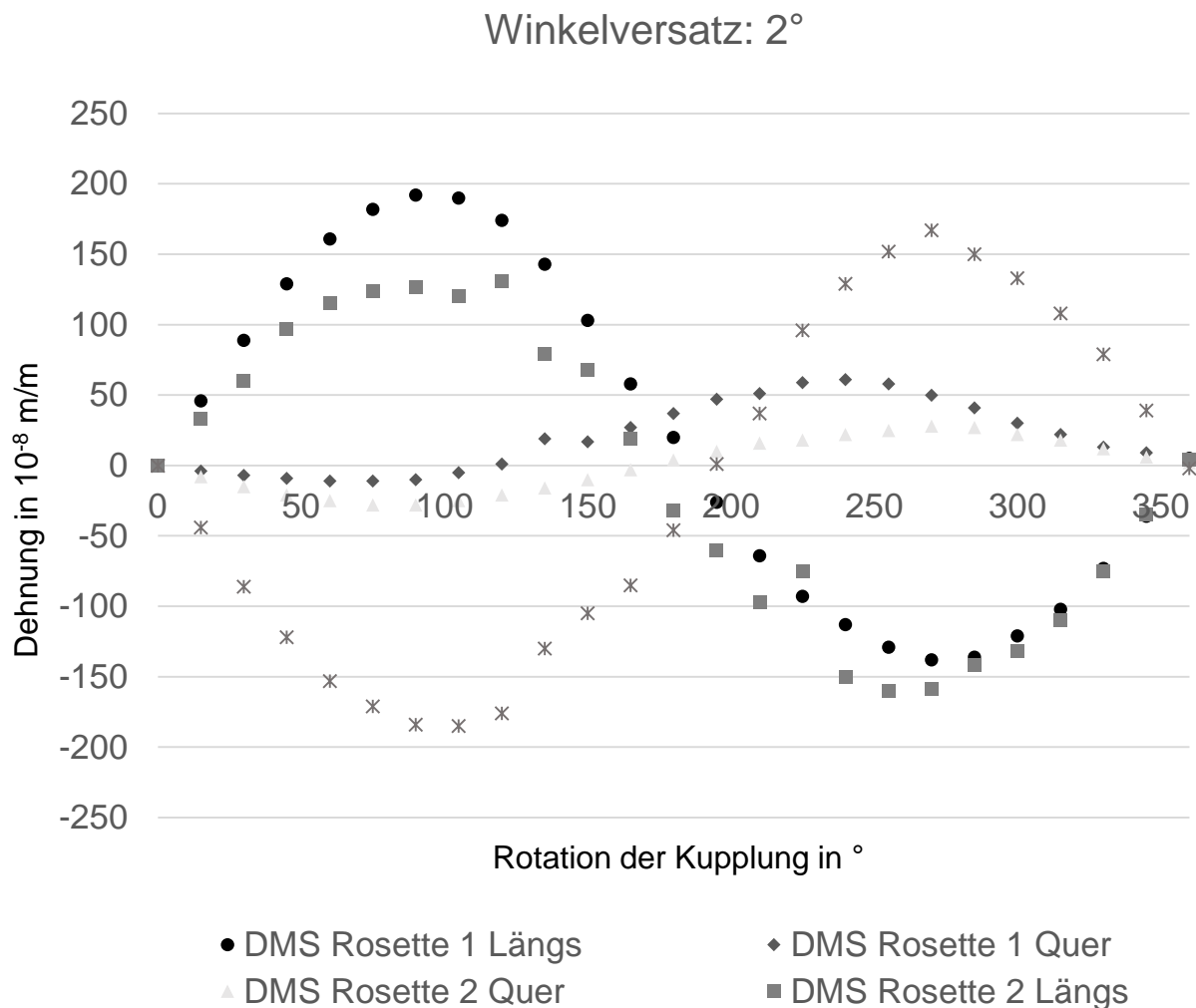


**Abbildung 5-11: CAD-Modell (oben) und physischer Prototyp (unten) der sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>200</sup>**

Die Versuche wurden von den Entwicklern selbst durchgeführt, wobei die Rotationswinkel und Versätze manuell eingestellt wurden. Die Versuchsdurchführung sah das Aufbringen verschiedener Versätze durch axiale, vertikale und angulare Positionsänderung des Lagerbocks einer der Wellen vor. Nach Einstellen eines Versatzes wurden die Wellen um  $360^\circ$  in  $15^\circ$  Schritten rotiert und die Dehnungen zu den einzelnen Rotationschritten

<sup>200</sup> Eigene Darstellung basierend auf Schork und Kirchner (2018b).

aufgezeichnet, woraus sich die Messkurve in Abbildung 5-12 ergab. Diese Messkurve ist Teil der gesammelten Informationen und zeigt eine Übereinstimmung hinsichtlich der Erwartung eines sinusförmigen Verlaufs, jedoch weichen die Werte von den Erwartungswerten ab, was den Übergangszustand darstellt.



**Abbildung 5-12: Gemessene Dehnung der Biegeplättchen des Prototyps der sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>201</sup>**

Ein direktes Feedback während des Sammelns der Informationen war zudem die Erkenntnis, dass die auftretenden Zentripetalkräfte keinen Einfluss auf die gemessene Dehnung haben. Daher wurden die Versuche um diesen Einflussfaktor reduziert, wodurch der Versuchsaufwand reduziert wurde.

Im Übergangszustand erscheint daher auf Basis der gesammelten Information die Machbarkeit des Produkts in Entwicklung negativ, da die ermittelten Dehnungskurven nicht den erwarteten Werten entsprechen. Allerdings müssen zunächst die Änderungen zwischen dem Prototyp und dem Produkt in Entwicklung im Rahmen des Post-Processings in die

<sup>201</sup> Eigene Darstellung.

Analyse der Informationen einbezogen werden. Einer dieser Unterschiede betrifft die Fokussierung des Prototyps auf das Sensorelement und den damit verbundenen Verzicht auf die Federstegkupplung, da kein Drehmoment zwischen den Wellen übertragen werden musste. Jedoch traten unerwartet hohe Schleppmomente aufgrund der Reibung der Wälzlagerungen der Wellen auf. Diese sind im detaillierten Prozessmodell als Störgrößen auf den Operator – den Prototyp – dargestellt. Die Störgröße hat dabei einerseits Einfluss auf die Versuchsdurchführung, die aufgrund der simultanen Rotation der Wellen erschwert wird und zusätzlich auf die gesammelten Informationen, da eine Verdrehung des Sensorelements auftreten kann, die zu störenden Dehnungen der Biegeplättchen führt. Das detaillierte Prozessmodell dieser Prototypingaktivität ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

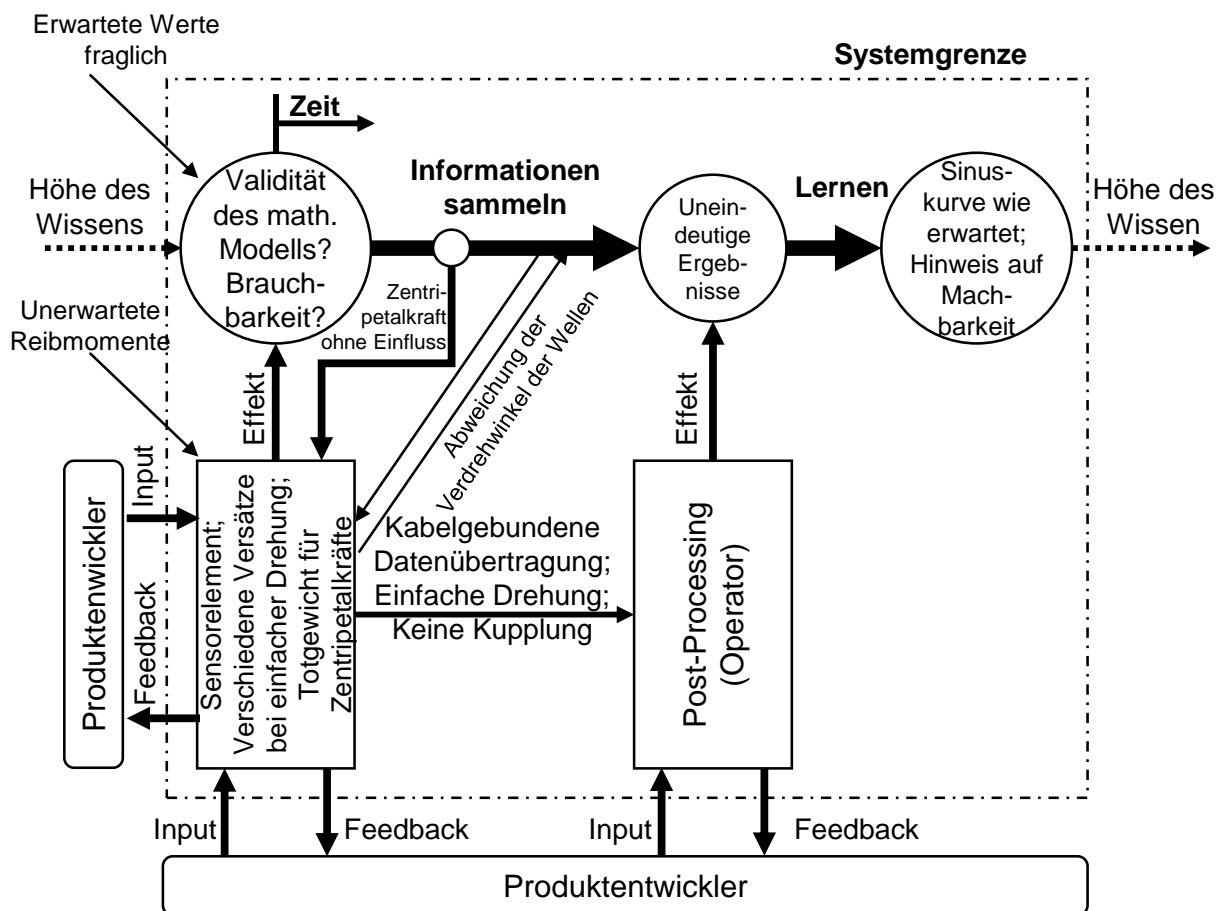


Abbildung 5-13: Detailliertes Prozessmodell der Prototypingaktivität zur sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>202</sup>

Die gesammelten Informationen lassen im Übergangszustand zunächst keine genaue Beurteilung der Machbarkeit des Konzepts zu. Durch den Einbezug der Unterschiede zwischen Prototyp und Produkt in Entwicklung können jedoch einige Abweichungen zwischen den erwarteten und den erhaltenen Messergebnissen erklärt werden. Es kann daher angenommen werden, dass der Versatz wie vorgesehen anhand der gemessenen Dehnungskurve ermittelt werden kann, da zumindest der sinusförmige Verlauf mit den Maxima und

<sup>202</sup> Eigene Darstellung aufbauend auf der von Schork und Kirchner (2018b) vorgestellten Prototypingaktivität.

Minima abhängig von der Art und Richtung des Versatzes vorliegt. Besonders einzelne Abweichungen der Dehnungskurve können auf den Verzicht der Federstegkupplung zurückgeführt werden. Der erreichte Endzustand ist damit mit der teilweisen Beantwortung und dem entsprechenden Lernen über das Produkt in Entwicklung erreicht.

Die vorgestellten Beispiele weisen auf die generelle Anwendbarkeit des detaillierten Prozessmodells zur Beschreibung von bereits durchgeführten Prototypingaktivitäten hin. Jedoch sind die beispielhaft herangezogenen Prototypingaktivitäten im Rahmen der Veröffentlichungen des City eTaxis und des intelligenten Reifens nur oberflächlich beschrieben. Daher können nicht alle Elemente des detaillierten Prozessmodells sowie der Endzustand genau beschrieben werden. Die Veröffentlichungen fokussieren sich zumeist auf die Beschreibung des Produkts in Entwicklung und die Überlegungen, die zu dessen Entwicklung geführt haben. Dagegen wird die Entwicklung der jeweiligen Prototypen nicht genauer erläutert. Daher wird die Anwendbarkeit des detaillierten Prozessmodells auf derartige Beispiele erschwert und der Raum für Interpretationen bleibt offen. Auf der anderen Seite zeigt das Beispiel der Prototypingaktivität im Rahmen der Entwicklung der sensorintegrierenden Federstegkupplung eine vereinfachte Anwendung, da das Modell von den Entwickelnden selbst angewendet wurde.

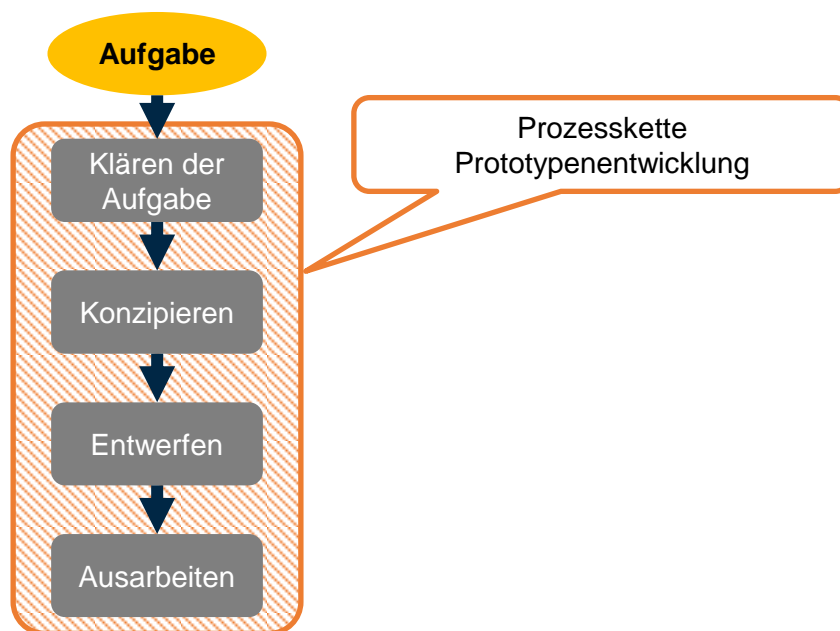
Die Anwendung des detaillierten Prozessmodells auf vergangene und abgeschlossene Prototypingaktivitäten erscheint hilfreich zur Dokumentation der Prototypingaktivitäten und um die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen zu verbessern. JENSEN ET AL. (2015) kommen zu dem Schluss, dass es herausfordernd ist, die aus den Prototypingaktivitäten erhaltenen Erkenntnisse auch im Nachhinein nachvollziehbar und erklärbar zu dokumentieren. Jensen et al. (2015, S. 10) Dies kann durch die Anwendung des detaillierten Prozessmodells verbessert werden, da die zu den Schlüssen führenden Einflussfaktoren im Modell verortet werden können. Darüber hinaus kann und sollte das detaillierte Prozessmodell bereits zu Beginn der Prototypingaktivität im Rahmen der Entwicklung des Prototyps eingesetzt werden, um Einflüsse auf den Lernprozess zu identifizieren und gegebenenfalls zu vermeiden. Die Anforderungen an den Prototyp können daraufhin angepasst werden. Das detaillierte Prozessmodell hat dabei den Charakter einer Checkliste, durch den der Fokus der Entwickelnden Schritt für Schritt auf die Teilprozesse und die Verknüpfungen im Rahmen der Prototypingaktivität gelegt wird. Die Betrachtung der möglichen Unterschiede zwischen dem Prototyp und dem Produkt in Entwicklung kann an dieser Stelle durchgeführt werden und eine Entscheidung getroffen werden, welche Vereinfachungen am Prototyp im Vergleich zum Produkt in Entwicklung zulässig sind, ohne dass die Aussagekraft der Prototypingaktivität beeinträchtigt wird.

#### **5.4 Das abgestimmte Modell der Prototypen-, Produkt und Prozessentwicklung**

Abschnitt 5.3 beschreibt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen bezogen auf die Prozessmodellierung des jeweils verfolgten Zwecks. Aufbauend auf dem Verständnis, dass Prototypen als Operatoren zur Durchführung des Informationssammelprozess genutzt wird in diesem Abschnitt ein Modell zur Entwicklung von Prototypen vorgestellt. Dazu wird das von SCHORK UND KIRCHNER (2018a) beschriebene Modell im Detail erklärt und erweitert. Im Rahmen dieser Erweiterung wird die Benennung des Modells von „Modell der ganzheitlichen Prototypen- und Prozessentwicklung“ hin zu „abgestimmtes Modell der Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung“ (aP<sup>3</sup>EM) geändert. Dadurch sollen der Umfang und Fokus des Modells verdeutlicht werden. Im

Vergleich zur *Ganzheitlichkeit* der Produktentwicklung, ist das Ergebnis der Prototypenentwicklung im Allgemeinen eine reduzierte Abbildung des Produkts in Entwicklung, die beispielsweise einzelne Funktionen, Eigenschaften oder Merkmale des Produkts in Entwicklung umfasst. Daher kann argumentiert werden, dass die Prototypenentwicklung nicht *ganzheitlich* sein kann, da stets gewisse Faktoren außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen und im Rahmen der Entwicklung des Prototyps nicht berücksichtigt werden. Die Umbenennung zum aP<sup>3</sup>EM soll die Abstimmung der Prototypenentwicklung mit der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung<sup>203</sup> verdeutlichen, da möglichst alle Einflüsse aus den Änderungen der Prozesse des Produktlebenszyklus bei der Entwicklung des Prototyps und besonders der Interpretation der mit dem Prototyp gesammelten Informationen berücksichtigt werden müssen.

Das abgestimmte Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklungsmodell basiert auf dem ganzheitlichen Modell der Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE), das ursprünglich zur Betrachtung der Umweltauswirkungen entwickelter Produkte vorgestellt wurde.<sup>204</sup> Das aP<sup>3</sup>EM stellt dabei in Analogie die Verknüpfung zwischen den Prozessketten „Prototypenentwicklung“ und „Prototypenlebenslauf“ her. Zur Verdeutlichung der Unterschiedlichkeit des aP<sup>3</sup>EM zum GPPE in Abbildung 2-8 werden diesen mit unterschiedlichen Hintergrundfarben und -mustern belegt.



**Abbildung 5-14: Prozesskette der Prototypenentwicklung, beginnend mit der vorliegenden Aufgabe und der Klärung dieser hin zur Ausarbeitung des detaillierten Entwurfs<sup>205</sup>**

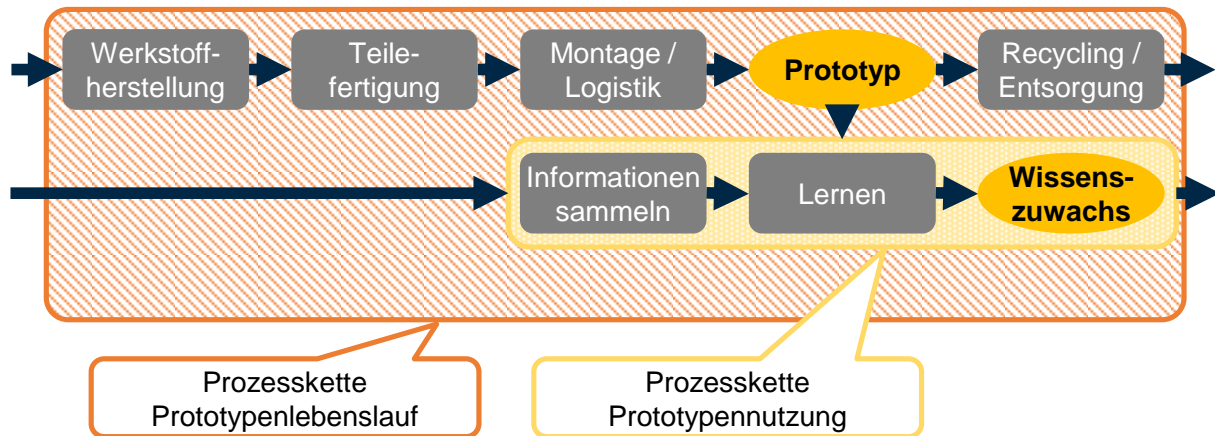
Der Prototypenentwicklungsprozess, der in Abbildung 5-14 abgebildet ist, beginnt mit der vorliegenden Aufgabenstellung hinsichtlich der Entwicklung eines Prototyps. Diese Aufgabe beruht dabei vorrangig auf den Zielen, die mit Hilfe des Einsatzes der Prototypen erreicht werden sollen und in Abschnitt 2.2 erläutert sind. Diese sind jedoch zumeist oberflächlich gehalten, weshalb im Rahmen der *Klärung der Aufgabenstellung* das genaue Ziel

<sup>203</sup> Siehe dazu Unterabschnitt 2.4.2

<sup>204</sup> Vgl. Grüner (2001); Birkhofer et al. (1998).

<sup>205</sup> Eigene Darstellung basierend auf Grüner (2001); Birkhofer et al. (1998).

definiert werden muss. Zur Identifikation des Ziels kann beispielsweise das in Abschnitt 5.3 vorgestellte detaillierte Prozessmodell eingesetzt werden. Andere Techniken und Methoden, wie beispielsweise das Brainstorming und Diskussionen zwischen den Entwickelnden und am Entwicklungsprozess Beteiligten können auch zum Klären der Aufgabenstellung beitragen.



**Abbildung 5-15: Prozesskette des Prototypenlebenslaufs, beginnend bei der Werkstoffherstellung bis hin zum Recycling beziehungsweise Entsorgung. Die Nutzungsphase des Prototyps verläuft dazu parallel.<sup>206</sup>**

Im Anschluss an die Klärung der Aufgabenstellung folgen in Analogie zur Produktentwicklung die Prozesse „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“. Da die Prototypenentwicklung im Allgemeinen parallel zur Produktentwicklung verläuft, können Ergebnisse aus den entsprechenden Prozessen der Produktentwicklung auch zur Entwicklung des Prototyps genutzt werden. So können die Ergebnisse der Konzeptentwicklung des Produkts, zum Beispiel der morphologische Kasten, erneut herangezogen werden, um Teillösungen gewisser Teilfunktionen zu substituieren, wodurch der Umfang des Prototyps – insbesondere der funktionelle Umfang – optimiert werden kann. Der *Umfang des Prototyps* ist dabei aufbauend auf den in Abschnitt 2.2 aufgezeigten Einflussfaktoren im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert:<sup>207</sup>

### Umfang des Prototyps

*Unter dem Umfang des Prototyps werden die Anzahl an Komponenten und Gestaltelementen, abgebildeten Funktionen sowie gestellten Anforderungen zusammengefasst.*

Def. 7

Am Beispiel des intelligenten Reifens in Unterabschnitt 5.3.2 wurde beispielsweise die zur Teilfunktion „Energie speichern und bereitstellen“ vorhandene Teillösung der Knopfzelle durch eine deutlich größere Lithiumionenbatterie ersetzt, um den Aufwand zur Optimierung des Strombedarfs des Prototyps zu reduzieren.<sup>208</sup>

<sup>206</sup> Eigene Darstellung.

<sup>207</sup> Insbesondere die Ergebnisse der Arbeiten von Ulrich und Eppinger (1995), Walker et al. (2002) und Sauer et al. (2008) sind ausschlaggebend für diese Definition.

<sup>208</sup> Vgl. Breglio et al. (2019), S. 52

Auch die Prozesskette des Prototypenlebenslaufs kann in Analogie zur Prozesskette des Produktlebenslaufs modelliert werden, wie in Abbildung 5-15 dargestellt. Für physische Prototypen werden ebenso wie für physische Produkte Werkstoffe benötigt, die zunächst hergestellt werden müssen. Die Produktion des Prototyps umfasst anschließend die Fertigung der Einzelteile und deren Montage, wobei der Montageprozess entfällt, wenn es sich beim Prototyp um lediglich ein einzelnes Bauteil handelt. Dies ist beispielsweise beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren der Fall.<sup>209</sup>

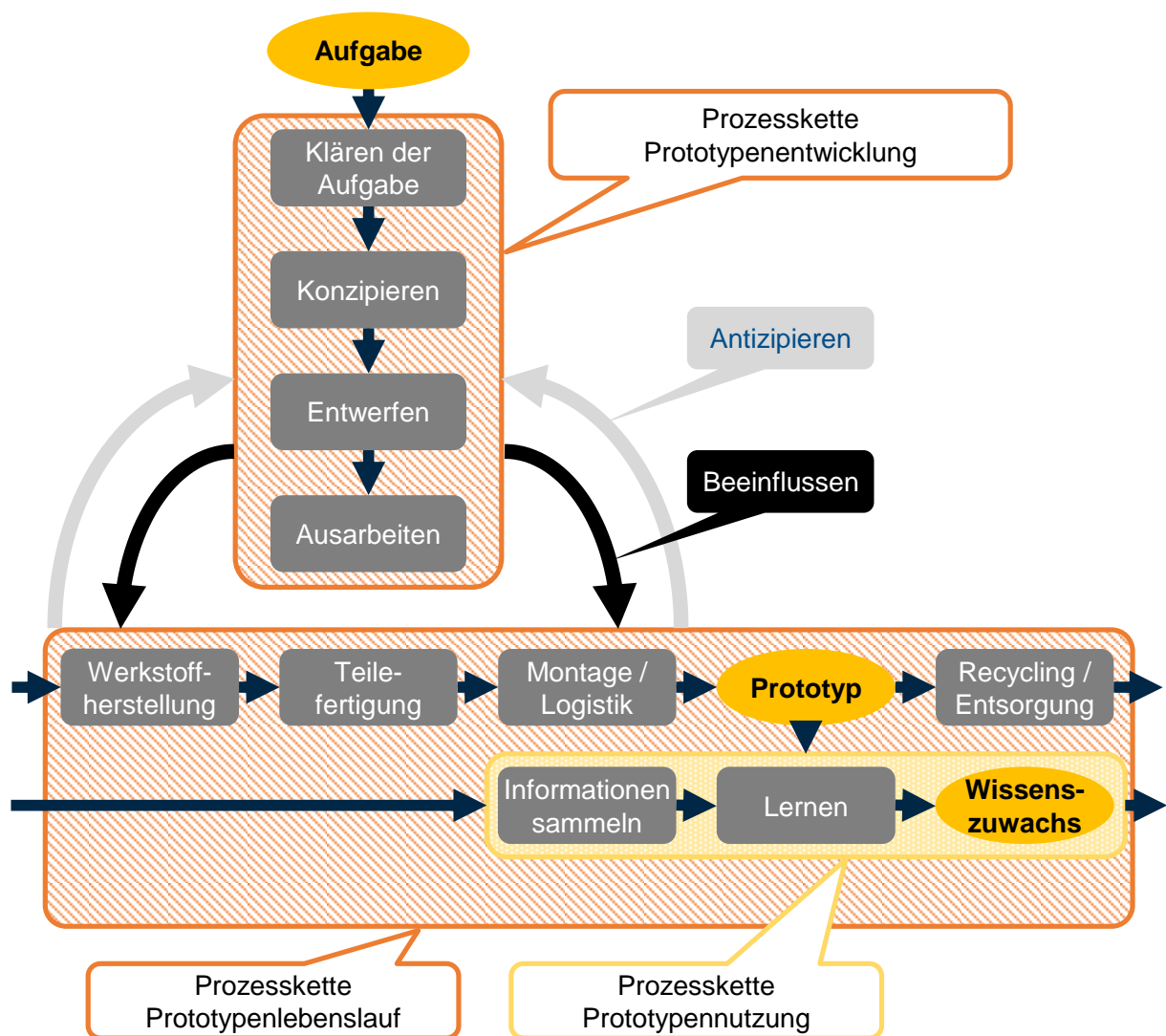


Abbildung 5-16: Das abgestimmte Modell der Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung<sup>210</sup>

Nach der Produktion starten die Nutzungsprozesse des Prototyps beziehungsweise Produkts, an die sich die Entsorgung beziehungsweise das Recycling anschließen. Ein Hauptunterschied zwischen der Modellierung der Lebensläufe des Produkts und des Prototyps besteht in der Modellierung der jeweiligen Nutzungsprozesse. Bezüglich des Produkts wird

<sup>209</sup> Vgl. Gibson et al. (2010), S. 56.

<sup>210</sup> Eigene Darstellung aufbauend auf Schork und Kirchner (2018a).

auf eine genauere Modellierung verzichtet, wohingegen die Nutzungsprozesse des Prototyps in Anlehnung an die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Teilprozesse detaillierter modelliert werden. Zusätzlich wird das am Ende der Nutzungsphase des Prototyps vorliegende Ergebnis, der Wissenszuwachs, ebenfalls im Modell aufgegriffen. Dadurch wird die Wichtigkeit dieser Teilprozesse verdeutlicht.

Zwischen den Prozessketten der Entwicklungen und der Lebensläufe werden im ganzheitlichen Modell der Produkt- und Prozessentwicklung sowie im aP<sup>3</sup>EM zwei Haupteinflüsse dargestellt. Dabei handelt es sich um die „Antizipation“ und das „Beeinflussen“, wie in Abbildung 5-16 gezeigt.

Auf den Begriff der Antizipation im Rahmen der Produktentwicklung wird bereits in Abschnitt 5.2 detailliert eingegangen. Antizipiert werden dabei beispielsweise die Auswirkungen von Entscheidungen der Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit und den ökologischen Einfluss des Produkts.<sup>211</sup> Bezogen auf die Prototypenentwicklung stehen jedoch andere Aspekte im Fokus der Antizipation, beispielsweise inwiefern sich die Änderungen am Produktlebenslauf auf die Validität und Aussagekraft der prototypischen Versuche auswirken. Als Beispiel kann die Entwicklung eines Prototyps eines mittels Spaltprofilieren<sup>212</sup> herzustellenden Integralprofils gegeben werden, wobei der Prototyp durch konventionelle Fertigung mittels Strangpressens hergestellt werden soll. Der Strangpressprozess sowie ein damit hergestelltes Hohlraumprofil sind in Abbildung 5-17 abgebildet.

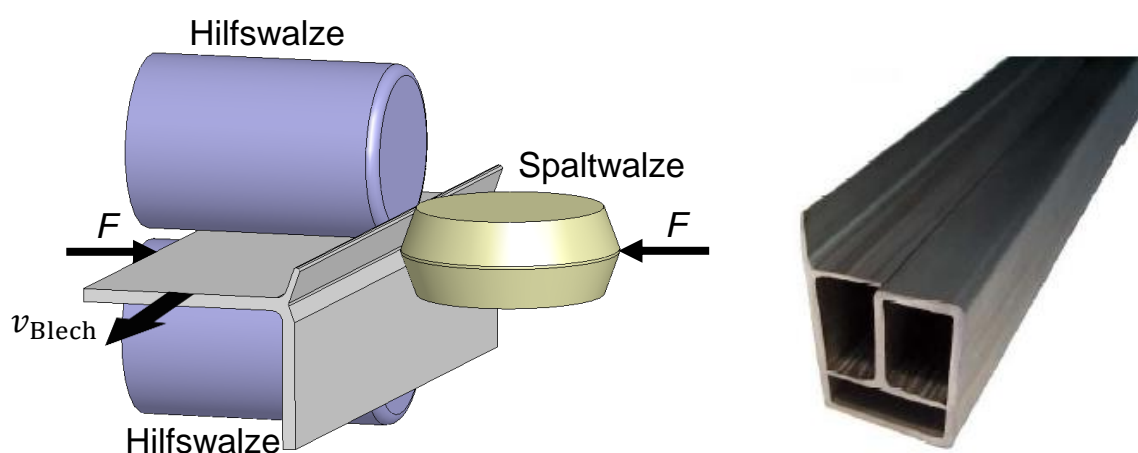


Abbildung 5-17: Fertigungsprozess beim Spaltprofilieren (links) und gefertigtes Hohlraumprofil (rechts)<sup>213</sup>

Durch die beim Spaltprofilieren eingebrachten verfahrensinduzierten Eigenschaften<sup>214</sup> in Form von höherbelastbaren kaltverfestigten Bereichen können die Ergebnisse der prototypischen Tests bei geändertem Fertigungsverfahren nur unzureichend auf das Profil in Entwicklung übertragen werden. Aussagen hinsichtlich der Belastbarkeit und der Lebensdauer der Oberfläche, wenn das Profil als Linearführung verwendet wird, können durch

<sup>211</sup> Vgl. Grüner (2001), S. 121.

<sup>212</sup> Vgl. Groche et al. (2007), S. 249.

<sup>213</sup> Vgl. Gramlich (2013), S. 88 in Anlehnung an Bruder (2011), S. 16 und Groche et al. (2012), S. 87.

<sup>214</sup> Vgl. Gramlich (2013), S. 90.

die fehlenden positiv wirkenden verfahrensinduzierten Eigenschaften des Spaltprofilierens nicht anhand der Versuche mit dem stranggepressten Prototyp getroffen werden.

Ein weiteres Beispiel kann durch die von KUKKO-LIEDES ET AL. (2019) vorgestellte Studie zur Entwicklung und dem Einsatz von Prototypen eines Lebensmittels, in diesem Fall Eiscreme, herangezogen werden. In diesem Fall wurde das Rezept im Vorhinein in kleinen Mengen prototypisch getestet mit dem Ergebnis, dass alle Anforderungen an den Geschmack erfüllt sind. Jedoch wurden dabei die durch die Herstellung in größeren Mengen auftretenden Einflüsse auf den Produktionsprozess und damit auf das Produkt außer Acht gelassen, wodurch das mittels Prototypen entwickelte Rezept nicht zur Massenfertigung verwendet werden konnte.<sup>215</sup> Dies hätte vermieden werden können, wenn die Fertigungseinflüsse bereits bei der Entwicklung der Prototypen analysiert und diskutiert worden wären.

In Bezug zur *Beeinflussung* des Lebenslaufs lassen sich ähnliche Vergleiche zwischen Produkten und Prototypen ziehen. Die Entscheidungen, die Entwickelnde hinsichtlich des vom Prototyp abzubildenden Umfangs treffen, werden den Prototypenlebenslauf beeinflussen. Die in vorgestellten geometrischen Prototypen<sup>216</sup>, wie zum Beispiel Designstudien, können mit anderen Materialien hergestellt werden, beispielsweise in Form von Tonmodellen zur Modellierung eines Fahrzeugs und der besseren Vermittlung des Gefühls für dessen Proportionen und Lichteffekte verschiedener Designmerkmale. Durch die Entscheidung über die Verwendung dieser Werkstoffe beeinflussen Entwickelnde zunächst den Werkstoffherstellungsprozess aber auch den gesamten Produktions- und Entsorgungsprozess. Dadurch können Fragen hinsichtlich dieser Prozesse nicht mit dem Prototyp beantwortet werden. Jedoch haben Entwickelnde die Möglichkeit, durch Anpassung der Prototypenlebenslaufprozesse an das Ziel der Prototypenentwicklung den Aufwand der Prototypingaktivität zu optimieren. Bezogen auf das Beispiel der Designstudie des Fahrzeugs bedeutet dies, dass keine Aufwände hinsichtlich der Bereitstellung und Verarbeitung von Metallen aufgebracht werden müssen, wodurch auch entsprechende Fertigungsanlagen nicht benötigt werden. Ähnliches gilt für Funktionsprototypen, die speziell zur Beantwortung einzelner Fragen hinsichtlich der Funktion entwickelt werden, wodurch der Fertigungsaufwand reduziert wird, jedoch auch im Nachhinein keine Aussage hinsichtlich dieses Aufwands und der Auswirkungen der Fertigung auf die Funktion getroffen werden kann.

Das durch die Entwicklung und den Einsatz des Prototyps gewonnene Wissen wird anschließend im Produktentwicklungsprozess verwendet und dient daher, wie in Abbildung 5-3 gezeigt, der Unterstützung der Antizipation. Der Übertrag dieses Wissens und die damit verbundenen Verknüpfung zwischen der Prototypenentwicklung und der Produktentwicklung wird in Abbildung 5-18 verdeutlicht. Die Ziele der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung sind auf der einen Seite, alle Änderungen zwischen dem Produkt in Entwicklung und dessen Prototypen bezüglich der verschiedenen Lebenslaufprozesse zu betrachten und diese Unterschiede in die Beurteilung der Aussagekraft der mittels Prototypen erhaltenen Informationen einzubeziehen. Die Auswirkungen der Änderungen können dabei im Post-Processing der gesammelten Informationen, wie im detaillierten Prozessmodell in Abbildung 5-5 gezeigt, einbezogen werden. Auf der anderen Seite dient das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung der

---

<sup>215</sup> Vgl. Kukko-Liedes et al. (2019), S. 1151.

<sup>216</sup> Siehe Abschnitt 0

Relativierung des zusätzlichen Aufwands zur Entwicklung von Prototypen, indem die verringerten Aufwände der einzelnen Lebenslaufprozesse herangezogen werden. Aufbauend auf diesen Zielen kann das aP<sup>3</sup>EM zur Identifikation und Festlegung von Anforderungen an Prototypen genutzt werden.<sup>217</sup>

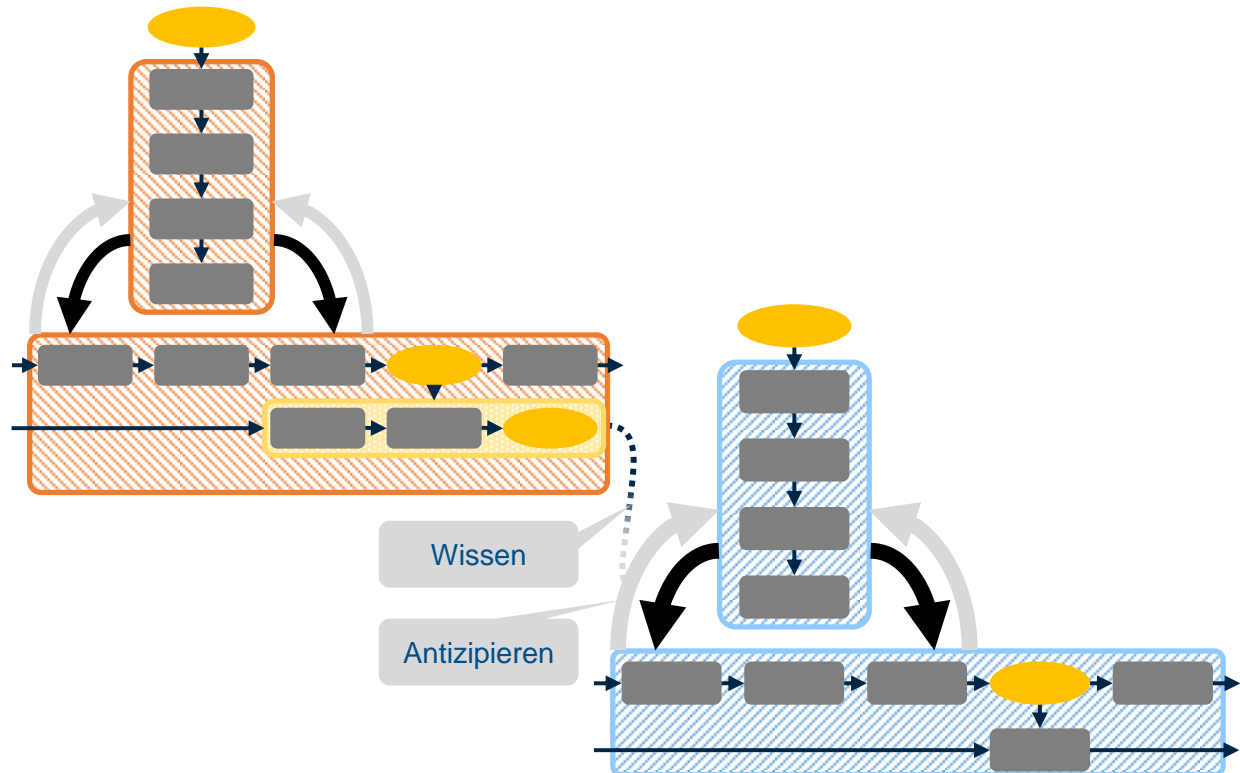


Abbildung 5-18: Schematische Verdeutlichung des Übertrags des mittels Prototypen (rot hinterlegt) erhaltenen Wissens auf die Antizipation im Rahmen der Produktentwicklung (blau hinterlegt)<sup>218</sup>

## 5.5 Die Unterschiede zwischen Produkt und Prototyp basierend auf der Produktmodellpyramide

Um die Unterschiede zwischen dem Produkt in Entwicklung und dessen Prototypen zu beschreiben, bietet sich der Vergleich mittels der Produktmodellpyramide an. Das Ziel dieser Beschreibung ist das Legen der Grundlage zur Bewertung der Aussagekraft der durch den Einsatz der Prototypen gesammelten Informationen und der Verlässlichkeit hinsichtlich der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf das Produkt in Entwicklung.

Die Produktmodellpyramide nach KIRCHNER (2020)<sup>219</sup> wird dazu mit dem von ALBERS ET AL. (2015) im Rahmen der Produktgenerationsentwicklung<sup>220</sup> beschriebenen Ansatz kombiniert, dass neue Produkte über die Menge an *Übernahmevariationen*, *Gestaltvariationen*

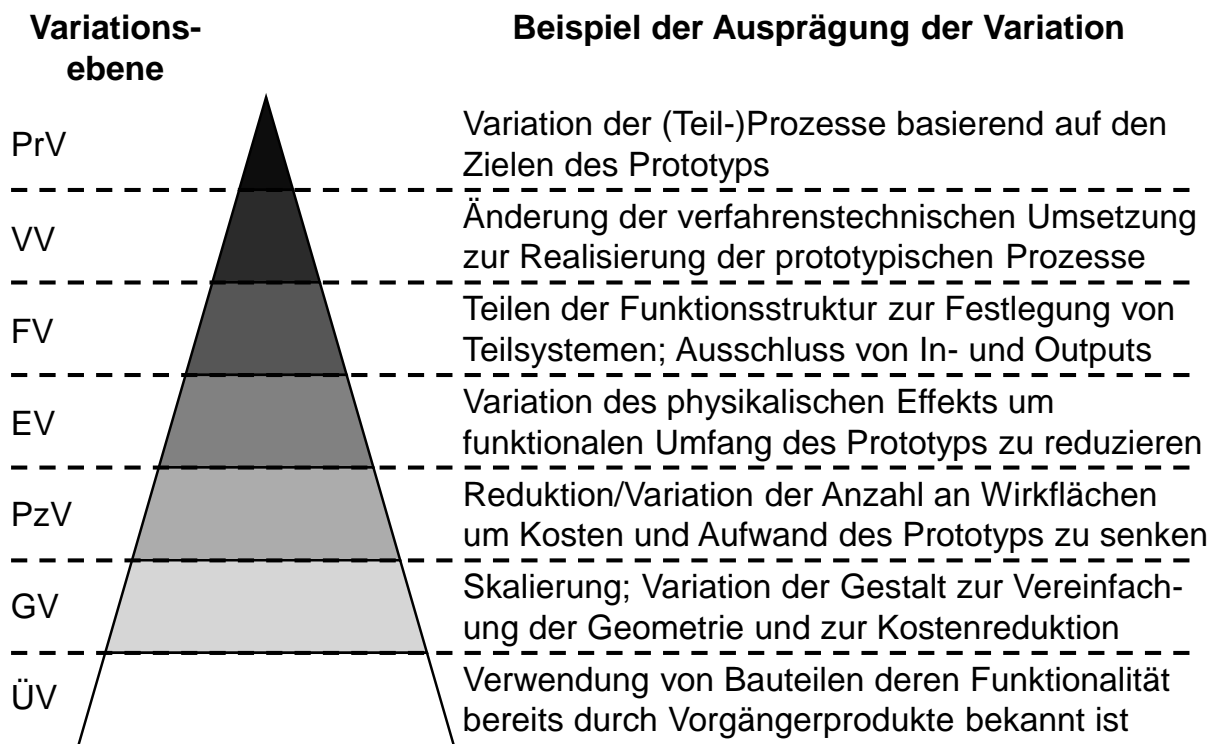
<sup>217</sup> Vgl. Schork und Kirchner (2018a).

<sup>218</sup> Eigene Darstellung.

<sup>219</sup> Siehe Unterabschnitt 2.4.4

<sup>220</sup> Vgl. Albers et al. (2016a).

und *Prinzipvariationen* beschrieben werden können.<sup>221</sup> Durch die Erweiterung dieses Ansatzes auf die weiteren Ebenen der Produktmodellpyramide, wird eine spezifischere Beschreibung der Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Produkt in Entwicklung und dessen Prototypen erreicht. Dabei wird vorausgesetzt, dass Prototypen ebenfalls Generationen des Produkts in Entwicklung darstellen und sich die Variationen auf den verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide lediglich auf die Unterschiede zwischen den Prototypengenerationen und dem Produkt in Entwicklung beziehen und nicht auf dessen vorangegangene Produktgenerationen. In Folge der Steigerung der Effizienz der Prototypenentwicklung durch Optimierung des Prototypenumfangs, wie durch Ziel 3 in Abschnitt 3.1 beschrieben, treten zwangsläufig Variationen zwischen dem Produkt in Entwicklung und dessen Prototypen auf den verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide auf. Diese müssen während der Entwicklung des jeweiligen Prototyps analysiert und beachtet werden, um die Aussagekraft der mittels Prototypen gesammelten Informationen nicht zu gefährden.



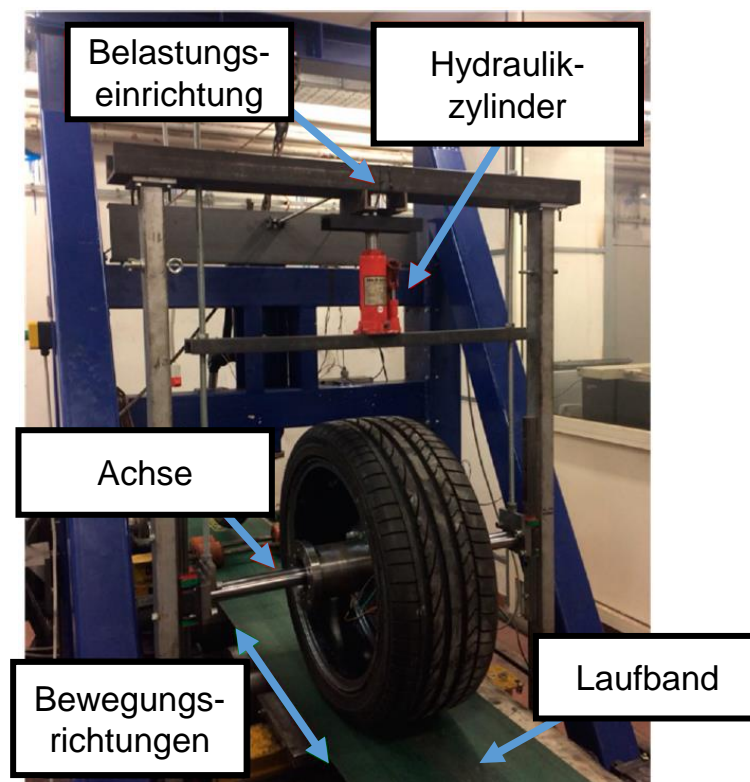
**Abbildung 5-19: Verschiedene allgemeine Variationen zwischen Prototypen und dem Produkt in Entwicklung basierend auf den verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide<sup>222</sup>**

Abbildung 5-19 zeigt die verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide sowie exemplarische, allgemeine Variationen, die zwischen Prototypen und dem Produkt in Entwicklung auftreten können.

<sup>221</sup> Vgl. Albers et al. (2015), S. 19.

<sup>222</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Kirchner (2020), S. 114.

Die oberste Ebene bilden der *Prozess* und dessen Variationen (PrV). Die Variationen können beispielsweise die Vereinfachung oder Austausch der eingesetzten Prozesse um den Prototyp zu vereinfachen. Diese Art der Variation kann angewendet werden, wenn einzelne Prinzipien oder physikalische Effekte isoliert untersucht werden sollen. Der ursprünglich mit dem Produkt in Entwicklung durchzuführende Prozess wird für den Prototyp variiert um die Isolation einzelner Wirkprinzipien oder physikalischer Effekte zu ermöglichen, die sich auf den darunterliegenden Ebenen der Produktmodellpyramide befinden. Dabei muss jedoch stets beachtet werden, dass alle durch den Prozess hervorgerufenen Einflüsse auf den isolierten Bereich abgebildet werden müssen, beispielsweise durch Verwendung zusätzlicher Aktoren. Als Beispiel kann der intelligente Reifen in Unterabschnitt 5.3.2 herangezogen werden, bei dessen Prototyp der sich wiederholende Prozess der Verformung der Sensorik durch das Abrollen des Reifens auf der Straße durch die Verwendung eines Prüfstands mit simulierter radialer Last erfolgte, wie in Abbildung 5-20 gezeigt.



**Abbildung 5-20: Prototyp des intelligenten Reifens auf einem Prüfstand zur Abbildung gewisser während der Nutzung auftretenden Belastungen<sup>223</sup>**

Auf Ebene der *Verfahren* und deren Variation (VV) kann die Anpassung einzelner Verfahren am Prototyp, bei gleichbleibenden Prozessen, angeführt werden. Verfahren können dabei derart geändert werden, dass der Kernprozess weiterhin erfüllt wird, das Verfahren jedoch derart geändert wird, dass beispielsweise komfortgetriebene Gesichtspunkte in der Untersuchung zunächst ausgeklammert werden. Zur verfahrenstechnischen Umsetzung einer Rotation eines Prototyps kann zum Beispiel von einer elektrischen, beziehungsweise

<sup>223</sup> Darstellung basierend auf Breglio et al. (2019), S. 55.

automatisierten, Einleitung eines Moments zur Drehung auf eine manuelle Einleitung dieses Drehmoments per Handkurbel übergegangen werden. Dadurch können Aufwände zur Steuerung, Regelung und Implementierung der Aktorik sowie Kosten zur Beschaffung dieser Aktorik vermieden werden. Zu beachten ist dabei, dass durch die Änderung des Verfahrens möglicherweise andere Einflussgrößen auf den Prototyp entstehen. In diesem Beispiel können vorrangig die Gleichmäßigkeit und Dosierung des eingeleiteten Moments genannt werden. Diese sind im Vergleich zur Momenteneinleitung mittels Aktorik stärker schwankend. Daher muss beachtet werden, ob diese Änderung des Verfahrens zulässig ist oder ob die Aussagekraft des Prototyps dadurch negativ beeinflusst wird.

Ähnliches gilt für Variationen auf Ebene der *Funktionsstruktur* (FV). Die Variationsmöglichkeiten beinhalten zum Beispiel den Verzicht auf gewisse Funktionen oder den Zusammenschluss mehrerer Funktionen zu Subsystemen, die isoliert betrachtet werden können. Als Beispiel dieser Variationsmöglichkeit kann der XiL-Ansatz herangezogen werden.<sup>224</sup> Dabei müssen die Systemgrößen, die als Eingangsgrößen an den Subsystemen auftreten, insofern sie für das Ziel des prototypischen Versuchs relevant sind, durch externe Quellen, beispielsweise Aktoren, ersetzt werden. Dies ist besonders dann sinnvoll, wenn der funktionale Umfang der für das Produkt in Entwicklung geplanten Teillösungen den für die geplanten prototypischen Versuche benötigten funktionalen Umfang übersteigt oder nur gewisse Teilfunktionen getestet werden sollen. Wenn das Produkt in Entwicklung beispielsweise vorsieht, dass ein elektrisches Signal aus anliegenden Systemgrößen, zum Beispiel der übertragenen Kräfte, gewandelt werden soll und die Übertragung dieses Signals an eine externe Auswerteeinheit überprüft werden soll, so ist die Quelle des elektrischen Signals für dessen Übertragung irrelevant. Daher kann auf die Wandlung des elektrischen Signals aus einem mechanischen Signal verzichtet werden und stattdessen ein Signalgenerator zur Erzeugung eingesetzt werden. Dadurch können zusätzlich Störgrößen aufgrund der internen Wandlung vermieden werden, die gegebenenfalls mittels nachfolgender Prototypen untersucht werden können.

*Variationen der physikalischen Effekte* (EV) beziehen sich auf die Änderungen physikalischer Erscheinungen oder dem Ablauf physikalischer Geschehen, die durch Gesetze beschreibbar sind.<sup>225</sup> Als Beispiel kann die Messung der Längung einer Sensorschraube mittels auf verschiedenen physikalischen Effekten basierenden Sensoren herangezogen werden. Wird für das Produkt in Entwicklung angedacht, die Längung der Schraube unter axialer Belastung mittels eines Piezosensors zu ermitteln, der auf dem piezoelektrischen Effekt beruht, so kann zur prototypischen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen eingeleiteter Axialkraft und der Längung der Schraube der Piezosensor durch Dehnungsmessstreifen ersetzt werden, um den Aufwand der Herstellung zu reduzieren. Der physikalische Effekt entspricht durch diese Variation der Änderung des Widerstands im Zuge der Querschnittsänderung durch Querkontraktion.<sup>226</sup>

Auch *Prinzipvariationen* (PzV) können zur Optimierung des Umfangs des Prototyps eingesetzt werden. Dabei wird das Wirkprinzip geändert oder die verschiedenen Wirkelemente neu angeordnet.<sup>227</sup> Ein Beispiel dazu ist die prototypische Untersuchung einer sensorin-

---

<sup>224</sup> Vgl. Albers et al. (2013).

<sup>225</sup> Vgl. Kirchner (2020), S. 120.

<sup>226</sup> Diese Variation findet sich beispielsweise in Groche und Brenneis (2014).

<sup>227</sup> Siehe dazu auch Unterabschnitt 2.4.5.

tegrierenden Klauenkupplung, die zur Messung des übertragenen Drehmoments eingesetzt wird durch Messung der Deformation des elastischen Elements. Zur prototypischen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen einem eingeleiteten Drehmoment und der Höhe und Ausprägung der Deformation des elastischen Elements, kann eines der in der elastischen Klauenkupplung parallelgeschalteten Wirkelemente isoliert betrachtet werden. Die weiteren, an der Drehmomentübertragung im Produkt in Entwicklung ebenfalls beteiligten Wirkelemente, werden nicht im Prototyp abgebildet. Die Wirkstruktur wird dadurch reduziert.

Variationen auf *Gestaltebene* (GV) sind im Bereich der Prototypen häufig anzutreffen. In vielen Fällen kann die Geometrie von Bauteilen in gewissen Grenzen verändert werden, im Regelfall um diese zu vereinfachen. Beispielsweise können die Oberflächenqualität oder die Verwendung von Radien reduziert werden, um dadurch die Fertigung zu erleichtern, wenn diese Faktoren keinen Einfluss auf die durchzuführenden Versuche haben. Dies ist jedoch meist nicht der Fall, wenn die Belastbarkeit und Beanspruchbarkeit eines Bauteils überprüft werden soll. Der Verzicht auf Radien kann hierbei Spannungsspitzen hervorrufen, die sich im Produkt in Entwicklung nicht ergeben, wodurch der Schluss gezogen wird, dass das Produkt in Entwicklung den Belastungen nicht standhält. Eine Anpassung der Geometrie kann in diesem Fall zu einer Überdimensionierung führen. Andere Gestaltvariationen treten häufig im Sinne von Skalierungen auf. Dabei muss beachtet werden, dass die charakteristischen Größen eingehalten werden.<sup>228</sup> Weitverbreitet sind beispielsweise verkleinerte Prototypen von Flugzeugen, die im Windkanal getestet werden. Charakteristische Größen wie die Reynoldszahl<sup>229</sup> müssen dabei zwischen dem Prototyp und dem Produkt in Entwicklung übereinstimmen.

Die unterste Ebene der Produktmodellpyramide wird durch *Übernahmevariationen* (ÜV) gebildet.<sup>230</sup> Diese beschreiben die Verwendung von Bauteilen und Komponenten ohne Änderungen, die auf anderen Ebenen der Produktmodellpyramide verortet werden könnten. Diese Variationen beschreiben beispielsweise die Verwendung bereits getesteter Komponenten, die keine weiteren Untersuchungen mehr benötigen und keine Störgrößen ausgehend von diesen Komponenten erwartet wird oder wenn das Ziel der prototypischen Untersuchungen sich genau auf diese Komponenten konzentriert und damit keine Variationen an diesen im Vergleich zum Produkt in Entwicklung zulässt.

---

<sup>228</sup> Vgl. Bridgman (1963).

<sup>229</sup> Vgl. Reynolds (1883).

<sup>230</sup> Vgl. Albers et al. (2015), S. 18.

## 6 Ermittlung von Anforderungen an Prototypen

In diesem Kapitel wird die Ermittlung von Anforderungen an Prototypen diskutiert. Die Diskussion beginnt dabei mit der Betrachtung der Anforderungen an die Produkte in Entwicklung und wie diese Anforderungen den Prototypenentwicklungsprozess beeinflussen. Darauf aufbauend wird eine Herangehensweise vorgestellt um Anforderungen an Prototypen zu ermitteln. Die Ermittlung und Festlegung von Anforderungen an Prototypen soll dazu beitragen, die in Abschnitt 3.1 aufgestellten Ziele zu erreichen.

Die Ermittlung von Anforderungen ist eine essentielle Hauptaktivität im Produktentwicklungsprozess. Die Anforderungen werden dabei in Verbindung mit dem Klären der Aufgabenstellung festgelegt und dokumentieren die Werte der Merkmale und Eigenschaften, die das Produkt erreichen muss. Anforderungen sind nach DIN 69901-5 wie folgt definiert:

### Anforderungen

Def. 8

*„Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung, die ein Produkt, Prozess oder die am Prozess beteiligte Person erfüllen oder besitzen muss, um einen Vertrag, eine Norm, eine Spezifikation oder andere, formell vorgegebene Dokumente zu erfüllen.“*

Die Anforderungsliste für Produkte ist stark formalisiert und wird als Basis für geschlossene Verträge zwischen entwickelnden Unternehmen und deren Kunden herangezogen. Zu Beginn der Produktentwicklung ist die Anforderungsliste jedoch meist unvollständig und enthaltene Werte sind unsicherheitsbehaftet. Bereits zu diesem Zeitpunkt muss daher das Wissen bezüglich der offenen Punkte erhöht werden. SUNIN ET AL. (2010) beschreiben in diesem Zusammenhang, dass es nicht möglich ist, ein Problem komplett zu verstehen bevor die entsprechende Lösung erarbeitet und getestet wurde.<sup>231</sup> Der Einsatz von Prototypen bietet daher die Möglichkeit, mögliche Lösungen zu entwickeln und zu untersuchen um die gestellten Anforderungen zu überprüfen und um fehlende, für den Erfolg des Produkts wichtige Anforderungen zu identifizieren.<sup>232</sup> Im Gegensatz zu den Produkten in Entwicklung wird bei der Entwicklung der Prototypen jedoch im Allgemeinen keine differenzierte Anforderungsliste erstellt und Ansätze zur formalisierten Erstellung der Anforderungsliste können im Rahmen der Literatur nicht gefunden werden. Dies kann auf die iterative und intuitive Herangehensweise an die Prototypenentwicklung sowie das Ziel der direkten Vermeidung von Aufwänden zurückgeführt werden. Einzig die Erkenntnis, dass die Anforderungen an Prototypen nicht den Anforderungen an das jeweilige Produkt in Entwicklung entsprechen müssen ist anerkannt.<sup>233</sup> Um die Ermittlung und Festlegung von Anforderungen methodisch zu unterstützen, werden diese Unterschiede in Bezug auf die Ziele der jeweiligen Prototypen analysiert.

Die Unterschiede zwischen den Anforderungen an Prototypen und an die Produkte in Entwicklung resultieren aus verschiedenen Quellen, beispielsweise unterscheiden sich die Anforderungen an Prototypen zur Überprüfung der Validität deutlich von den Anforderungen an Prototypen zur Untersuchung der Begehrtheit bezogen auf den funktionellen Umfang und das äußere Erscheinungsbild.<sup>234</sup> Dies entspricht der Erkenntnis von MENOLD ET AL.

<sup>231</sup> Vgl. Sunin et al. (2010), S. 955.

<sup>232</sup> Vgl. Kriesi et al. (2016), S. 792.

<sup>233</sup> Vgl. Hostettler et al. (2017), S. 770, Camburn et al. (2017a), S. 11.

<sup>234</sup> Vgl. Hostettler et al. (2017), S. 770.

(2017), dass verschiedene Prototypen – und damit verbunden verschiedene Anforderungen – basierend darauf, ob das Ziel des Prototyps der Nachweis der Validität, Machbarkeit oder Begehrtheit ist, benötigt werden.<sup>235</sup> Dies zeigt, dass die Anforderungen an Prototypen stark von den Zielen der Prototypenentwicklung abhängen. Daher ist der erste Schritt zur Ermittlung von Anforderungen an Prototypen die Festlegung dieses Ziels. Diese Festlegung findet dabei bezogen auf das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung im Rahmen des Klärens der Aufgabenstellung, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, statt.

Bei der Festlegung von Anforderungen an den Prototyp muss darauf geachtet werden, dass diese nur den minimal möglichen Teil der Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abbilden sollten um den Prototyp auf wenige ungeklärte Fragestellungen zu fokussieren, wodurch die Aussagekraft des Prototyps hinsichtlich der Fragestellung erhöht und der Aufwand zur Herstellung des Prototyps reduziert wird.<sup>236</sup> CAMBURN ET AL. (2015a) führen dazu den Begriff der „relaxed requirements“ (deutsch: gelockerte Anforderungen) ein. Diese Lockerung bezieht sich darauf, dass nicht alle Anforderungen an das Produkt in Entwicklung streng eingehalten werden müssen bis hin zur Nichtbeachtung gewisser Anforderungen.<sup>237</sup> Diese Arbeiten verdeutlichen, dass die Anforderungen an Prototypen von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abhängen, was zunächst trivial erscheint. Jedoch muss beachtet werden, dass die Anforderungen nicht zwangsläufig in der Form und Schärfe übernommen werden müssen, wie sie an das Produkt in Entwicklung gestellt werden, sondern mit Änderungen übernommen werden können.

**Tabelle 1: Überblick über exemplarische unternehmensspezifische Anforderungen in Prototypen<sup>238</sup>**

	Nutzen	Qualität	Herstellung	Montage
A-Prototyp	Generelle Validierung der Funktionalität des Konzepts	Geringer funktionaler Umfang und geringe Lebensdauer	Herstellung per Hand oder existierenden Maschinen des Vorgängerprodukts Änderungen am Werkstoff akzeptiert	Handmontage
B-Prototyp	Validierung des gesamten funktionalen Umfangs	Geometrie stimmt mit Serie überein Erste Tests in realer Umgebung	Herstellung mittels prototypischer Werkzeuge Werkstoffe weitestgehend final	Hilfsprozesse bei Montage erlaubt ansonsten seriennahe Montage

<sup>235</sup> Vgl. Menold et al. (2017), S. 87,

<sup>236</sup> Vgl. Drezner und Huang (2009).

<sup>237</sup> Vgl. Camburn et al. (2015a), S. 5 sowie Abschnitt 0

<sup>238</sup> Angelehnt an Schork und Kirchner (2018a) und Hohlfeld (2014).

<b>C-Prototyp</b>	Technische Abnahme und Veröffentlichung	Geometrie und Qualität stimmen mit Serie überein Tests in realer Umgebung	Produktion mit Serienwerkzeugen und seriennahen Prozessen Werkstoffe final	Montage Mittels Serienprozessen ohne Automatisierung der Prozesskette
<b>D-Prototyp</b>	Vorserie Verifikation der Prozessstabilität	Qualitätsstandards müssen eingehalten und statistisch belegt werden	Produziert mit Serienwerkzeugen	Montage mit Serienprozessen und vollständiger Automatisierung

Neben den Anforderungen an Prototypen auf Basis der Anforderungen an das Produkt in Entwicklung können unternehmensspezifische Anforderungen existieren. Diese Anforderungen werden beispielsweise in Form von einzuhaltenden Meilensteinen definiert.<sup>239</sup> Dabei beziehen sich die Anforderungen beispielsweise auf die Nachweise, die ein Prototyp zu einem gewissen Zeitpunkt der Entwicklung erbringen muss oder die zulässigen Fertigungsprozesse. Eine Übersicht über derartige Einflüsse auf die Anforderungen an Prototypen ist in Tabelle 1 gegeben. Zu beachten ist dabei, dass die entsprechenden Prototypen hauptsächlich zur Validierung und Verifikation eingesetzt werden und weniger für explorative Zwecke.<sup>240</sup>

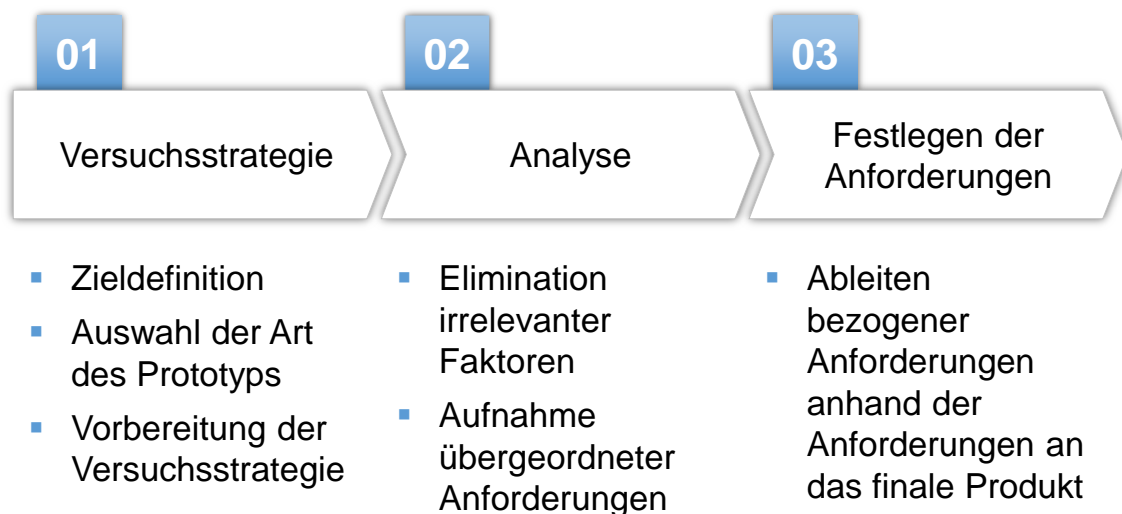


Abbildung 6-1: Dreistufige Herangehensweise zur Ermittlung und Festlegung von Anforderungen an Prototypen<sup>241</sup>

Die Unterschiede der Anforderungen zwischen Prototypen und den Produkten in Entwicklung können daher auf zwei Quellen zurückgeführt werden. Die erste Quelle ist dabei vom Produkt in Entwicklung aus gesehen extern, in Form der unternehmensspezifischen und

<sup>239</sup> Vgl. Hohlfeld (2014).

<sup>240</sup> Vgl. Schork und Kirchner (2018a), S. 9.

<sup>241</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Schork und Kirchner (2018a).

daher *übergeordneten* Anforderungen. Die zweite Quelle ist dagegen aus Sicht des Produkts in Entwicklung intern, in Form der auf die Anforderungen an das Produkt in Entwicklung bezogenen Anforderungen. Anforderungen aus dieser zweiten Quelle können daher von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung *abgeleitet* werden.

Auf Basis dieser Anforderungsquellen wird nun eine dreischrittige Herangehensweise vorgestellt, um die Anforderungen an Prototypen zu ermitteln und festzulegen. Diese Herangehensweise ist in Abbildung 6-1 gezeigt und die drei Schritte werden in den Abschnitte 6.1, 6.2 und 6.3 näher erläutert.

## 6.1 Identifikation des Ziels

Der erste Schritt der Herangehensweise in Abbildung 6-1 ist die Festlegung der generellen Versuchsstrategie und des Ziels der Prototypingaktivität. Dies beinhaltet, dass beispielsweise festgelegt wird, ob der Prototyp Fragen hinsichtlich der Brauchbarkeit, Machbarkeit und Begehrtheit beantworten soll oder ob Ziele hinsichtlich der Exploration, Kommunikation oder Validierung im Vordergrund stehen.<sup>242</sup> Wie in Abschnitt 5.2 erläutert, eint diese Ziele zwar der Lernaspekt, jedoch ist eine möglichst genaue Definition des verfolgten Ziels für die Ermittlung von Anforderungen essentiell, da je nach Ziel andere Anforderungen an den Prototyp gestellt werden müssen. Zur Zieldefinition kann beispielsweise eine Kritikalitätsanalyse durchgeführt werden.<sup>243</sup> Wenn das vorhandene Wissen bezüglich des Produkts in Entwicklung niedrig ist, geben Prototypen zur Exploration beispielsweise erste Einblicke und erhöhen das Wissen über das Produkt in Entwicklung, sodass die Antizipation hinsichtlich der zu treffenden Entscheidungen gesteigert wird, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben. Das Ziel der Exploration führt wiederum dazu, dass paralleles Prototyping mit mehreren Prototypen, deren Anforderungen sich geringfügig unterscheiden, vorteilhaft ist.<sup>244</sup> Zudem können die Anforderungen im Rahmen von explorativen Prototypen stärker gelockert werden und Prototypen intuitiver erstellt werden, um schnell erste Einblicke und Wissenszuwächse zu verzeichnen, wodurch sich erneute Fragen ergeben und „unknown unknowns“ (deutsch: unbekannte Unbekannte) entdeckt werden.<sup>245</sup> Basierend auf den Ergebnissen dieser explorativen Versuche verschiebt sich der Schwerpunkt der Ziele für weitere Prototypingaktivitäten hin zur Validierung. In diesem Zusammenhang sollte auch der Aufwand für die Entwicklung des Prototyps erhöht werden, um die Aussagekraft der damit erzielten Resultate auf das Produkt in Entwicklung nicht zu gefährden. Die Ziele aufeinanderfolgender Prototypingaktivitäten können daher von *grob zu fein* definiert werden, angefangen bei der Findung der generellen Richtung und den ersten Einblicken bezüglich des Produkts in Entwicklung hin zur Beantwortung detaillierter Fragestellungen und der Untersuchung der Validität des Produkts, wie in Abbildung 6-2 visualisiert.

---

<sup>242</sup> Vgl. Menold (2017), Ulrich und Eppinger (1995).

<sup>243</sup> Vgl. Albers et al. (2014), S. 84.

<sup>244</sup> Vgl. Dow et al. (2010).

<sup>245</sup> Vgl. Jensen et al. (2017).

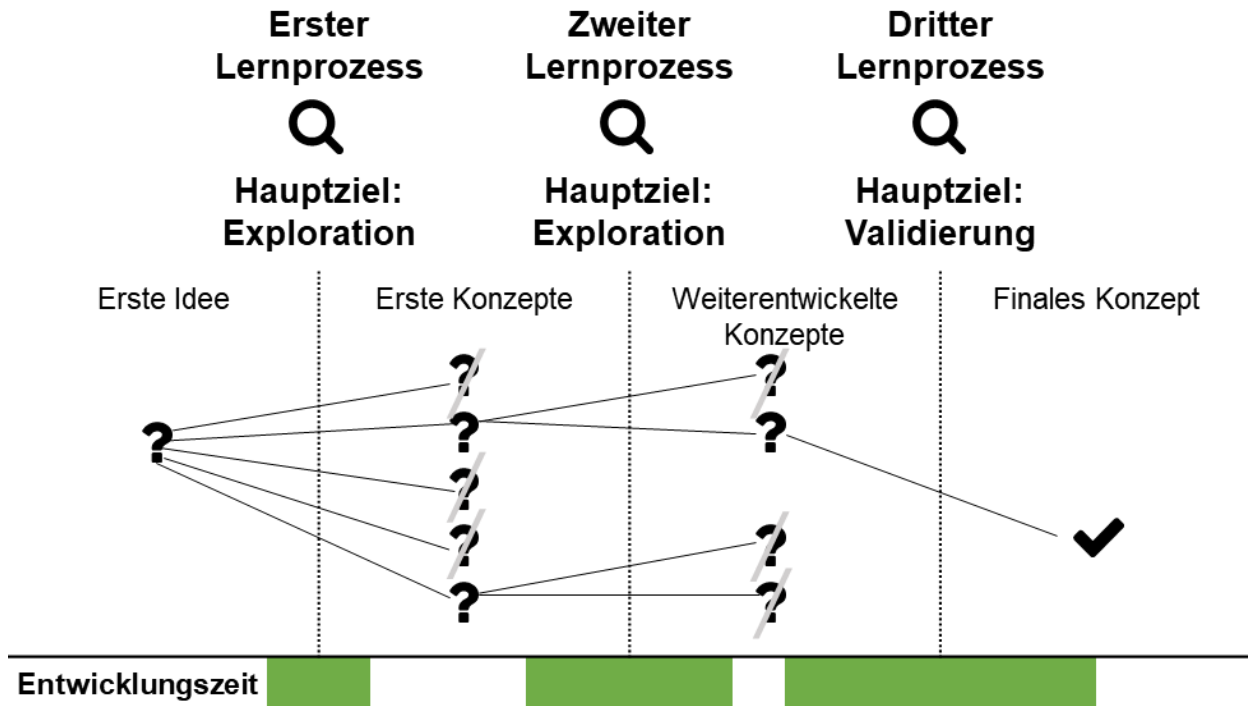


Abbildung 6-2: Schematische Visualisierung von Prototypingaktivitäten zur Exploration im ersten und zweiten Lernprozess und zur Validierung im dritten Lernprozess<sup>246</sup>

## 6.2 Übergeordnete Anforderungen an Prototypen

Nach der Definition des Ziels im ersten Schritt, werden im zweiten Schritt die *übergeordneten Anforderungen* festgelegt. Diese Gruppe der Anforderungen an den Prototyp ist unabhängig von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung. Die Anforderungen resultieren beispielsweise aus Randbedingungen, wie den verfügbaren Ressourcen, den Fertigungsmöglichkeiten und den freien Personalkapazitäten. Weitere übergeordnete Anforderungen beziehen sich auf die Umgebung, zum Beispiel den Bedingungen in der Versuchsumgebung. Übergeordnete Anforderungen haben daher einen externen Charakter bezüglich des Produkts in Entwicklung und werden im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert:

### Übergeordnete Anforderungen

*Übergeordnete Anforderungen beschreiben Anforderungen, deren Quellen in Bezug zum Produkt in Entwicklung extern sind.*

Def. 9

Obwohl übergeordnete Anforderungen nicht von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abhängen, können nicht die gleichen übergeordneten Anforderungen für jeden Prototyp festgelegt werden. Dies liegt daran, dass übergeordnete Anforderungen auch von den gesetzten Zielen der Prototypingaktivität und der Gruppe der Testenden abhängen. Beispielsweise sollten Prototypen, die zur Kommunikation des Projektfortschritts mit Vorgesetzten eingesetzt werden, keine deutlich erhöhte Wiedergabetreue des Designs im

<sup>246</sup> Eigene Darstellung

Vergleich zur Funktionalität aufweisen, da dies den Eindruck eines deutlich weiter vorangeschrittenen Projektfortschritts erwecken kann. Ebenso kann dadurch der Fokus der Diskussionen von der Funktionalität hin zu Diskussionen über Details gelenkt werden.<sup>247</sup> Die Gruppe der Testenden ist ebenfalls in Bezug zu dessen Vorwissen und Erfahrung mit dem Produkt in Entwicklung zu beachten. So interagieren die Entwickelnden, die sich bereits eingängig mit den Produkt in Entwicklung beschäftigt haben, anders mit dem Prototyp als außenstehende Testende, beispielsweise spätere Nutzer, die den Prototyp zum ersten Mal nutzen können.<sup>248</sup> Zur Beschreibung der Gruppe der Testenden, schlagen JENSEN ET AL. (2015) vor, die Faktoren *Anzahl der Testende, beruflicher Hintergrund und Vorerfahrung sowie Zeit zur Deadline* zu verwenden.<sup>249</sup> Diese können im Rahmen der Festlegung der Anforderungen beachtet werden. Zusätzlich müssen je nach Entwicklungsstadium des Produkts in Entwicklung andere unternehmensspezifische Anforderungen berücksichtigt werden. Dazu zählen auch Anforderungen hinsichtlich der Geheimhaltung, die beispielsweise im Rahmen von Fahrzeugversuchen im Straßentest durch Beklebung der Fahrzeuge mit speziell gemusterten Folien oder der Verwendung von geometriekaschierenden Anbauteilen erreicht wird, wie Abbildung 6-3 zeigt.



Abbildung 6-3: Tarnung von Fahrzeugen im Straßentest mittels geometriekaschierenden Anbauteilen (links<sup>250</sup>) und mit speziell gemusterter Folie (rechts<sup>251</sup>)

### 6.3 Bezogene Anforderungen an Prototypen

Der dritte Schritt der Anforderungsermittlung für Prototypen ist das Festlegen *bezogener Anforderungen*, die von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abgeleitet werden können. Die Anforderungen dieser Gruppe orientieren sich daher an den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung, müssen diesen jedoch nicht genau entsprechen.

#### Bezogene Anforderungen

*Bezogene Anforderungen sind Anforderungen an Prototypen, die in direktem Bezug zu den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung stehen und daher von diesen abgeleitet werden.*

Def. 10

<sup>247</sup> Vgl. Lim et al. (2008), S. 7.

<sup>248</sup> Vgl. Blomkvist und Holmlid (2011), S. 7.

<sup>249</sup> Vgl. Jensen et al. (2015), S. 5–6.

<sup>250</sup> Von LSDSL - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36955967>

<sup>251</sup> Von B. Forbes - Credit attribution to B Forbes (mail via Fritz@Joern.com 16.10.13, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29068072>

Die Anforderungen an das Produkt in Entwicklung können auf den Prototyp übertragen, angepasst oder nicht berücksichtigt werden. Bei der Anpassung der Anforderungen steht besonders das Lockern von Anforderungen im Vordergrund.<sup>252</sup> Die Nichtberücksichtigung hingegen geht beispielsweise mit der Isolierung von Subsystemen oder einzelnen Funktionen einher. Darüber hinaus können auch Anforderungen hinzugefügt werden, beispielsweise wenn Messungen in gewissen Bereichen durchgeführt werden müssen und diese Bereiche dafür vorbereitet werden müssen. Ein Beispiel ist die Messung der Dehnung an einem Gehäuse mittels Dehnungsmessstreifen, woraufhin die Oberfläche des Gehäuses in diesem Bereich möglichst glatt und frei von Fett sein muss, auch wenn dies für das Produkt in Entwicklung nicht relevant ist.

Tabelle 2 zeigt beispielhafte Anforderungen, die im Rahmen der Festlegung von Anforderungen an Prototypen im Vergleich zu den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung häufig geändert werden. Die Anforderungen sind dabei nach den Lebenslaufprozessen der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung in Abschnitt 5.4 geordnet. Die Einträge sind nicht allumfänglich und die Entscheidung hinsichtlich der zulässigen Änderungen muss für jeden Prototyp differenziert betrachtet werden.

**Tabelle 2: Repräsentative Unterschiede zwischen Anforderungen an Prototypen und Anforderungen an das Produkt in Entwicklung**

	Art der Anforderung	Wert (Produkt)	Wert (Prototyp)
<b>Werkstoffherstellung</b>	Materialparameter (z.B. Festigkeit, Elastizität, Dichte)	Abhängig von den Funktionen des Produkts, den Beanspruchungen und den Kundenbedürfnissen	Abhängig vom Einfluss des Materials auf die Ergebnisse der prototypischen Versuche  Niedrigere Qualität
	Quantitative Verfügbarkeit	Hoch für Serienproduktion	Niedrig und abhängig von der Anzahl durchzuführender Test
<b>Teilefertigung</b>	Herstellungsprozess	Im Allgemeinen automatisiert bzw. Serienfertigung	Handarbeit und unverkettete Prozesse möglich
	Anzahl der Teile	Vom Produkt abhängig	Im Allgemeinen niedriger
	Induzierte Eigenschaften (z.B. Oberflächenqualität)	Abhängig von den Funktionen und Komponenten des Produkts	Abhängig von den prototypischen Versuchen
<b>Montage</b>	Montageprozess	Automatisierte Montage	Handmontage
	Zeit pro Teil	So gering wie möglich	Im Allgemeinen irrelevant bei niedriger Anzahl an Prototypen

<sup>252</sup> Vgl. Camburn et al. (2017a), S. 11, Camburn et al. (2015a), S. 5 sowie Abschnitt 0

<b>Nutzung</b>	Installationsaufwand	So gering wie möglich	Im Allgemeinen irrelevant bei niedriger Anzahl an Prototypen
	Funktionaler Umfang	Komplett	Fokussierung auf einzelne Funktionen möglich
	Nutzungsdauer	Produktlebensdauer	Vergleichsweise kurz, basierend auf Versuch
	Sicherheitsaspekte	Sicherheit muss selbst im Missbrauchsfall gewährleistet sein	Niedrigere Sicherheitsaspekte aufgrund geänderter Nutzergruppe
	Messbarkeit	Nur als Teil der Produktfunktionen	Je nach Versuch erhöhte Messbarkeit benötigt
<b>Recycling</b>	Wiederverwertung von Materialien	Möglichkeit zur kundenseitigen Trennung und Recycling muss gegeben sein	Entwicklerseitige Entsorgung
	Demontageprozesse	Möglich mit niedrigem Aufwand	Aufwände können erhöht sein bei niedriger Anzahl an Prototypen und Versuchen

Um die Anforderungen an Prototypen basierend auf den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung derart festzulegen, dass der Aufwand der anstehenden Prototypingaktivität niedrig gehalten wird und gleichzeitig die Übertragbarkeit der am Prototyp ermittelten Ergebnisse auf das Produkt in Entwicklung sichergestellt wird, werden in den nachfolgenden Kapitel verschiedene Methoden zur Analyse des Produkts in Entwicklung vorgestellt. Im Rahmen der Analyse wird der Zusammenhang zwischen den offenen Fragen der Prototypingaktivität mit den Anforderungen einschließlich deren Werten an das Produkt in Entwicklung hergestellt. Auf Basis dieses Zusammenhangs kann eine Entscheidung hinsichtlich der zu übertragenden Anforderungen und deren Werten auf den Prototyp getroffen werden.

## 7 Identifikation und Priorisierung der Entwicklungsschwerpunkte der Prototypenentwicklung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Identifikation und Priorisierung der Schwerpunkte der Entwicklung von Prototypen. Dabei liegt der Fokus auf Prototypen, deren Ziele nach Abschnitt 2.2 die Validierung betreffen, anstelle von Prototypen, die schwerpunktartig zur Exploration oder Kommunikation eingesetzt werden. Die Entwicklungsschwerpunkte werden im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert:

### Entwicklungsschwerpunkt

Def. 11

*Entwicklungsschwerpunkte beschreiben die Konfigurationen eines Produkts in Entwicklung, die vorrangig durch den Einsatz von Prototypen untersucht werden müssen.*

Die Festlegung dieser Entwicklungsschwerpunkte ist damit eine Hauptaktivität und Grundlage zur Ermittlung der Anforderungen an Prototypen. Zur Festlegung der Entwicklungsschwerpunkte werden die Konfigurationen des Produkts in Entwicklung hinsichtlich deren Neuheit, Relevanz und technischer Schwierigkeit bewertet und eine Verknüpfung zwischen den Konfigurationen und den Merkmalen des Produkts in Entwicklung geschaffen.

Zunächst wird in Abschnitt 7.1 der Begriff der kritischen Konfigurationen näher erläutert und die Einflussfaktoren auf deren Kritikalität diskutiert. Darauf aufbauend wird eine Herangehensweise zur Modellierung der inneren Struktur eines Produkts in Entwicklung in Abschnitt 7.2 vorgestellt. Die innere Struktur des Produkts in Entwicklung wird anschließend im gleichen Abschnitt hinsichtlich der Signalflüsse zur Identifikation von Störgrößen im Zusammenhang mit den kritischen Konfigurationen analysiert. Danach werden die Verknüpfungen verschiedener Störgrößen untereinander diskutiert, um Anhaltspunkte zur Bildung von Subsystemen und der Entwicklung isolierter Prototypen zu erhalten. Zur Unterstützung der Bildung von Subsystemen sowie zur Anforderungsermittlung wird in Abschnitt 7.3 das *House of Configurations* vorgestellt. Abschnitt 7.4 beschreibt dann die Einteilung des Gesamtsystems, beziehungsweise des Produkts in Entwicklung, in Subsysteme, die isoliert betrachtet werden können. Die Substitution von Teillösungen zu gewissen Teilfunktionen, die für die mit dem Prototyp durchzuführenden Versuche essentiell sind, wird in Abschnitt 7.5 erläutert.

### 7.1 Die kritischen Konfigurationen des zu entwickelnden Produkts

Ein in Abschnitt 3.1 ausgegebenes Ziel dieser Arbeit ist die Steigerung der Effizienz von Prototypingaktivitäten. Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen ist die Reduktion des Umfangs des entwickelten Prototyps auf das Minimum, das zur Gewährleistung der Aussagekraft der mit dem Prototyp erhaltenen Informationen benötigt wird. Im Rahmen der Produktentwicklung besteht mit dem Ansatz der Entwicklung des *minimum viable product* (deutsch: minimal lebensfähiges Produkt), der die Entwicklung eines Produkts beschreibt, das den minimalen Kundenbedarf mit minimalem Aufwand deckt, ein ähnlicher Ansatz.<sup>253</sup> Dieser Ansatz wird von SCHUH ET AL. (2018) im Rahmen einer agilen Herangehensweise

<sup>253</sup> Vgl. Lenarduzzi und Taibi (2016).

zur Entwicklung von Prototypen technischer Systeme aufgegriffen. Zusätzlich greifen SCHUH ET AL. (2018) dabei das Kano-Modell<sup>254</sup> auf, um Produktmerkmale zu identifizieren, die im Prototyp mit gelockerten Anforderungen abgebildet werden können, ohne die Ergebnisse der prototypischen Versuche negativ zu beeinflussen. Die von SCHUH ET AL. (2018) vorgestellte Herangehensweise betrachtet dabei jedoch nicht das Entwicklungsrisiko<sup>255</sup>, das mit den Produktmerkmalen verbunden ist.

Die Herangehensweise in dieser Arbeit zielt auf das Erreichen des minimalen Umfangs des Prototyps durch die Identifikation kritischer Konfigurationen und deren Verknüpfung mit den Eigenschaften und Merkmalen des Produkts in Entwicklung, die hohen Einfluss auf die kritischen Konfigurationen haben, ab. Die Idee, kritische Konfigurationen des Produkts in Entwicklung zu identifizieren, stimmt dabei mit dem von JENSEN ET AL. (2015) empfohlenen Fokussierung auf „kritische Funktionsprototypen“ überein.<sup>256</sup> Nach der Identifikation kritischer Konfigurationen und der ausschlaggebenden Eigenschaften und Merkmale des Produkts in Entwicklung, können Anforderungen an den Prototyp basierend auf der Höhe des Einflusses der Eigenschaften und Merkmale von den entsprechenden Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abgeleitet werden. Konfigurationen werden dabei in Analogie zu DIN ISO 10007 definiert.

### **Konfiguration**

Def. 12

„Konfigurationen sind verbundene funktionale und physische Merkmale und Eigenschaften eines Produkts oder einer Dienstleistung“.<sup>257</sup>

Die Bezeichnung *kritische Konfigurationen* des Produkts in Entwicklung beschreiben aufbauend darauf alle Eigenschaften und Merkmale, die essentiell für die Machbarkeit, Brauchbarkeit und Begehrtheit des Produkts in Entwicklung sind. Zudem sind Entscheidungen, die hinsichtlich dieser Konfigurationen getroffen werden, deutlich risikobehaftet. Folgende Definition wird daher im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

### **Kritische Konfiguration**

Def. 13

*Kritische Konfigurationen sind verbundene funktionale und physische Merkmale und Eigenschaften des Produkts in Entwicklung die essentiell für dessen Machbarkeit, Brauchbarkeit und Begehrtheit sind.*

Produkte werden im Allgemeinen anhand einer Kernidee entwickelt, die sie von vorangegangenen Generationen oder Mitbewerberprodukten unterscheiden und damit essentiell für das Produkt sind.<sup>258</sup> Für Konfigurationen, die eng mit der Kernidee verbunden sind und zur Umsetzung dieser beitragen, liegt es daher nahe, dass die diese Konfigurationen als kritisch zu bezeichnen sind. Die Identifikation der Kernidee, beziehungsweise des *unique selling points* (USP), trägt damit maßgeblich zur Findung kritischer Konfigurationen bei. Im Fall der sensorintegrierenden Maschinenelemente und speziell der sensorintegrierenden Maschinenelemente in Abbildung 4-2, besteht die Kernidee in der Messbarkeit bestimmter mechanischer Signale, die durch das Funktionsprinzip des Maschinenelements

<sup>254</sup> Vgl. Kano et al. (1984).

<sup>255</sup> Vgl. Baskerville und Stage (1996), S. 492.

<sup>256</sup> Vgl. Jensen et al. (2015), S. 7.

<sup>257</sup> Vgl. DIN ISO 10007, S. 6.

<sup>258</sup> Vgl. Cooper (1983).

im Betrieb hervorgerufen werden und einen Rückschluss auf den Zustand des Gesamtsystems zulassen. Bezogen auf die in Unterabschnitt 5.3.2 beschriebene sensorintegrierende Federstegkupplung bedeutet dies, dass für die Konfiguration *Beschreibbarkeit der Zusammenhänge zwischen mechanischem Eingangssignal und elektrischem Ausgangssignal* sowie *Übertragbarkeit des elektrischen Signal vom rotierenden ins statische System* eine hohe Kritikalität zu erwarten ist. Wird eine dieser Konfigurationen nicht wie gefordert erreicht, verliert die sensorintegrierende Federstegkupplung ihr Alleinstellungsmerkmal, wodurch Brauchbarkeit und Begehrtheit stark eingeschränkt sind, obwohl die Restfunktionalität – die Übertragung des Drehmoments und der Ausgleich des Versatzes – weiterhin vorliegt. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Konfigurationen für den Erfolg des Produkts in Entwicklung sind diese zudem mit einem hohen Risiko verbunden. Dieses Risiko manifestiert sich beispielsweise in Entscheidungen, die hinsichtlich dieser Konfigurationen getroffen werden und einen hohen Einfluss auf den weiteren Entwicklungsprozess haben.<sup>259</sup> Falsche Entscheidungen führen daher zu hohem Aufwand für Nacharbeiten und Fehlerkorrekturmaßnahmen oder zu Produkten, die von den Kunden nicht akzeptiert werden. Die Aufwände zur Korrektur steigen dabei exponentiell mit Fortschreiten des Entwicklungsprozesses an.<sup>260</sup> Um das Risiko von Entscheidungen hinsichtlich der Konfigurationen des Produkts in Entwicklung zu bewerten, lassen sich drei Aspekte identifizieren. Dies geschieht in Anlehnung an eine von ALBERS ET AL. (2014) vorgestellte Herangehensweise zur Priorisierung der Validierungsaktivitäten, die während der Produktentwicklung durchgeführt werden, die auf der Bewertung mittels Kritikalitätsmatrix basiert.<sup>261</sup> In dieser Arbeit wird diese Kritikalitätsmatrix nach ALBERS ET AL. (2014) dahingehend angepasst, dass der Einfluss der Neuheit einer Konfiguration und des damit verbundenen fehlenden Wissens der Entwickelnden stärker in den Vordergrund gestellt wird. Die drei Aspekte, nach denen die Kritikalität einer Konfiguration daher bewertet wird, ergeben sich damit zu *Neuheitsgrad*, *technische Schwierigkeit* und *Relevanzgrad*. Abbildung 7-1 zeigt diese Aspekte in Form von Dimensionen des Kritikalitätsarrays. Jeder der Aspekte wird anhand einer progressiven Skala von *gering* bis *sehr hoch* bewertet. Die Vergabe der entsprechenden Werte erfolgt dabei idealerweise im Rahmen der Diskussion mit dem gesamten Team der Entwickelnden. Die Aspekte und deren Bewertung werden in den Unterabschnitten 7.1.1, 7.1.2 und 7.1.3 näher beschrieben.

Die Kritikalität der jeweiligen Konfiguration wird nach der Bewertung der einzelnen Aspekte mit der *Kritikalitätszahl*  $CS_i$  beschrieben.<sup>262</sup> Die Kritikalitätszahl ergibt sich als Produkt der Einzelbewertung der Aspekte  $N_i$  (Neuheitsgrad),  $T_i$  (technische Schwierigkeit) und  $R_i$  (Relevanzgrad).

$$CS_i = N_i * T_i * R_i \quad \text{Gl. 7-1}$$

Die Zählvariable  $i$  bezieht sich dabei auf die jeweils betrachtete Konfiguration. Die Entscheidung, ob eine Konfiguration als kritisch zu betrachten ist, kann anhand zweier Kriterien getroffen werden. Zum einen sind Konfigurationen als kritisch anzusehen, wenn die Kritikalitätszahl  $CS_i \geq 64$  beträgt, da dies einer mittleren Bewertung aller Kriterien entspricht. Zum anderen sind Konfigurationen als kritisch zu betrachten, wenn für eine Einzelbewertung der Wert Zehn vergeben wird.

<sup>259</sup> Vgl. Aven (2012), S. 34.

<sup>260</sup> Vgl. Schmitt und Pfeifer (2015).

<sup>261</sup> Vgl. Albers et al. (2014), S. 84.

<sup>262</sup>  $CS$  leitet sich dabei vom englischen *Criticality Score* ab.



auf den Markt, auf konkurrierende Unternehmen und die Nachfrage der Kunden.<sup>266</sup> Die Neuheit wird dadurch mit dem innovativen Charakter bezüglich des Marktes des Produkts in Entwicklung verbunden, das vorhandene Wissen der Entwickelnden und der Vergleich zu bestehenden Produkten werden jedoch nicht miteinbezogen. Demgegenüber steht die Beschreibung der Neuheit eines Produkts durch die *Organisation for Economic Cooperation* (OECD), die auf technischen Variablen basiert, beispielsweise der Verwendung neuartiger Materialien oder Funktionseinheiten.<sup>267</sup> Diese Beschreibung wird in dieser Arbeit in Kombination mit der in Abbildung 5-19 dargestellten Produktmodellpyramide zur Bewertung der Neuheit der Konfigurationen eines Produkts in Entwicklung verwendet, um die Unterschiede zu Vorgängergenerationen in die Bewertung miteinzubeziehen. Die Werteskala zur Bewertung der Neuheit einer Konfiguration ist basierend darauf in Tabelle 3 gezeigt, zusammen mit den Anhaltspunkten, die zur Vergabe eines Wertes führen.

**Tabelle 3: Wertebereich der Bewertung des Neuheitsgrads eines Produkts in Entwicklung mit Beschreibung der Anhaltspunkte zur Vergabe eines Wertes**

Neuheitsgrad	Beschreibung der Anhaltspunkte
10 – Hoch	Die Konfiguration ist komplett neu. Die Anzahl und der Umfang an Variationen bezüglich Vorgängergenerationen sind sehr hoch und auf multiplen Ebenen der Produktmodellpyramide. Die beteiligten Produktentwickelnden haben sehr wenig bis gar keine Erfahrung mit der Konfiguration
4 – Mittel	Die Konfiguration ist vergleichbar mit Konfigurationen von Vorgänger- oder Konkurrenzprodukten. Variationen sind vorhanden, jedoch begrenzt auf wenige Ebenen der Produktmodellpyramide und nur von mittlerer Höhe. Die beteiligten Produktentwickelnden haben bereits Erfahrungen mit der Konfiguration.
1 – Gering	Die Konfiguration ist stark vergleichbar oder gleich zu Konfigurationen von Vorgänger- oder Konkurrenzprodukten. Vorhandene Variationen sind schwach ausgeprägt und betreffen lediglich einzelne untere Ebenen der Produktmodellpyramide. Die Produktentwickelnden haben ein hohes Erfahrungswissen bezüglich der Konfiguration.

### 7.1.2 Bewertung der technischen Schwierigkeit

Der zweite Aspekt zur Bewertung der Kritikalität einer Konfiguration ist die Bewertung hinsichtlich der Höhe der technischen Schwierigkeit, die zur Umsetzung der mit der Konfiguration verbundenen Anforderungen erwartet wird. In die Bewertung der technischen Schwierigkeit fließen beispielsweise die Hürden zur Umsetzung der Produktion und Her-

<sup>266</sup> Vgl. Martínez-Román und Romero (2013), S. 656.

<sup>267</sup> Vgl. OECD (2005), S. 80.

stellung sowie der Einschätzung der Machbarkeit und dem generellen Entwicklungsaufwand mit ein.<sup>268</sup> Daneben wird zur Bewertung der technischen Schwierigkeit der erwartete Einfluss von Fertigungs- und Materialparametern, beispielsweise Festigkeiten, Steifigkeiten und Geometrien, auf die Konfiguration in Verbindung mit den benötigten Aufwänden zur Einhaltung dieser Parameter einbezogen. Müssen zur Sicherung der Funktionalität einer Konfiguration komplexe Prozesse unter strengen Bedingungen in einem engen Toleranzfeld<sup>269</sup> durchgeführt werden, liegt beispielsweise eine hohe technische Schwierigkeit vor. Gleiches gilt, wenn zum Beispiel bereits geringste Abweichungen der Oberflächenqualität zum Ausfall einer Konfiguration führen können und die Herstellungsprozesse dementsprechend angepasst werden müssen. Die Werteskala zur Bewertung der technischen Schwierigkeit einer Konfiguration ist in Tabelle 4 gezeigt, zusammen mit den Anhaltspunkten, die zur Vergabe eines Wertes führen.

**Tabelle 4: Wertebereich der Bewertung der technischen Schwierigkeit eines Produkts in Entwicklung mit Beschreibung der Anhaltspunkte zur Vergabe eines Wertes**

Technische Schwierigkeit	Beschreibung der Anhaltspunkte
10 – Hoch	Die technische Schwierigkeit um die Anforderungen bezüglich der Konfiguration zu erreichen ist hoch. Dazu werden neue und komplexe Fertigungs- und Herstellprozesse benötigt. Die Toleranzfelder der funktionsbestimmenden Eigenschaften und Merkmale sind fein oder kleiner. Die zur Erreichung der Prozessstabilität erforderlichen Maßnahmen erfordern hohen Aufwand.
4 – Mittel	Die technische Schwierigkeit um die Anforderungen bezüglich der Konfiguration zu erreichen ist mittel. Bestehende Fertigungs- und Herstellprozesse können mit gewissen Anpassungen eingesetzt werden. Die Toleranzfelder der funktionsbestimmenden Eigenschaften und Merkmale sind im mittleren Bereich. Die zur Erreichung der Prozessstabilität erforderlichen Maßnahmen erfordern mittleren Aufwand.
1 – Gering	Die technische Schwierigkeit um die Anforderungen bezüglich der Konfiguration zu erreichen ist gering. Bestehende Fertigungs- und Herstellprozesse können ohne Anpassungen eingesetzt werden. Die Toleranzfelder der funktionsbestimmenden Eigenschaften und Merkmale sind im groben Bereich oder irrelevant für die Funktionsfähigkeit. Die zur Erreichung der Prozessstabilität erforderlichen Maßnahmen erfordern kaum Aufwand.

### 7.1.3 Bewertung der Relevanz für das Produkt

Der dritte und letzte Aspekt der Bewertung der Kritikalität einer Konfiguration, ist die Bewertung hinsichtlich der Relevanz dieser Konfiguration für das Produkt in Entwicklung.

<sup>268</sup> Vgl. Lederer und Karmarkar (1997), S. 125.

<sup>269</sup> Das Toleranzfeld kann durch Zuhilfenahme der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 in den Abstufungen grob, mittel, fein bewertet werden.

Hierbei treten besonders die Konfigurationen in den Vordergrund, die als Alleinstellungsmerkmale des Produkts in Entwicklung zu bezeichnen sind und damit maßgeblich für den Erfolg dieses Produkts sind. Ohne diese Alleinstellungsmerkmale sinkt die erwartete Begehrtheit des Produkts in Entwicklung massiv. Dies ist analog zu den Begeisterungsmerkmalen des Kano-Modells.<sup>270</sup>

In Gegensatz zum Kano-Modell wird an dieser Stelle die Relevanz der implementierten Konfigurationen betrachtet. Eine zu geringe Erfüllung von Basismerkmalen, die zur Unzufriedenheit der Kunden führt, wird daher nicht betrachtet. Der Betrachtungsbereich nach dem Kano-Modell ist in Abbildung 7-2 verdeutlicht.

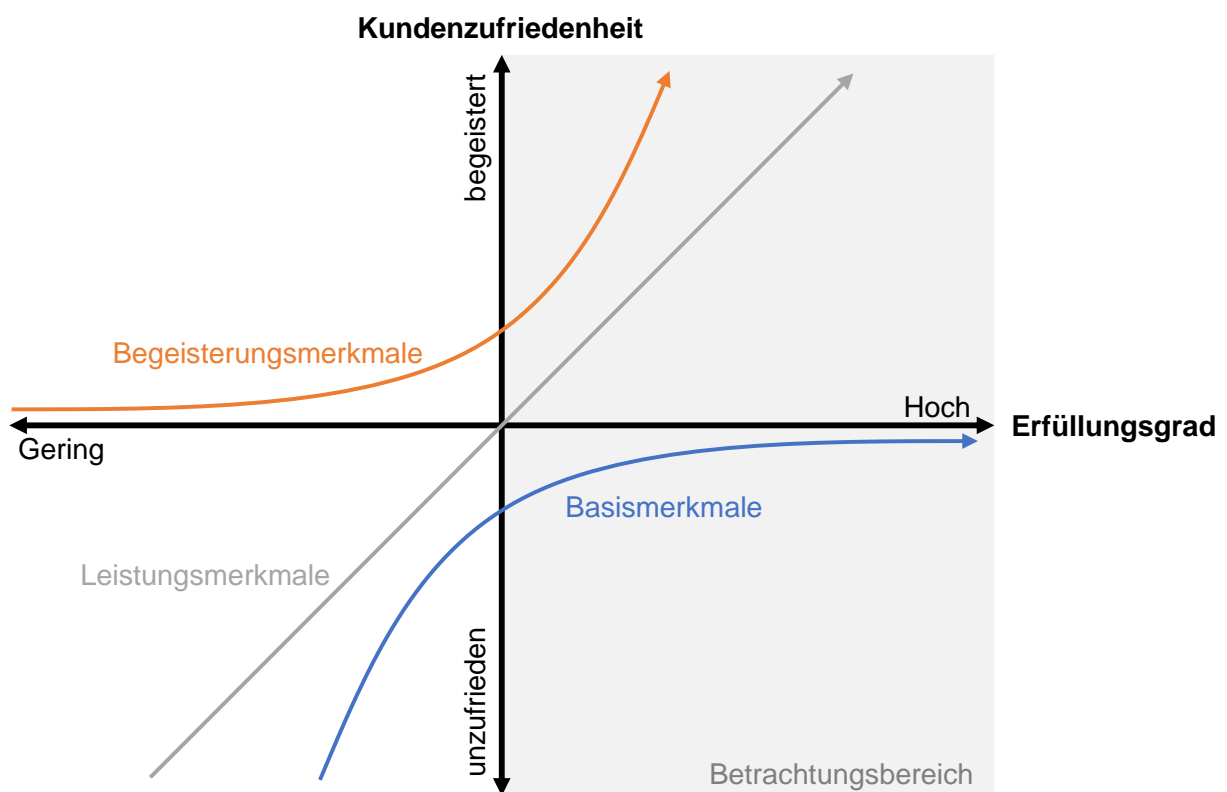


Abbildung 7-2: Veranschaulichung des Betrachtungsbereichs der Relevanz einer Konfiguration anhand des Kano-Modells<sup>271</sup>

Zur Bewertung der Relevanz wird darüber hinaus in Betracht gezogen, inwieweit eine Konfiguration von den an sie gestellten Anforderungen abweichen kann, bevor der Erfolg des Produkts in Entwicklung negativ beeinflusst wird. Mit der Höhe der als akzeptabel erwarteten Abweichungen sinkt die Relevanz der entsprechenden Konfiguration. Die Werteskala zur Bewertung der Relevanz einer Konfiguration ist in Tabelle 5 gezeigt, zusammen mit den Anhaltspunkten, die zur Vergabe eines Wertes führen.

<sup>270</sup> Vgl. Kano et al. (1984).

<sup>271</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Kano et al. (1984).

**Tabelle 5: Wertebereich der Bewertung der Relevanz eines Produkts in Entwicklung mit Beschreibung der Anhaltspunkte zur Vergabe eines Wertes**

Relevanz	Beschreibung der Anhaltspunkte
10 – Hoch	Die Konfiguration ist äußerst relevant und wird als Alleinstellungsmerkmal des Produkts in Entwicklung angesehen. Die Anforderungen an die Konfiguration müssen strengstens eingehalten werden und Abweichungen können zu starken Beeinträchtigungen der Begehrtheit führen, wodurch deutliche Nacharbeit durchgeführt werden muss.
4 – Mittel	Die Konfiguration ist von mittlerer Relevanz für das Produkt in Entwicklung. Abweichungen der Konfiguration von den gestellten Anforderungen führen zur Minderung der Funktionsfähigkeit, jedoch nicht zum totalen Verlust der Funktionalität und Begehrtheit oder lassen sich mit geringem Aufwand beheben. Die Konfiguration stellt kein Alleinstellungsmerkmal dar.
1 – Gering	Die Konfiguration hat kaum bis keine Relevanz für das Produkt in Entwicklung. Bei Abweichungen der Konfiguration von den an sie gestellten Anforderungen treten kaum einschränkende Effekte auf. Das Produkt in Entwicklung ist auch ohne die Konfiguration brauchbar. Die Konfiguration ist weit verbreitet.

## 7.2 Modellierung und Analyse der inneren Struktur des Produkts

Um den Umfang des zu entwickelnden Prototyps zu reduzieren, ist neben der Identifikation der kritischen Konfigurationen auch das Verständnis über die Zusammenhänge innerhalb des Produkts in Entwicklung essentiell, um einerseits Störgrößen auf die Konfigurationen zu identifizieren und andererseits, um Anhaltspunkte zur zulässigen Isolation einzelner Subsysteme zu erhalten. Idealerweise werden daher Prototypen derart isoliert aufgebaut, dass zunächst die reine Funktionalität einzelner kritischer Konfigurationen ohne das Einwirken von Störgrößen überprüft werden kann. Sind mehrere, sich gegenseitig beeinflussende Konfigurationen oder Störgrößen im Prototyp abgebildet, ist zu prüfen, inwiefern die Ergebnisse der Versuche Aussagen über die jeweiligen Konfigurationen zulassen. Wird beispielsweise eine kritische Konfiguration samt Störgrößen abgebildet und die gesammelten Informationen geben Anlass zur Verneinung der Frage nach der Brauchbarkeit der Konfiguration, so kann die Fehlerursache entweder an der Brauchbarkeit der Konfiguration an sich oder dem Einwirken einer Störgröße liegen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 7-3. Nachdem die Funktionalität einer Konfiguration bestätigt ist, muss im Rahmen folgender Prototypingaktivitäten weiter untersucht werden, inwieweit der Einfluss von Störgrößen die Konfiguration stört, beziehungsweise wie dieser Einfluss verhindert werden kann.

Um die innere Struktur des Produkts in Entwicklung zu modellieren, wird ein der Funktionsstruktur, beziehungsweise dem Gesamtfunktionsmodell, ähnlicher Ansatz gewählt.<sup>272</sup> Die Funktionsstruktur besteht dabei in vielen Fällen bereits, da sie vorrangig im Konzept-

<sup>272</sup> Vgl. Roth (2000), S. 81.

prozess der Produktentwicklung genutzt wird. Die Funktionstruktur bildet den Zusammenhang der Teilfunktionen sowie den Fluss von Energie, Signalen und Stoffen durch das System ab und zeigt auf, wie diese Größen während des Flusses verändert werden. Im Rahmen der Entwicklung sensorintegrierender Maschinenelemente sind dabei besonders die Signalflüsse interessant, da deren Kernidee in der Nutzung mechanischer Signale und der Wandlung dieser in elektrische Signale besteht.<sup>273</sup>

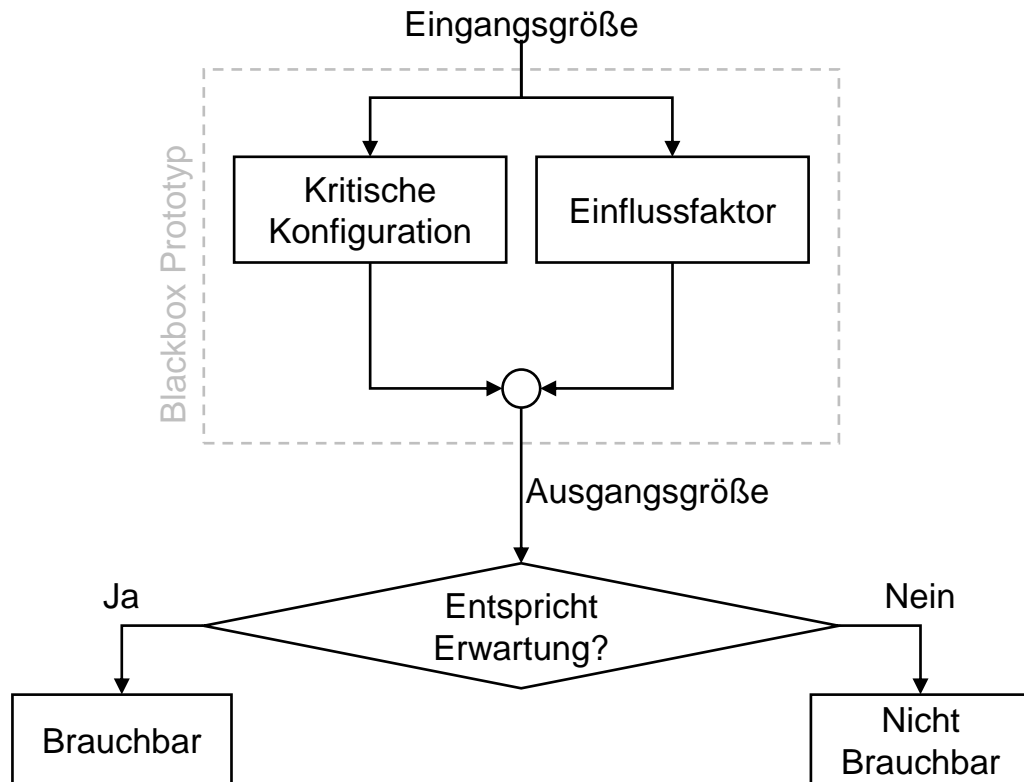


Abbildung 7-3: Einfluss der inneren Struktur und der Störgrößen auf das Ergebnis der prototypischen Versuche<sup>274</sup>

Die modellierte innere Struktur des Produkts in Entwicklung kann daraufhin hinsichtlich der Störgrößen, die auf einzelne Konfigurationen einwirken, analysiert werden. Bezogen auf die Entwicklung sensorintegrierender Maschinenelemente stehen dabei die Zusammenhänge zwischen dem mechanischen Eingangssignal und dem elektrischen Ausgangssignal sowie die Identifikation der darauf wirkenden Störgrößen im Vordergrund. Dazu muss zunächst das mechanische Eingangssignal identifiziert werden. Da dieses jedoch im Allgemeinen bereits zur Entwicklung des Konzepts des Produkts herangezogen wurde, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass das mechanische Eingangssignal bereits bekannt ist. Das mechanische Eingangssignal wird durch die Komponenten des Produkts in Entwicklung zum elektrischen Ausgangssignal gewandelt. Diese Wandlung kann über mehrere Zwischenschritte, beispielsweise verschiedene Bauteile und Transformationen, erfolgen. Daher wird zunächst das mechanische Eingangssignal als initiales Signal definiert:

<sup>273</sup> Vgl. Vorwerk-Handing et al. (2019).

<sup>274</sup> Eigene Darstellung.

**Initiales Signal**

Def. 14

*Das initiale Signal beschreibt das mechanische Eingangssignal, das zum Rückschluss auf die Zielgröße genutzt wird.*

Um dieses Signal sowie dessen umgewandeltes und transformiertes Signal von den Störgrößen zu unterscheiden, werden diese im Rahmen dieser Arbeit als nutzbares Signal beschrieben:

**Nutzbares Signal**

Def. 15

*Das nutzbare Signal beschreibt das initiale Signal in dessen Ausgangsform sowie in dessen transformierten und umgewandelten Formen.*

Um sicherzugehen, dass das mittels sensorintegrierendem Maschinenelement erzielte Messergebnis aussagekräftig bezüglich der Zielgröße ist, muss die Übertragungsfunktion zwischen Messgröße und Zielgröße beschreibbar, zumindest in Form einer Blackbox oder einem empirisch ermittelten Kennfeld, sein. Störende Signale, die auf das nutzbare Signal einwirken, führen zu Beeinflussungen dieser Übertragungsfunktion und damit zu fehlerhaften Messergebnissen. Die Störgrößen treten dabei entlang des Flusses des nutzbaren Signals auf, bezogen auf mechanische Signale besonders am Kontakt der Wirkflächen angrenzender Komponenten.

Um diese Wirkflächen zu identifizieren kann das *Contact & Channel-Modell* verwendet werden.<sup>275</sup> Die identifizierten Wirkflächen ergeben in Verbindung mit dem Zusammenhang der Teilfunktionen das Signalflussmodell in Abbildung 7-4. Jede Wirkfläche entlang des Flusses des nutzbaren Signals kann anhand dessen hinsichtlich der möglichen hervorgerufenen Störgrößen analysiert werden. Diese Analyse wird beispielsweise durch die Verwendung von Konstruktionskatalogen<sup>276</sup> unterstützt, indem ausgehend von den identifizierten Wirkflächen die an diesen Wirkflächen übertragbaren mechanischen Signale, deren Ausprägung und Größe mit dem nutzbaren Signal vergleichbar sind, herausgesucht werden. Diese müssen daraufhin hinsichtlich der Höhe der Beeinflussung im vorliegenden Fall bewertet werden.

Abbildung 7-4 zeigt das allgemeine Modell des Signalflusses auf der linken Seite mit  $n$  mechanischen Komponenten, einem Sensorelement und  $m$  elektrischen Komponenten sowie der Auswerteeinheit. Das nutzbare Signal und dessen Transformationen sind zwischen diesen Komponenten dargestellt. Daneben sind die verschiedenen, möglichen Quellen von Störgrößen bezogen auf die jeweiligen Komponenten visualisiert, die entweder an den Wirkflächen der Komponenten oder durch externe Felder, beispielsweise elektrische oder magnetische, auftreten können. Weitergehend sind auf der rechten Seite exemplarisch mögliche Störgrößen aufgezeigt.

<sup>275</sup> Vgl. Albers und Wintergerst (2014).

<sup>276</sup> Vgl. Roth (2000).

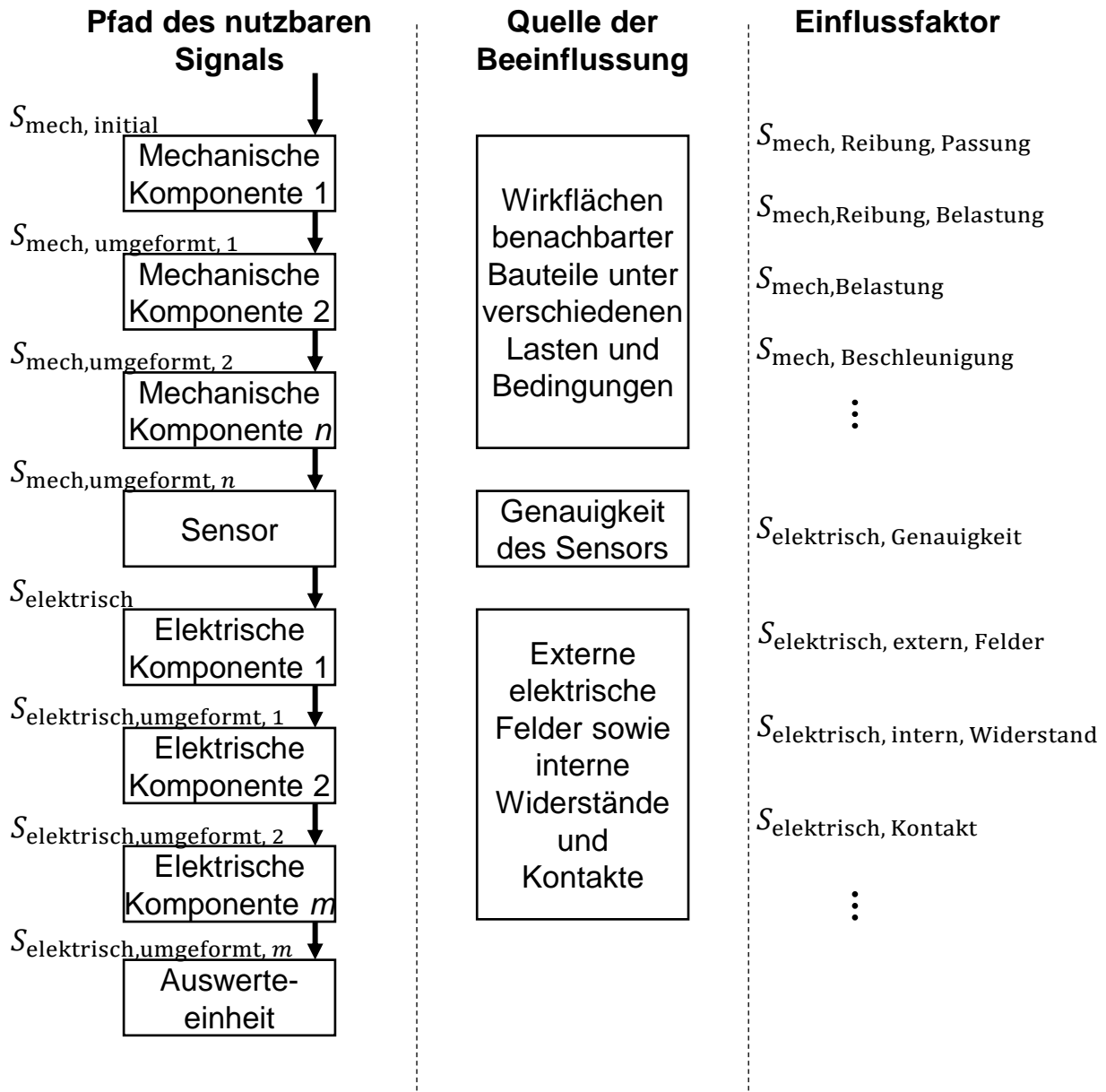
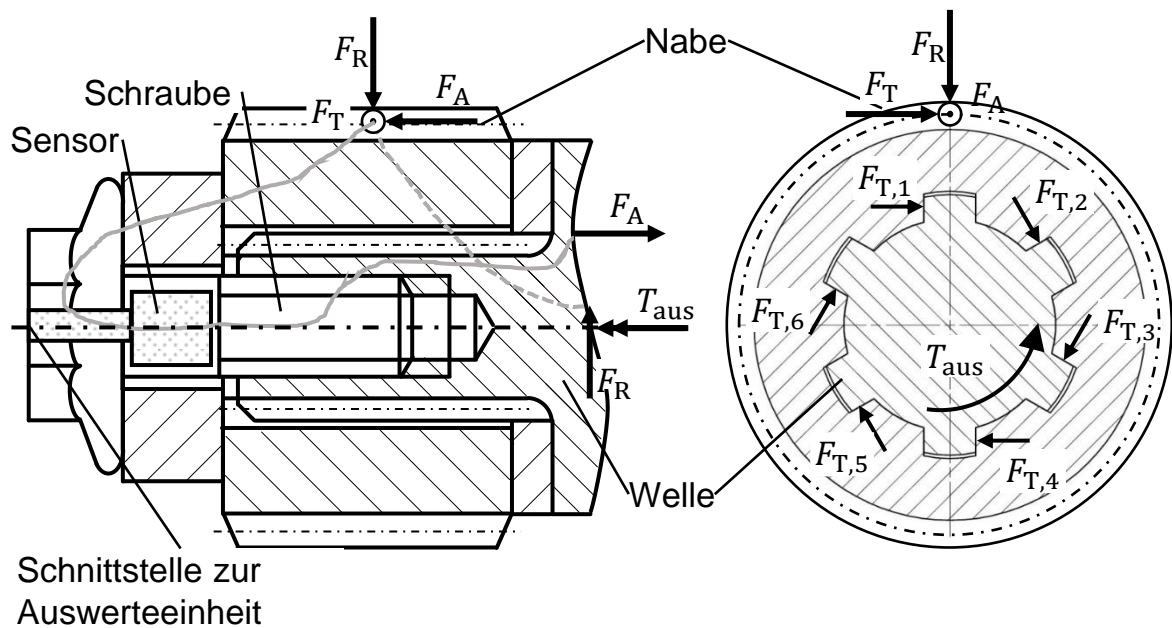


Abbildung 7-4: Allgemeines Modell des Signalflusses des nutzbaren Signals (links), verschiedene mögliche Quellen von Störgrößen, die an den jeweiligen Komponenten auftreten können (Mitte) und exemplarische Signale, die als Störgrößen auf das nutzbare Signal einwirken (rechts)<sup>277</sup>

Bei der Identifikation der Störgrößen ist es hilfreich, wenn diese sofort dahingehend unterschieden werden, ob diese Signale eine Abhängigkeit zu weiteren Systemgrößen aufweisen. Dabei lassen sich beispielsweise stationäre und dynamische Signale unterscheiden. Stationäre Signale umfassen unter anderem Reibkräfte, die infolge von Pressverbindungen zwischen Bauteilen auftreten, wohingegen dynamische Reibkräfte durch die auf Bauteile wirkenden Radialkräfte in Betrieb hervorgerufen werden. Die letztgenannten hängen damit von äußeren Kräften ab und ändern ihre Höhe während des Betriebs. Als vertiefendes Beispiel wird dazu die in Abbildung 7-5 gezeigte sensorintegrierende Welle-Nabe-Verbindung herangezogen. Hierbei handelt es sich um eine Keilwellenverbindung,

<sup>277</sup> Eigene Darstellung.

bei der zur axialen Sicherung der Nabe eine axialkraftmessende Sensorschraube verwendet wird um auf das übertragene Drehmoment schließen zu können. Dabei wird das mechanische Eingangssignal zunächst in Form des Drehmoments im Zahneingriff der schrägverzahnten Zahnradpaarung eingeleitet wird. Im Zahneingriff wird das Drehmoment in die drei Kraftkomponenten – Axialkraft, Radialkraft und Tangentialkraft – aufgeteilt, wobei die Axialkraftkomponente als nutzbares Signal weiterverfolgt wird. Diese Axialkraft wird über die weiteren Komponenten bis hin zur Schraube geleitet, an der sich die Längenänderung als nutzbares Signal einstellt. An den Wirkflächen zwischen dem Zahnrad und der Keilwellenverbindung können nun zwei Störgrößen identifiziert werden. Einerseits tritt infolge der Vermeidung von Spiel zwischen den Komponenten eine Übermaßpassung auf, die eine stationäre Reibkraft hervorruft und somit dem nutzbaren Signal entgegenwirkt. Andererseits wirken die Radial- und Tangentialkraftkomponenten des übertragenen Drehmoments auf die Verbindung, wodurch zusätzliche dynamische Reibkräfte entstehen. Das Sensorelement im Inneren der verwendeten Sensorschraube wandelt die auftretende Dehnung in ein elektrisches Signal, das daraufhin aus dem rotierenden System an die Auswerteeinheit geleitet wird.



**Abbildung 7-5: Sensorintegrierende Welle-Nabe-Verbindung.** Das Eingangsdrehmoment wird durch die Schrägverzahnung im Zahneingriff in eine Axial-, Radial- und Tangentialkraft umgeformt. Die Axialkraft als nutzbares Signal wird in eine Verformung der Schraube gewandelt, die auf das Sensorelement übertragen wird. Der Sensor wandelt das nutzbare Signal in ein elektrisches Signal<sup>278</sup>

Neben der Identifikation der Störgrößen dient die Modellierung und Analyse des Signalflusses auch der Identifikation der gegenseitigen Beeinflussung von Konfigurationen untereinander. Dies ist notwendig um eine Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der zulässigen Isolierung von Subsystemen zu entwickeln. Im isolierten Subsystem muss der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße soweit beschreibbar sein, dass Abweichungen der Erwartungen auf deren Ursache zurückgeführt werden können. Werden im

<sup>278</sup> Eigene Darstellung.

isolierten Subsystem mehrere Störgrößen oder sich beeinflussende Konfigurationen abgebildet, so tritt das in Abbildung 7-3 visualisierte Phänomen ein und die Aussagekraft der durchgeführten Versuche wird verringert, da im Rahmen des Post-Processings<sup>279</sup> die gesammelten Informationen nicht eindeutig in Wissen überführt werden können. Auch dieser Zusammenhang kann am Beispiel der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung in Abbildung 7-5 verdeutlicht werden.

Die Übertragung des elektrischen Signals des Sensors soll in diesem Fall mittels eines rotierenden Kontakts an der Stirnseite des Kopfs der Schraube an die nichtrotierende Auswerteeinheit übertragen werden. Bei dieser Art des Kontakts sind Störgrößen auf das elektrische Signal, beispielsweise in Form eines Rauschens, zu erwarten. Wird nun ein Prototyp der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung aufgebaut, der den gesamten Signalfluss von der Einleitung des Drehmoments bis zur Übertragung des elektrischen Signals abbildet, so kann bei einer Abweichung zwischen dem Messwert und dem erwarteten Wert keine Aussage darüber getroffen werden, an welcher Stelle des Signalflusses die entscheidenden Störgrößen auftreten.<sup>280</sup> Der prototypische Versuch würde damit zu dem Ergebnis führen, dass das Konzept in dieser Form nicht funktionsfähig ist. Um das Konzept jedoch effizient zu überarbeiten, ist die Identifikation der relevanten Störgrößen essentiell. Da dies mit der durchgeführten Prototypingaktivität nicht möglich ist, ist diese weder effektiv noch effizient. Hingegen können durch die Identifikation der Beeinflussung zwei Prototypen entwickelt werden, die einerseits den Signalfluss des mechanischen Signals, beginnend bei der Einleitung des Drehmoments hin zur Dehnung der Schraube und andererseits den Signalfluss des elektrischen Signals, die Übertragung von der rotierenden Schraube zur Auswerteeinheit, umfassen. Die Informationen, die mit diesen Prototypen gesammelt werden, können mittels getrenntem Post-Processing analysiert und in Wissen darüber überführt werden, welche Störgrößen in den Subsystemen eine Auswirkung auf die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems haben

### 7.3 Das House of Configurations zur Ableitung bezogener Anforderungen

Zur Festlegung von Anforderungen an Prototypen wird die in Kapitel 6 vorgestellte dreischrittige Herangehensweise verwendet. Aufbauend auf den Analysen in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels, sollen nun die im dritten Schritt der Herangehensweise in Abbildung 6-1 beschriebenen *bezogenen Anforderungen* von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abgeleitet werden.

Zur Ableitung der Anforderungen an den Prototyp aus den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung unter dem Gesichtspunkt der Reduktion des Umfangs des Prototyps zur Steigerung der Effizienz der Prototypingaktivität, werden den zuvor identifizierten und bewerteten Konfigurationen die Eigenschaften und Merkmale der Produktkomponenten zugeordnet und bewertet, inwiefern diese Einfluss auf die jeweilige Konfiguration nehmen. Dadurch können die Merkmale und Eigenschaften identifiziert werden, die nur geringen Einfluss auf die jeweilige Konfiguration haben und deren Anforderungen daher gelockert<sup>281</sup> oder vernachlässigt werden können, ohne dass dadurch das Ergebnis der Prototypingaktivität beeinträchtigt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei der Eigenschafts- und Merkmalsbegriff nach VDI Richtlinie 2221 verwendet, die auf der Beschreibung von

---

<sup>279</sup> Siehe dazu Abschnitt 5.3

<sup>280</sup> Vgl. Abbildung 7-3 und entsprechender Erklärung

<sup>281</sup> Vgl. Dunlap et al. (2014), S. 4.

EHRENSPIEL UND MEERKAMM (2017b) aufbauen. Demnach sind Eigenschaften die aufgrund von Beobachtungen, Messergebnissen und allgemein akzeptierten Aussagen von einem Objekt festgestellten Ergebnisse. Merkmale beschreiben darüber hinaus Eigenschaften, die besonders herausgehoben werden sollen. Auf eine detailliertere Unterscheidung, wie sie beispielsweise im Rahmen des durch WEBER ET AL. (2003) im Rahmen des CPM/PPD (*Characteristics-Properties Modelling / Property-Driven Development*) vorgestellte Ansatz vorgenommen wird, wird an dieser Stelle verzichtet.<sup>282</sup>

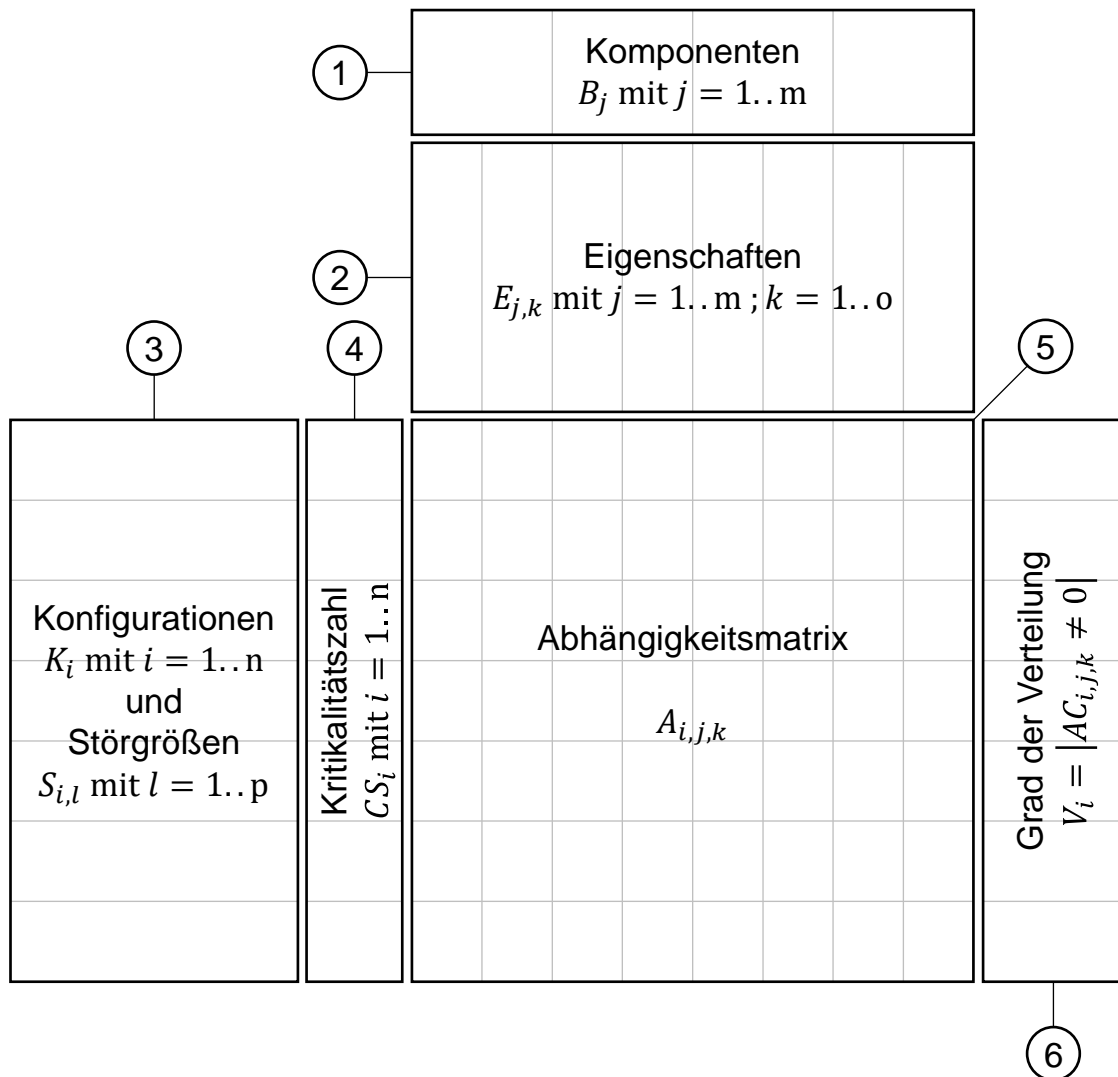


Abbildung 7-6: Schematischer Aufbau des House of Configurations<sup>283</sup>

Zur Zuordnung der Konfigurationen zu den Eigenschaften und Merkmalen der Komponenten des Produkts in Entwicklung und der Bewertung der Einflussstärke dieser Eigenschaften und Merkmale wird eine Darstellungsform angelehnt an das *House of Quality*<sup>284</sup> herangezogen. Damit ergibt sich das *House of Configurations*, dessen schematischer Aufbau in Abbildung 7-6 dargestellt ist und im Folgenden näher erläutert wird. Die dargestellte

<sup>282</sup> Vgl. Weber et al. (2003), S. 1.

<sup>283</sup> Eigene Darstellung.

<sup>284</sup> Vgl. Kano et al. (1984).

Nummerierung dient dabei lediglich der Orientierung und Zuordnung im Text. Bezüglich der Zählvariablen ist zu beachten, dass ein Produkt in Entwicklung aus  $j$  Komponenten, denen jeweils  $k$  Eigenschaften und Merkmale zugeordnet werden können, besteht und  $i$  Konfigurationen aufweist.

Im oberen Rechteck (1) werden alle *Komponenten*  $B_j$  des Produkts in Entwicklung eingetragen und in das Rechteck (2) darunter die zu den Komponenten gehörigen Eigenschaften und Merkmale  $E_{j,k}$ .

Im Rechteck links (3) werden anschließend die identifizierten *Konfigurationen*  $K_i$  eingetragen. Zu jeder dieser Konfigurationen werden zusätzlich die in Abschnitt 7.2 ermittelten Störgrößen  $S_{i,l}$  eingetragen. Das Rechteck rechts davon (4) steht zur Eintragung der zu den Konfigurationen zugehörigen Kritikalitätszahlen  $CS_i$ , die sich aus der Bewertung mittels des Kritikalitätsarrays in Abschnitt 7.1 ergeben, zur Verfügung

Das Rechteck in der Mitte (5) dient der Zuordnung der Konfigurationen zu den Eigenschaften und Merkmalen der Komponenten und der Bewertung der Höhe der Abhängigkeit. Dadurch ergibt sich die Abhängigkeitsmatrix. Der Wertebereich der Abhängigkeitszahl  $A_{i,j,k}$ , mit der die Abhängigkeit der Funktionalität der Konfigurationen von den Eigenschaften und Merkmalen bewertet werden kann, beträgt analog zum Wertebereich der Bewertung der Kritikalität in Abschnitt 7.1 eins bis zehn. Darüber hinaus kann eine null vergeben werden, wenn die entsprechenden Eigenschaften und Merkmale keinen Einfluss auf die jeweilige Konfiguration haben. Der Wertebereich ist in Tabelle 6 angegeben. Die zu vergebenden Werte verhalten sich ebenfalls progressiv.

**Tabelle 6: Wertebereich zur Bewertung der Abhängigkeit der Konfigurationen von den entsprechenden Eigenschaften und Merkmalen der Komponenten des Produkts in Entwicklung**

Abhängigkeitszahl	Beschreibung
10	Die Funktionalität der Konfiguration hängt stark von der entsprechenden Eigenschaft ab. Abweichungen der Eigenschaft führen zu starken Beeinträchtigungen der Konfiguration.
4	Die Funktionalität der Konfiguration wird durch die Eigenschaft beeinflusst, geringe Abweichungen führen jedoch nicht zum Verlust der Funktionalität.
1	Die Funktionalität der Konfiguration wird kaum durch die Eigenschaft beeinflusst. Auch deutliche Abweichungen führen nicht zum Verlust der Funktionalität.
0	Die Funktionalität der Konfiguration wird durch die Eigenschaft nicht beeinflusst.

Darüber hinaus kann die Anzahl der von null verschiedenen Abhängigkeiten zeilenweise aufsummiert werden und diese Summe in das rechte Rechteck (6) eingetragen werden. Die dadurch erhaltenen Werte beschreiben den *Grad der Verteilung*  $V_i$  der Konfigurationen, der die Vernetzung und damit Komplexität einer Konfiguration aufzeigt.

Anhand der ermittelten Werte im House of Configurations können verschiedene Schlüsse über das Produkt in Entwicklung und die Ableitung von Anforderungen an Prototypen auf Basis der Anforderungen an das Produkt in Entwicklung gezogen werden:

- Der *Kritikalitätswert* zeigt den generellen Bedarf an Prototypen bezüglich der dazugehörigen Konfiguration. Dies entspricht der Dokumentation der in Abschnitt 7.1 beschriebenen Bewertung der Kritikalität.
- Die *Abhängigkeitswerte* einer Konfiguration und Störgrößen von den entsprechenden Eigenschaften und Merkmalen geben Anhaltspunkte dazu, ob Anforderungen bezüglich der Eigenschaften und Merkmale für den zu entwickelnden Prototyp gelockert werden dürfen, ohne die Aussagefähigkeit der Ergebnisse der Prototypingaktivität negativ zu beeinflussen. Bei hohen Werten ist eine möglichst genaue Übernahme der Anforderungen an die jeweilige Eigenschaft in die Anforderungsliste des Prototyps vorzusehen. Bei niedrigeren Werten ergibt sich jedoch die Möglichkeit der Lockerung der Anforderungen bis hin zum Entfall der Anforderung. Beeinflussen nur wenige Eigenschaften einer Komponente die Konfiguration, kann geprüft werden, ob die Komponente durch eine andere mit geringerem funktionalem Umfang ersetzt werden kann.
- Der *Grad der Verteilung* dient zur Beurteilung der Möglichkeit der Isolierung von Subsystemen beziehungsweise dem prototypischen Test einzelner Konfigurationen. Ein geringer Grad der Verteilung deutet darauf hin, dass bei den entsprechenden Konfigurationen keine komplexen Phänomene zu erwarten sind und diese Konfigurationen daher isoliert vom Rest des Produkts in Entwicklung überprüft werden können. Auch zeigt der Grad der Verteilung, welche Komponenten zur Untersuchung einer Konfiguration im Prototyp abgebildet werden müssen.

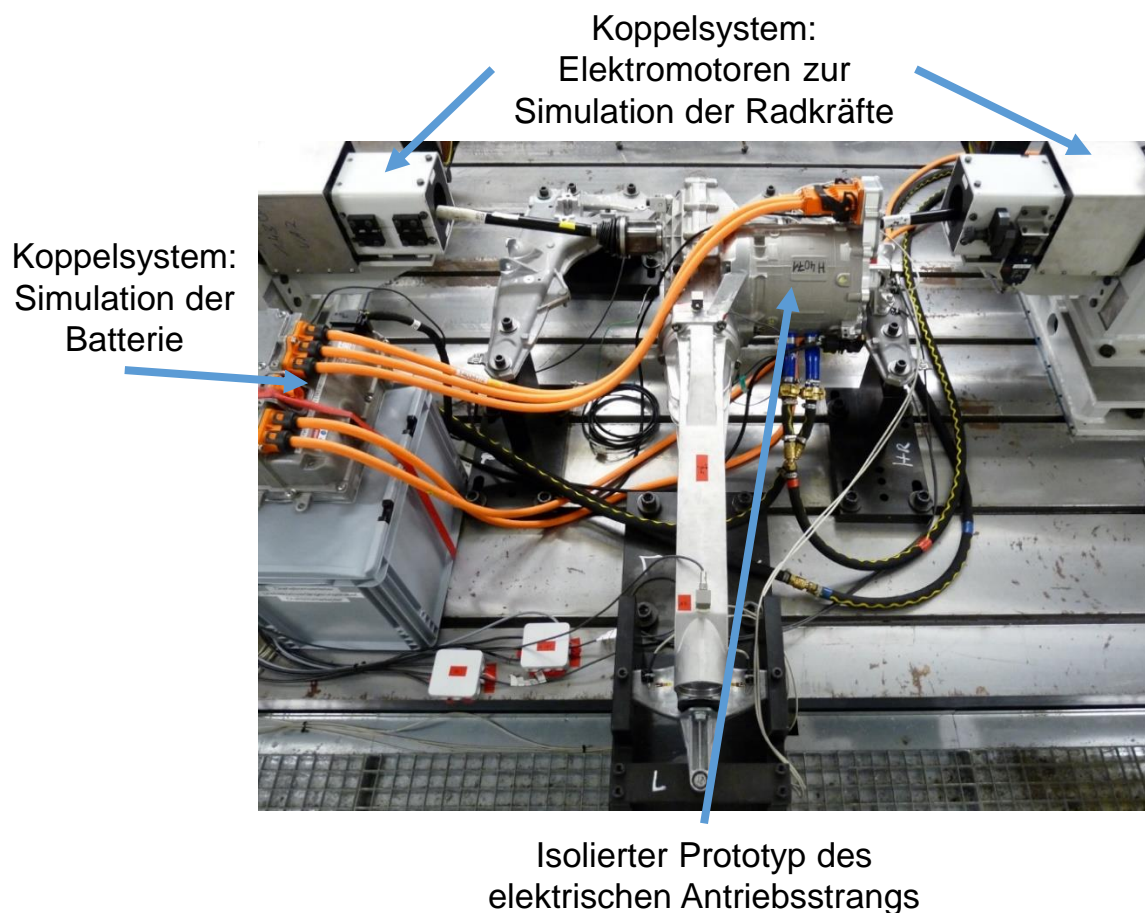
#### 7.4 Einteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ergibt die Partitionierung des Gesamtsystems in Teilsysteme, die isoliert mittels Prototypen getestet werden können, einen Vorteil hinsichtlich der Effizienz der Prototypingaktivität. Durch den Einsatz des House of Configurations in Abschnitt 7.3 wird die Basis für diese Partitionierung gelegt. Nichtsdestotrotz müssen besonders in späteren Phasen der Produktentwicklung vollständige Prototypen eingesetzt werden, um das Auftreten von *unbekannten Unbekannten* (englisch: unknown unknowns)<sup>285</sup> im Produkt zu vermeiden. Die hier beschriebenen Möglichkeiten zur Isolierung von Subsystemen beziehen daher besonders auf frühere Phasen der Produktentwicklung.

Die Partitionierung wird mit Hilfe der mit dem HoC gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Verbindungen zwischen den Störgrößen und den Konfigurationen durchgeführt. Das Ziel der Partitionierung ist es, mögliche Quellen von Störgrößen zu isolieren, um die eventuellen Auswirkungen dieser Störungen zu untersuchen, zum Beispiel in Bezug auf deren Schwere und die Möglichkeiten zur Einführung von Abhilfemaßnahmen. Treten keine Störungen auf, kann die Funktionalität der Konfiguration als nachgewiesen betrachtet werden. Durch die Minimierung des Umfangs des Prototyps wird die Effizienz in Bezug auf die verwendeten Materialien erhöht und verbessert. Ein weiterer Vorteil der Partitionierung ist der Ausschluss störender Faktoren anderer Komponenten und Konfigurationen

<sup>285</sup> Vgl. Sutcliffe und Sawyer (2013), S. 93.

des Systems auf die getestete Konfiguration. Allerdings müssen die Schnittstellen der beteiligten Teilsysteme hinsichtlich der über diese Schnittstellen übertragenen Systemgrößen analysiert werden. Wenn die übertragenen Größen für die Funktion des getesteten Subsystems relevant sind, müssen die Größen im Prototyp berücksichtigt werden und sind nicht zu vernachlässigen. Je nach Ausprägung dieser Größen und der Interaktion zwischen dem isolierten System und dem übrigen System ist der Einsatz von Sensor-Aktor-Schnittstellen, vergleichbar mit den in XiL-Plattformen eingesetzten Koppelsystemen<sup>286</sup>, erforderlich, wie in Abbildung 7-7 gezeigt. Zur Simulation der im Fahrbetrieb auftretenden Reaktionskräfte zwischen Straße und Reifen werden Elektromotoren eingesetzt. Der Prototyp wird im Prüfstand nicht durch eine Batterie mit Strom versorgt, sondern durch Netzstrom. Dieser wird jedoch mittels Simulationsmodell einer Batterie angepasst, sodass deren Auswirkungen auf den Prototyp mitberücksichtigt werden.



**Abbildung 7-7: Isolierter Prototyp eines elektrischen Antriebsstrangs im Hardware-in-the-Loop Prüfstand.**<sup>287</sup>

Das Gesamtsystem kann auf verschiedene Weisen unterteilt werden, entsprechend dem Verständnis des Begriffs System als organisierte Einheit aus Elementen unterschiedlicher

<sup>286</sup> Vgl. Albers und Düser (2010).

<sup>287</sup> Darstellung basierend auf [https://www.lbf.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/eGeneration\\_Simulation-Pruefung-elektrischer-Antriebsstrange.html](https://www.lbf.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/eGeneration_Simulation-Pruefung-elektrischer-Antriebsstrange.html) erweitert um eigene Beschriftung

Art und Verbindung.<sup>288</sup> Ein offensichtlicher Ansatz ist eine strenge geometrische Unterteilung, zum Beispiel beim Testen von Teilsystemen, die vom Rest des Systems isoliert sind. Darüber hinaus erscheint die funktionale Partitionierung auf der Grundlage der Teilfunktionen des Gesamtsystems in Bezug auf Effizienz und Effektivität vorteilhaft. Mit diesem Ansatz können die relevanten Teilfunktionen, die die Konfigurationen des Systems ermöglichen, isoliert getestet werden, ohne dass Teilfunktionen bei der Entwicklung und Fertigung des Prototyps berücksichtigt werden müssen, die entweder nicht für den Test mit dem Prototyp vorgesehen sind, ressourcenintensiv sind oder die Testergebnisse beeinträchtigen können.

## 7.5 Substitution von Teillösungen

Neben den Möglichkeiten, Teilsysteme zu isolieren und die Anforderungen an die Eigenschaften zu lockern, können Teillösungen für Teilfunktionen ersetzt werden, um den Umfang des Prototyps und den damit verbundenen Aufwand weiter zu reduzieren. Hinweise auf die Möglichkeit der Substitution einer Teillösung geben die Ergebnisse der Analyse des HoC in Abschnitt 7.3 und der Signalflussanalyse in Abschnitt 7.2. Bestimmte Konfigurationen hängen von Systemgrößen ab, deren Quelle auf bestimmte Komponenten zurückzuführen ist, wobei sie ansonsten nicht von den Eigenschaften und Merkmalen der Komponente abhängen. Ein Hinweis auf diese Systemwerte ist durch die Abhängigkeitsmatrix im HoC gegeben. Ist die Abhängigkeit gering bis mittel und nur für bestimmte Eigenschaften und Merkmale einer Komponente vorhanden, liegt es nahe, dass die Konfiguration zwar auf diese Eigenschaften und Merkmale angewiesen ist, die Komponente jedoch durch eine andere ausgetauscht werden kann, die diese Eigenschaften und Merkmale auch besitzt, dabei jedoch nicht über die nichtbeeinflussenden Eigenschaften und Merkmale verfügt. Diese Komponenten können durch Komponenten ersetzt werden, die die Erfüllung der gleichen oder einer ähnlichen Funktion ermöglichen, aber einerseits die Möglichkeit bieten, den Umfang des Prototyps zu reduzieren, um den Aufwand zu verringern und andererseits die Menge der Störfaktoren, die die Verwendung der ursprünglichen Komponente mit sich bringen kann, verringern.

Ein Beispiel kann mit der in Abbildung 7-5 gezeigten sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung gegeben werden. Für die Konfiguration „Leiten des Sensorsignals zur Auswerteeinheit“ ist die Herkunft des elektrischen Signals nicht von Bedeutung. Die Konfiguration hängt daher nicht von den Eigenschaften und Merkmalen des Sensorelements oder den mechanischen Komponenten ab. Das bedeutet, dass das elektrische Signal nicht mittels des Sensors aus dem mechanischen Signal erzeugt werden muss. In diesem Fall kann ein Signalgenerator verwendet werden, um die vom Sensor erbrachte Teilfunktion „Erzeugen des elektrischen Signals“ zu ersetzen. Gleiches gilt für die Konfiguration „Leiten des mechanischen Signals zum Sensor“. Die Teilfunktion „Umformen des Drehmoments in Axialkraft“ zur Erzeugung des mechanischen Signals, die im Konzept des Produkts in Entwicklung durch die Schrägverzahnung im Zahneingriff erbracht wird, kann durch einen externen Aktor ersetzt werden, der eine Axialkraft direkt auf das Zahnrad ausübt. Wird ein Aktor mit einer hohen Dynamik gewählt, können Schwingungen der Axialkraft, die von unterschiedlichen Zähnezahlen und Überdeckungen herrühren, simuliert werden.

---

<sup>288</sup> Vgl. Unterabschnitt 2.4.1

Um andere Teillösungen für Teilfunktionen zu finden, kann die morphologische Analyse verwendet werden.<sup>289</sup> Der Vorteil dabei ist, dass bereits während des Entwurfsprozesses ein morphologischer Kasten ausgearbeitet werden kann. Dieser vorhandene morphologische Kasten kann wiederverwendet und erweitert werden, wenn die vorhandenen Einträge nicht ausreichend erscheinen. Wenn Teilfunktionen für den Prototyp nicht erforderlich sind, kann die Implementierung dieser Funktionen im morphologischen Kasten durch Auswahl eines leeren Feldes dokumentiert werden, wie in Abbildung 7-8 dargestellt.

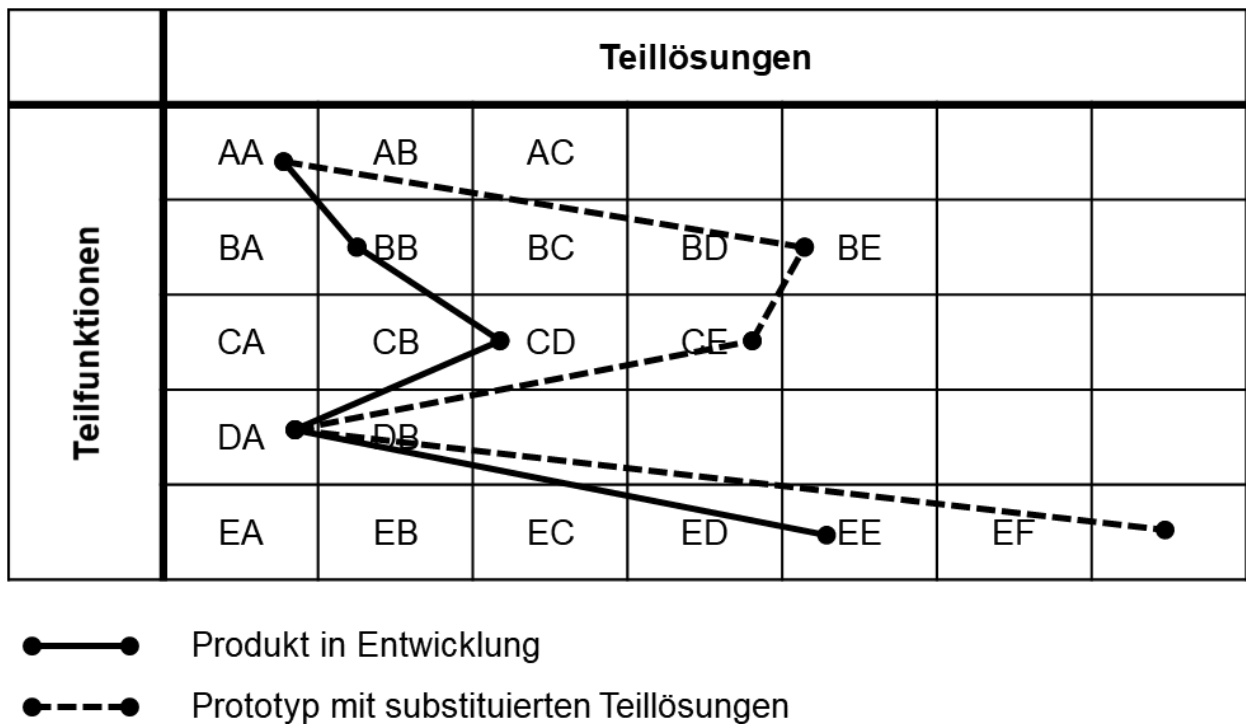


Abbildung 7-8: Schematische Darstellung des morphologischen Kastens mit zwei Kombinationen von Teillösungen für Teilfunktionen. Der gestrichelte Pfad zeigt dabei die Kombination mit substituierten Teillösungen der Teillösungen B und C. Die Teilfunktion E wird im Prototyp nicht abgebildet<sup>290</sup>

<sup>289</sup> Vgl. Zwicky (1967).

<sup>290</sup> Eigene Darstellung

## 8 Beispiele und Verifikation

Zur Verifikation und Verdeutlichung der Anwendbarkeit des in Kapitel 7 vorgestellten House of Configurations und der Signalflussanalyse zur Unterstützung der Bildung von Subsystemen zur isolierten Untersuchung mittels Prototypen und der Ableitung von Anforderungen, werden in diesem Kapitel drei Beispiele vorgestellt, anhand derer die Anwendung der Vorgehensweise aufgezeigt wird.

Bei den drei Beispielen handelt es sich um die sensorintegrierende Federstegkupplung in Abschnitt 8.1, die bereits im Rahmen der Motivation in Abschnitt 1.1 und der Verifikation des detaillierten Prozessmodells der Prototypen in Unterabschnitt 5.3.2 herangezogen wurde sowie eine sensorintegrierende Welle-Nabe-Verbindung in Abschnitt 8.2 und eine sensorintegrierende elastische Klauenkupplung in Abschnitt 8.3.

### 8.1 Entwicklung eines Prototyps einer sensorintegrierenden Federstegkupplung

Das erste Beispiel behandelt die Entwicklung eines Prototyps einer sensorintegrierenden Federstegkupplung. Bei der sensorintegrierenden Federstegkupplung handelt es sich um eine nicht schaltbare Ausgleichkupplung, die mittels eines integrierten Sensorelements den Versatz der verbundenen Wellen ermitteln kann. Federstegkupplungen, wie in Abbildung 8-1 gezeigt, sind torsionssteif, wodurch das Drehmoment dämpfungsfrei übertragen wird und die Drehzahl der Wellen drehwinkeltreu ist. Durch die eingebrachten Einschnitte verfügen Federstegkupplungen über einen Ausgleichkörper, der sich hinsichtlich axialem, angularem und radialem Versatz elastisch verhält. Die verschiedenen Versatzarten, die durch Federstegkupplungen ausgeglichen werden, sind ebenfalls in Abbildung 8-1 dargestellt.

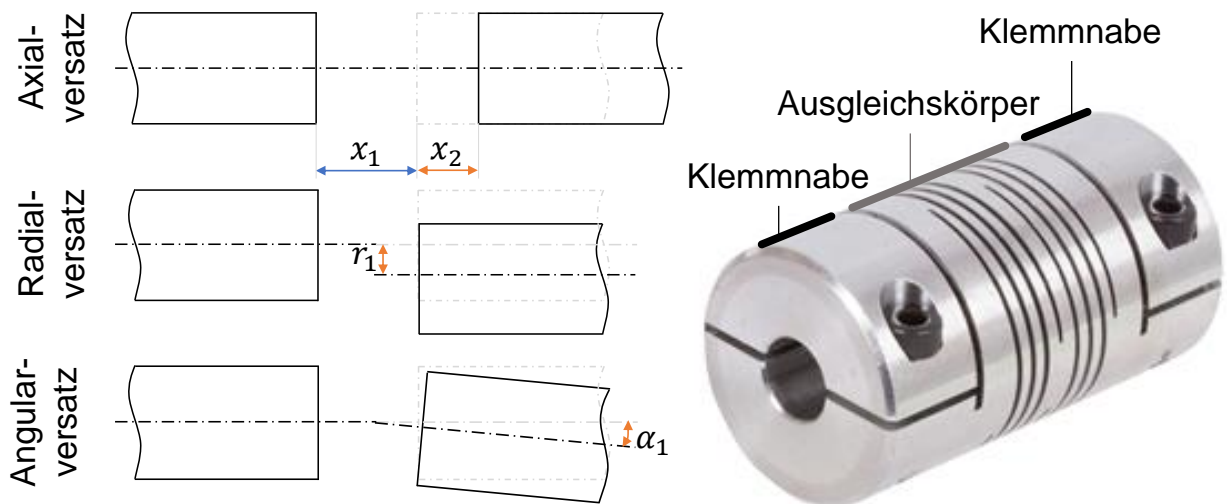
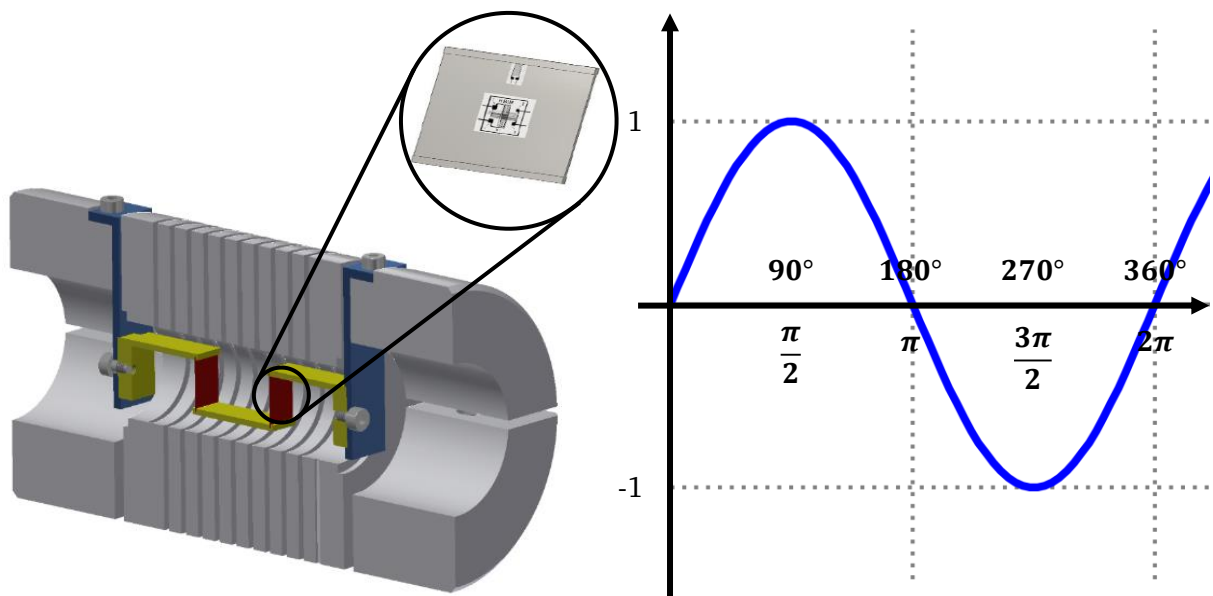


Abbildung 8-1: Beispiel einer Federstegkupplung mit Visualisierung ausgewählter Funktionselemente und Darstellung der bei der Verbindung zweier Wellen auftretenden Versatzarten<sup>291</sup>

<sup>291</sup> Eigene Darstellung.

Erste Ansätze der sensorintegrierenden Federstegkupplung werden von SCHORK ET AL. (2016) vorgestellt und durch SCHORK UND KIRCHNER (2018b) weiterentwickelt. Bei der sensorintegrierenden Federstegkupplung handelt es sich um ein sensorintegrierendes Maschinenelement, da das Sensorelement die am Maschinenelement auftretenden mechanischen Signale nutzt um auf die Zielgröße zu schließen.<sup>292</sup> In Falle der sensorintegrierenden Federstegkupplung soll das Sensorelement als paralleler Kraftflusspfad neben dem Ausgleichskörper angebracht werden, wobei die Steifigkeit deutlich kleiner als die des Ausgleichkörpers gewählt wird. Dadurch wird der anliegende Wellenversatz ohne Abweichungen auf das Sensorelement übertragen, jedoch werden die Steifigkeit der gesamten Kupplung und damit die im Betrieb auf die Wellen wirkenden Kräfte nicht erhöht.



**Abbildung 8-2: Konzept der sensorintegrierten Federstegkupplung (links) und qualitativer Verlauf der am Biegeplättchen erwarteten Dehnung bei anliegenden Angular- oder Radialversatz über die Rotation der Kupplung (rechts)<sup>293</sup>**

Das entwickelte Konzept der sensorintegrierenden Federstegkupplung ist in Abbildung 8-2 gezeigt. Der eingebrachte parallele Kraftflusspfad, der dem Sensorelement entspricht, besteht aus einer mehrteiligen Halterung und zwei Biegeplättchen, auf welchen Dehnungsmessstreifen appliziert sind. Die äußeren Teile der Halterung sind dabei mit den Klemmnaben der Federstegkupplung verbunden und als ideal starr anzusehen, wodurch die bewegungstreue Übertragung des Wellenversatzes auf das Sensorelement gewährleistet wird. Die beiden Biegeplättchen sind ihrerseits durch drei weitere Halterungsteile räumlich fixiert. Zwei dieser Halterungsteile sind direkt mit den äußeren Teilen der Halterung verbunden, sodass der Versatz weiterhin bewegungstreu übertragen wird. Die Verbindung der beiden Biegeplättchen ist mittels der mittleren Halterung realisiert. Alle Teile der Halterung werden gegenüber den Biegeplättchen als starr angesehen. Anliegender Wellenversatz führt daher lediglich zu einer Deformation der Biegeplättchen, auf denen sich aufgrund ihrer Geometrie ein determinierbares Dehnungsprofil abhängig vom anliegenden

<sup>292</sup> Vgl. Kapitel 4

<sup>293</sup> Eigene Darstellung.

Wellenversatz einstellt. Mittels der applizierten Dehnungsmessstreifen wird dieses Dehnungsprofil über die Rotation der Kupplung aufgenommen, woraus sich Betrag und Art des ursächlichen Versatzes ermitteln lassen. Axialer Wellenversatz führt beispielsweise zu einer über die Rotation der Wellen konstante Verformung, wohingegen Radial- und Angularversatz mit der Ausbildung eines sinusförmigen Signals verbunden sind.

Die mittels der sensorintegrierenden Federstegkupplung zu ermittelnden Systemgrößen sind zunächst der an den Wellen anliegende Versatz, über den daraufhin unter Berücksichtigung der Federsteifigkeit des Ausgleichskörpers der Federstegkupplung die durch den Versatz hervorgerufenen Kräfte, die beispielsweise auf die Lager der verbundenen Wellen wirken, ermittelt werden können. Dies kann dazu beitragen, die Zustandsüberwachung (*Condition Monitoring*) sowie die vorausschauende Wartung (*Predictive Maintenance*) zu unterstützen.<sup>294</sup>

Nun soll zu diesem Konzept ein Prototyp entwickelt werden. Nach dem aP<sup>3</sup>EM in Abbildung 5-16 und der dreischrittigen Herangehensweise zur Festlegung von Anforderungen an Prototypen in Abbildung 6-1 der erste Schritt in der Klärung der Aufgabenstellung und der damit verbundenen Definition der Ziele der Prototypenentwicklung. Als Ziel wird in diesem Fall die Überprüfung der Aussagefähigkeit der gemessenen Dehnung über die Höhe und Art des anliegenden Versatzes festgelegt. Da es sich bei diesem Ziel um eine Frage der Funktionalität des Konzepts handelt und erste virtuelle Prototypen in Form von analytischen Berechnungen der auftretenden Dehnungen verifiziert werden müssen, wird die Entwicklung eines physischen Funktionsprototyps angestrebt.

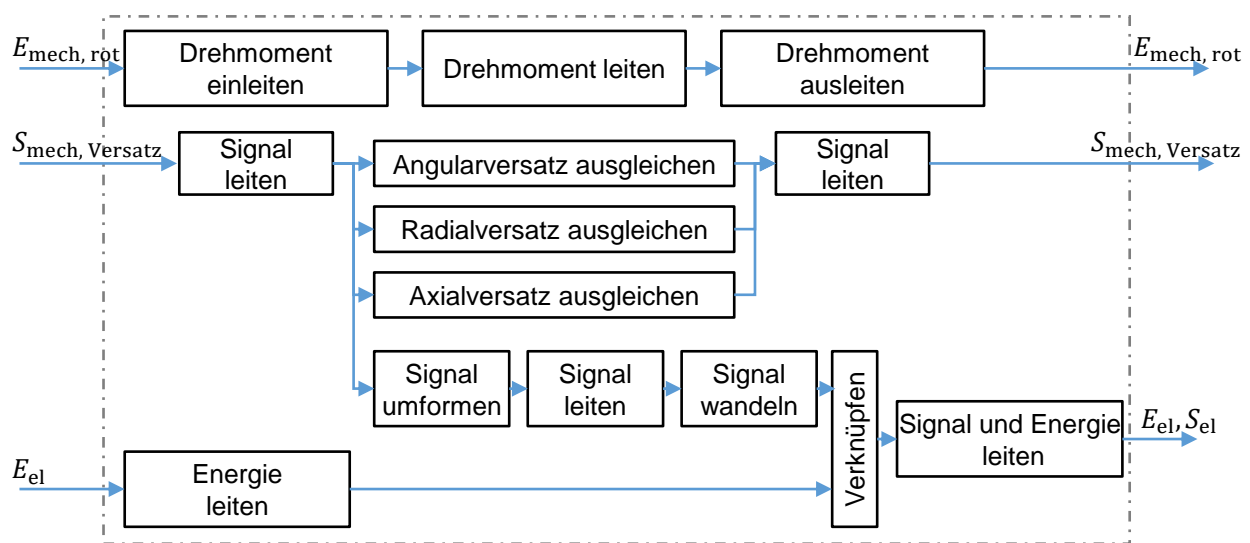


Abbildung 8-3: Zusammenhang der Teilfunktionen der sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>295</sup>

Zur Identifikation der Entwicklungsschwerpunkte und deren Priorisierung sowie der Ableitung der bezogenen Anforderungen werden die in Kapitel 7 vorgestellten Methoden eingesetzt. Dazu werden zunächst die Konfigurationen der sensorintegrierenden Federstegkupplung ermittelt und deren Kritikalität hinsichtlich der Neuheit, der technischen Schwierigkeit und der Relevanz für das Gesamtsystem bewertet. Als Konfiguration lassen

<sup>294</sup> Vgl. Martin et al. (2018a) und Martin et al. (2018b).

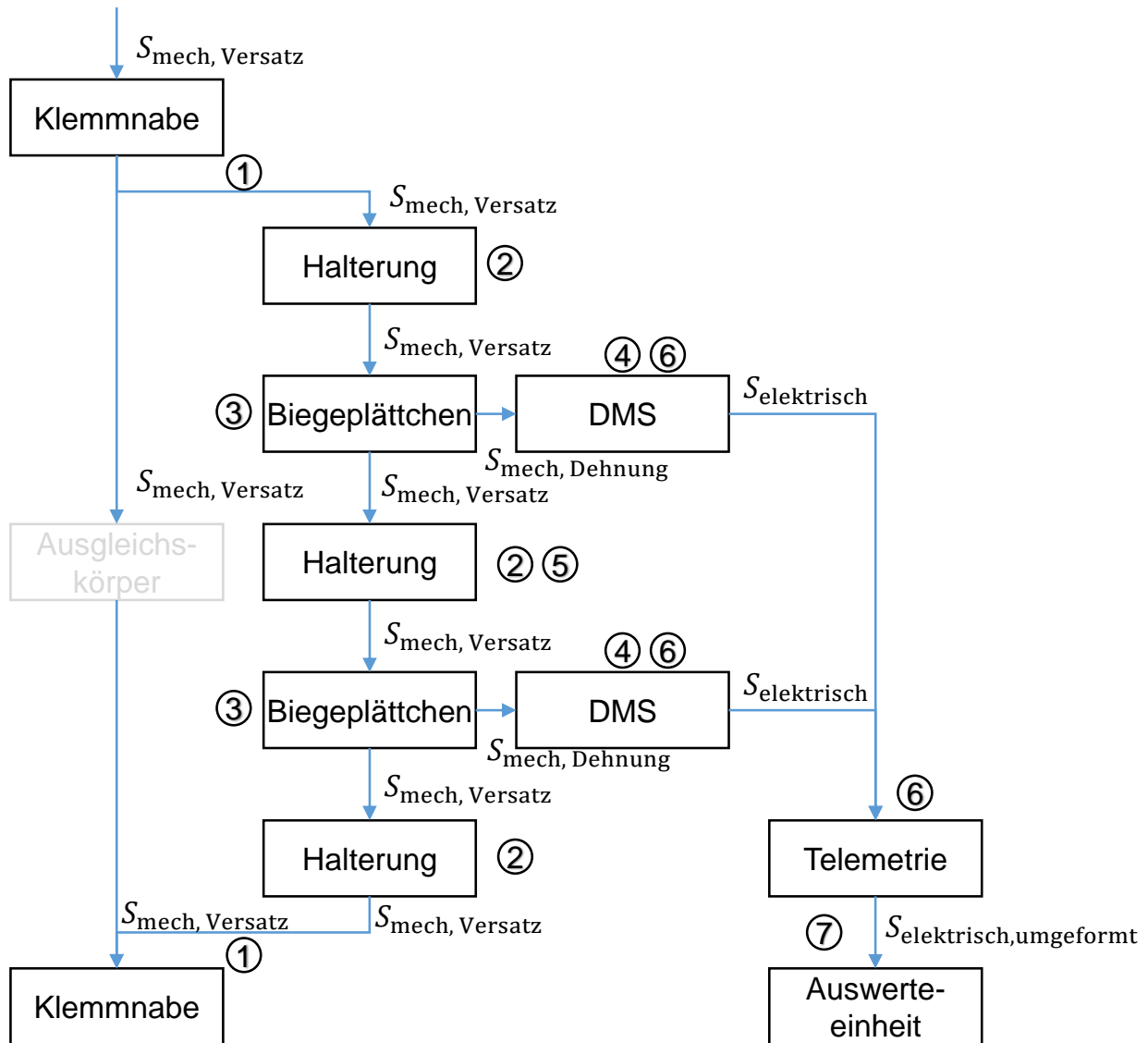
<sup>295</sup> Eigene Darstellung.

sich beispielsweise *Übertragen des Drehmoments zwischen den verbundenen Wellen*, *Ausgleichen des Wellenversatzes*, *Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal* und *Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit* identifizieren. Die Bewertung dieser Konfigurationen ist in Tabelle 7 in Anhang A mit der jeweiligen Begründung zur vergebenen Wertung dargestellt. Aus dieser Bewertung ergibt sich, dass die Konfigurationen *Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal* und *Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit* als kritisch anzusehen sind und im Rahmen der Prototypingaktivität näher untersucht werden müssen. Beide kritischen Konfigurationen basieren auf Signalflüssen, wodurch zunächst der gesamte Signalfluss analysiert wird, um Störgrößen auf diesen zu ermitteln. Den Ausgangspunkt dazu bildet der Zusammenhang der Teilfunktionen, der in Abbildung 8-3 gezeigt ist.

Der Zusammenhang der Teilfunktionen umfasst dabei alle Eingangsgrößen, Teilfunktionen und Ausgangsgrößen nach ROTH (2000). Bezogen auf die kritischen Konfigurationen sind dabei jedoch nur die Signale und die zu den signalbeeinflussenden Teilfunktionen gewählten Teillösungen von Bedeutung. Als nutzbares Signal wird die Verformung der Federstegkupplung identifiziert. Der Fluss dieses Signals hin zur Auswerteeinheit wird daher mittels der Signalflussanalyse, vorgestellt in Abschnitt 7.2, hinsichtlich der auftretenden Stör- und Einflussgrößen analysiert. Die Signalflussanalyse der sensorintegrierenden Federstegkupplung ist in Abbildung 8-4 gezeigt. Zu erkennen ist, dass sich das nutzbare Signal  $S_{\text{mech,Versatz}}$  auf die beiden parallelen Signalflusspfade aufteilt. Den ersten Signalflusspfad bildet der Ausgleichskörper, wohingegen der zweite Signalflusspfad durch das Sensorelement gebildet wird. Dieser zweite Signalflusspfad setzt sich aus den Halterungen und den Biegeplättchen zusammen. Der Signalfluss durch den Ausgleichskörper muss an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden, da durch dessen Parallelität kein Einfluss auf das Sensorelement zu erwarten ist. Das nutzbare Signal  $S_{\text{mech,Versatz}}$  liegt zunächst in Form des Wellenversatzes vor und wird von den äußeren Komponenten der Halterung des Sensorelements auf dieses übertragen, die es wiederum auf die Biegeplättchen übertragen. Diese formen das nutzbare Signal in die Deformation der Biegeplättchen  $S_{\text{mech,Dehnung}}$  und der darauf applizierten Dehnmessstreifen um. Die Deformation der Dehnmessstreifen entspricht der Wandlung des mechanischen Signals hin zum elektrischen Signal  $S_{\text{elektrisch}}$ , da sich der Widerstand der Dehnmessstreifen ändert. Das elektrische Signal wird schließlich mittels Telemetriesystem umgeformt ( $S_{\text{elektrisch,umgeformt}}$ ) und zur Auswerteeinheit übertragen.

Störgrößen auf das mechanische nutzbare Signal lassen sich nun an den Wirkflächenpaarungen der Komponenten sowie den Komponenten an sich identifizieren, wie in Abbildung 8-4 zu erkennen. Die Komponenten der Halterung, deren äußere Komponenten in dieser Darstellung zusammengefasst sind, an sich werden als ideal starr angenommen. Da das Konzept vorsieht, dass sich lediglich die Biegeplättchen im Sensorelement entsprechend des anliegenden Versatzes verformen, muss die Nachgiebigkeit der weiteren Komponenten des Sensorelements im Vergleich zu den Biegeplättchen vernachlässigbar sein. Dies kann einerseits dadurch beeinträchtigt werden, dass die Verbindungen der Halterung nicht wie vorgesehen einer festen Einspannung entsprechen. Wird dies nicht erfüllt, wird ein Teil des auftretenden Versatzes nicht auf die Biegeplättchen übertragen, wodurch der gemessene Wert nicht dem erwarteten Wert entspricht, die Funktionalität der Konfiguration also eingeschränkt wird. Dies entspricht dem Störsignal  $S_{\text{mech,Befestigung}}$ . Weiterhin wird auch die Nachgiebigkeit der Komponenten der Halterung an sich als vernachlässigbar gegen-

über der Nachgiebigkeit der Biegeplättchen angesehen. Störgrößen sind daher Abweichungen dieser angenommenen Nachgiebigkeit der Halterungskomponenten und führen zum Störsignal  $S_{\text{mech,Nachgiebigkeit}}$ .



- |                                    |                                     |   |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| ① $S_{\text{mech}}$ , Befestigung  | ④ $S_{\text{mech}}$ , Klebung       | ⑦ $S_{\text{elektrisch}}$ , Übertragung |
| ② $S_{\text{mech,Nachgiebigkeit}}$ | ⑤ $S_{\text{mech}}$ , Zentripetal   |   |
| ③ $S_{\text{mech,Positionierung}}$ | ⑥ $S_{\text{elektrisch}}$ , Kontakt |   |

Abbildung 8-4: Signalflussanalyse des nutzbaren Signals der sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>296</sup>

Das Mittelteil der Halterung, das die Biegeplättchen verbindet, kann zur Quelle einer weiteren Störgröße  $S_{\text{mech,Zentripetal}}$  werden, die den Einfluss der Zentripetalkraft durch die

<sup>296</sup> Eigene Darstellung.

Rotation der sensorintegrierenden Federstegkupplung auf die Biegeplättchen darstellt. Diese ruft eine zusätzliche Dehnung der Biegeplättchen in radialer Richtung hervor, die dem nutzbaren Signal überlagert ist. Störgrößen durch den Ausgleichskörper der Federstegkupplung sind wie oben beschrieben nicht zu identifizieren. Jedoch kann durch eine fehlerhafte Positionierung des Sensorelements bezüglich des Ausgleichkörpers das Stör-signal  $S_{\text{mech,Positionierung}}$  hervorgerufen werden. Dies umfasst sowohl Abweichungen in axialer Richtung als auch in radialer Richtung.

Eine weitere für den Fluss des nutzbaren Signals interessante Wirkfläche ist die Schnittstelle der Biegeplättchen zu den Dehnmessstreifen. Durch fehlerhafte Verklebung kann die Leitung des mechanischen Signals in Form von Deformation von den Biegeplättchen zum Dehnmessstreifen durch  $S_{\text{mech,Klebung}}$  gestört sein. Weitere Störgrößen können in der Schnittstelle der Dehnmessstreifen hin zum Telemetriesystem auftreten, beispielsweise durch unsaubere Lötstellen, die die Störgröße  $S_{\text{elektrisch,Kontakt}}$  hervorrufen. Darüber hinaus können fehlerhafte Dehnmessstreifen oder ein fehlerhaftes Telemetriesystem Abweichungen zwischen dem erwarteten und dem gemessenen Wert hervorrufen, beispielsweise in Form von  $S_{\text{mech,Übertragung}}$ .

Die Analyse des Signalflusses zeigt, dass die Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit“ keinen direkten Einfluss auf die Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“ aufweist. Werden jedoch beide Konfigurationen in einem gemeinsamen Prototyp abgebildet, können eventuelle Abweichungen zwischen dem erwarteten Messwert und dem gemessenen Wert nicht eindeutig auf deren Ursache zurückgeführt werden, beispielsweise ob die Ursache der Abweichungen in Form von Störgrößen auf das elektrische Signal bei der Übertragung oder bereits bei der Wandlung des nutzbaren mechanischen Signals in das elektrische Signal vorliegt. Eine Isolierung der beiden Konfigurationen erscheint daher sinnvoll. Die Analyse des Signalflusses und der Störgrößen zeigt zudem, dass die Drehzahl der Welle zunächst nur eine eventuelle Störgröße resultierend aus der am Mittelteil der Halterung angreifenden Zentripetalkraft hervorruft. Die eigentliche Wandlung des nutzbaren mechanischen Signals in das elektrische Signal ist davon jedoch nicht beeinflusst. Um den Fokus zunächst auf die Untersuchung der Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“ zu legen, werden daher zunächst nur Versuche im nicht rotierenden System durchgeführt. Um Einflüsse aus der Übertragung des elektrischen Signals zu vermeiden wird darüber hinaus keine Telemetrie-einheit verwendet, sondern eine kabelgebundene Übertragung der Daten vorgesehen.

Nach der Identifikation der kritischen Konfigurationen und der möglichen Störgrößen auf die für die kritischen Konfigurationen ausschlaggebenden Funktionen, können mittels House of Configurations, wie in Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6 gezeigt, Anforderungen an Prototypen zur Überprüfung der kritischen Konfigurationen ermittelt werden.

Konfigurationen		Kritikalität				Klemmnabe							Ausgleichskörper					Halterung						
		Neuheit	Technische Scheirigkeit	Relevanz	Gesamtkritikalität	Durchmesser	Oberflächengüte	Reibkoeffizient	Klemmkraft	Länge	Material	...	Durchmesser	Freiheitsgrade	Nachgiebigkeit	Länge	Material	...	Steiifigkeit	Position Nut	Breite	Länge	Montagevorspannkraft	...
1	Übertragen des Drehmoments zwischen den Wellen	1	1	4	4																			
2	Ausgleichen des Wellenversatzes	1	1	4	4																			
3	Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal	4	4	10	##	0	0	0	4	4	0	0	1	1	1	0		10	10	4	4	10		
3.1	Abweichung aufgrund der Befestigung					0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	10		
3.2	Abweichung aufgrund der Nachgiebigkeit					0	0	0	10	4	4	0	0	0	0	0		10	0	0	0	4		
3.3	Abweichung aufgrund der Zentripetalkraft					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
3.4	Abweichung aufgrund der Positionierung					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	10	4	4	0		
3.5	Abweichung aufgrund der Verklebung					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
3.6	Abweichung aufgrund der Kontaktierung					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
4	Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit	4	4	4	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0			
4.1	Abweichung aufgrund der Kontaktierung					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
4.2	Abweichung aufgrund der Übertragungstrecke					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		

Abbildung 8-5: House of Configurations der sensorintegrierenden Federstegkupplung – Teil 1<sup>297</sup>

Die Auswertung im House of Configurations zeigt, dass für die Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“ die Eigenschaften und Merkmale der Halterung und der Biegeplättchen hinsichtlich der Positionierung, Nachgiebigkeit und Kopplung der Komponenten entscheidend sind. Die Eigenschaften und Merkmale der Federstegkupplung haben hingegen weniger bis keinen Einfluss auf diese Konfiguration. Da die Messung des Versatzes unabhängig vom übertragenen Drehmoment ist, werden die Versuche hinsichtlich der Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“ ohne die Übertragung von Drehmoment durchgeführt. Jedoch beruht diese Konfiguration darauf, dass die Dehnung der Biegeplättchen unter verschiedenen Drehwinkeln der Kupplung aufgezeichnet wird und der entstehende Verlauf ausgewertet wird. Daher muss das Sensorelement auch für die Versuche rotiert werden. Hierbei muss verhindert werden, dass das Sensorelement einer Torsion ausgesetzt wird, die beispielsweise aufgrund der Lagerreibung der Wellenlagerung entstehen kann. Das Sensorelement ist nicht torsionssteif und

<sup>297</sup> Eigene Darstellung.

würde sich daher deformieren, wodurch der gemessene Verlauf der Dehnung nicht dem erwarteten entsprechen würde.

Konfigurationen		Biegeplättchen					Verbindung Halterung BP				Halterung mitte				DMS			Telemetrie						
		Material	Steifigkeit	Positionierung	Größe	Dauerfestigkeit	...	Steifigkeit	Dauerfestigkeit	Material	...	Steifigkeit	Positionierung	Dichte	Größe	...	Position	Verklebung	Kontaktierung	...	Kontaktierung	Bandbreite	Strombedarf	...
1	Übertragen des Drehmoments zwischen den Wellen																							
2	Ausgleichen des Wellenversatzes																							
3	Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal	4	4	10	10	0	10	0	0	4	10	0	0	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	
3.1	Abweichung aufgrund der Befestigung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.2	Abweichung aufgrund der Nachgiebigkeit	10	10	4	4	0	10	0	4	10	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.3	Abweichung aufgrund der Zentripetalkraft	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.4	Abweichung aufgrund der Positionierung	0	0	10	4	0	0	0	0	0	10	0	4	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.5	Abweichung aufgrund der Verklebung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	
3.6	Abweichung aufgrund der Kontaktierung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	
4	Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	4	0	
4.1	Abweichung aufgrund der Kontaktierung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	
4.2	Abweichung aufgrund der Übertragungstrecke	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	

Abbildung 8-6: House of Configurations der sensorintegrierenden Federstegkupplung – Teil 2<sup>298</sup>

Durch die Auswertung des Grads der Verteilung, wie in Abbildung 8-7 gezeigt, erschließen sich weitere Anhaltspunkte hinsichtlich der möglichen Einteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme, die isoliert getestet werden können, wie in Abschnitt 7.4 beschrieben. Es zeigt sich, dass insbesondere die Wandlung des Wellenversatzes in das elektrische Signal einen hohen Grad der Verteilung aufweist und damit von multiplen Eigenschaften und Merkmalen verschiedener Komponenten abhängt. Die Übertragung des elektrischen Signals hingegen zeigt nur einen geringen Grad der Verteilung.

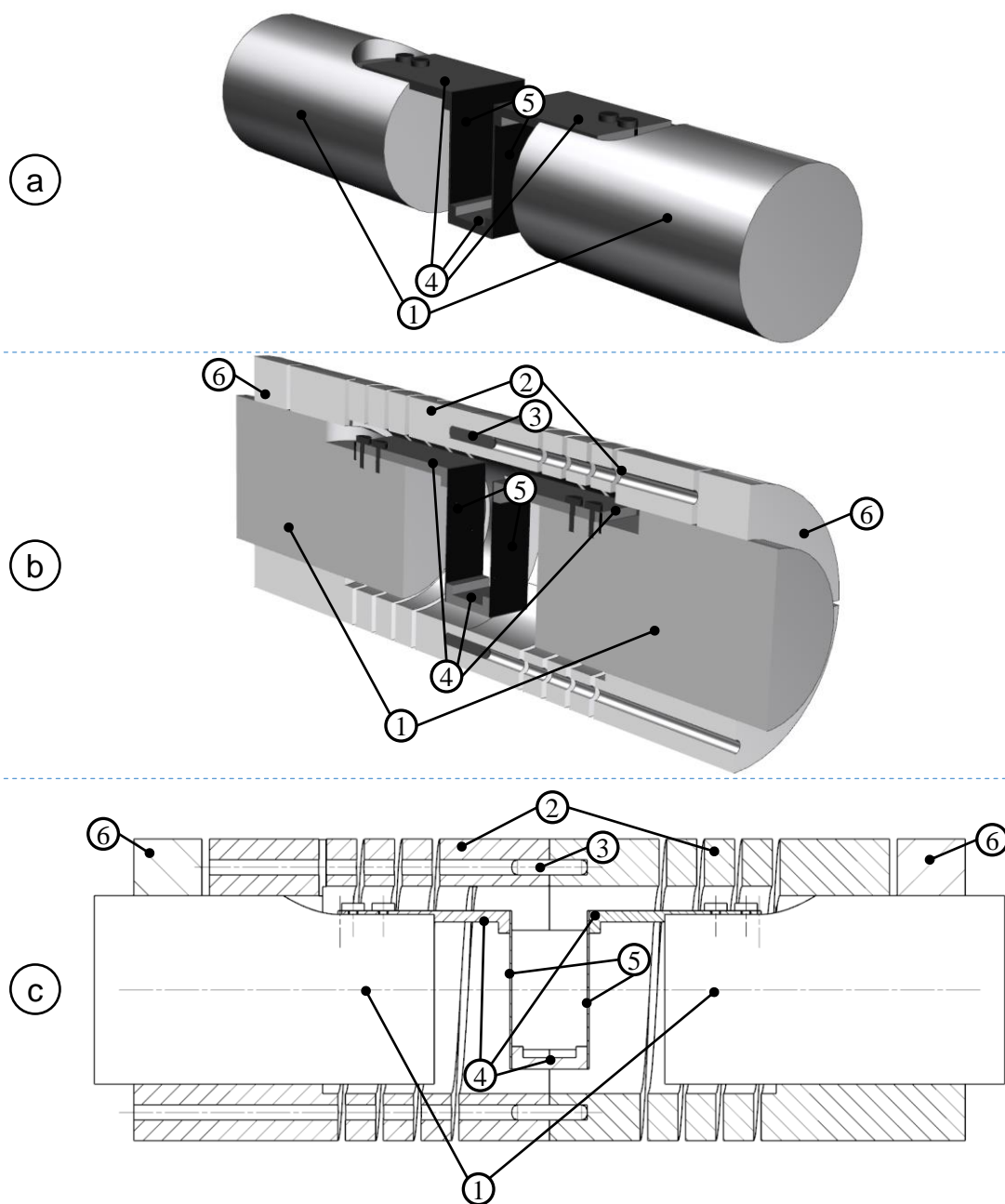
<sup>298</sup> Eigene Darstellung.

Konfigurationen		Grad der Verteilung
1	Übertragen des Drehmoments zwischen den Wellen	
2	Ausgleichen des Wellenversatzes	
3	Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal	20
3.1	Abweichung aufgrund der Befestigung	2
3.2	Abweichung aufgrund der Nachgiebigkeit	14
3.3	Abweichung aufgrund der Zentripetalkraft	3
3.4	Abweichung aufgrund der Positionierung	8
3.5	Abweichung aufgrund der Verklebung	1
3.6	Abweichung aufgrund der Kontaktierung	1
4	Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit	3
4.1	Abweichung aufgrund der Kontaktierung	1
4.2	Abweichung aufgrund der Übertragungstrecke	1

Abbildung 8-7: Grad der Verteilung der kritischen Konfigurationen des Konzepts der sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>299</sup>

Bezüglich der Wandlung des Wellenversatzes in das elektrische Signal, stehen mögliche Abweichungen aufgrund der Nachgiebigkeit mit einem ebenfalls hohen Grad der Verteilung im Vordergrund. Auch mögliche Abweichungen durch fehlerhafte Positionierung zeigen einen hohen Grad der Verteilung und werden daher durch viele Eigenschaften und Merkmale der Komponenten des Konzepts beeinflusst. Durch die Auswertung des Grads der Verteilung der Konfigurationen der sensorintegrierenden Federstegkupplung lässt sich darauf schließen, dass eine getrennte Untersuchung der Wandlung des Wellenversatzes und der Übertragung des elektrischen Signals an die Auswerteeinheit zulässig ist. Zur Untersuchung des Einflusses von Abweichungen aufgrund von Positionierung und Nachgiebigkeit hingegen, erscheint eine weitere Aufteilung in Teilsystem als nicht zielführend. Durch fehlerhafte Verklebung oder Kontaktierung hingegen, können durch Untersuchungen an isolierten Teilsystemen, in diesem Fall am Dehnmessstreifen, untersucht werden.

<sup>299</sup> Eigene Darstellung.



**Abbildung 8-8: CAD-Modell und technische Zeichnung des Prototyps der sensorintegrierenden Federstegkupplung zur Untersuchung der Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“<sup>300</sup>**

Die Anforderungen an die Federstegkupplung werden aufbauend auf den Auswertungen stark gelockert, die Steifheit gegenüber Torsion muss jedoch gegeben sein, auch wenn die Übertragung des Drehmoments keine kritische Konfiguration darstellt. Die Abmessungen des Sensorelements und der Kupplung haben lediglich einen Einfluss auf die Höhe der gemessenen Dehnung. Daher werden die Anforderungen an die Abmessungen stark gelockert und die Größe unter dem Gesichtspunkt einer vereinfachten Herstellung, Montage und Hantierbarkeit erhöht. Entsprechend der Größe des Sensorelements ergibt sich die

<sup>300</sup> Eigene Darstellung.

Anforderung an die Kupplung, beziehungsweise an die torsionssteife Komponente, dass diese ausreichend Bauraum zur Integration des Sensorelements bietet. Um die Applikation des Sensorelements im inneren dieses Elements zu vereinfachen, wird es zusätzlich getrennt ausgeführt. Das CAD-Modell des Prototyps zur Untersuchung der Konfiguration „Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal“ der sensorintegrierenden Federstegkupplung ist in Abbildung 8-8 gezeigt. Zu sehen ist das Sensorelement, welches direkt mit den Wellen des Prüfstands verbunden ist (a), gefolgt von der Schnittdarstellung der gesamten Baugruppe in (b). Darüber hinaus ist die technische Zeichnung des Prototyps in (c) gezeigt.

Zu erkennen sind die zu verbindenden Wellen (1), die Kupplungshälften (2), die mittels des Zentrierstifts (3) zueinander ausgerichtet werden und über die Klemmnaben (6) mit den Wellen verbunden werden sowie das Sensorelement, bestehend aus der dreiteiligen Halterung (4) und den Biegeplättchen (5) mit applizierten Dehnmessstreifen.

## 8.2 Entwicklung eines Prototyps einer drehmomentmessenden Welle-Nabe-Verbindung

Die Anwendbarkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Herangehensweisen und Methoden werden in diesem Abschnitt am Beispiel der Prototypenentwicklung zum Konzept der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung in Abbildung 8-9 weiter verdeutlicht.

Bei dem in Abbildung 8-9 abgebildeten Konzept handelt es sich um eine sensorintegrierende Welle-Nabe-Verbindung. Zu erkennen sind das Gehäuse (8), das schrägverzahnte Zahnrad (3) und das geradverzahnte Ritzel (9) sowie die Zentrierscheibe (5), die Sensorschraube (7) und die Verbindung zur Auswerteeinheit in Form eines Pins (2). Mittels dieses sensorintegrierenden Maschinenelements ist es möglich, das über die Welle-Nabe-Verbindung übertragene Drehmoment zu messen, ohne dabei zusätzliche Komponenten, wie zum Beispiel Drehmomentmesswellen, einbringen zu müssen. Das gemessene Drehmoment kann beispielsweise im Rahmen der Erfüllung von Anforderungen an die funktionale Sicherheit von Fahrzeugen dazu eingesetzt werden, das über den Motorstrom berechnete Drehmoment eines elektrischen Antriebsstrangs zu plausibilisieren.<sup>301</sup>

Das Konzept, dessen Zeichnung in Abbildung 8-10 gezeigt ist und bei dem es sich um eine Anpassung eines Patentes der Technischen Universität Darmstadt handelt<sup>302</sup>, beruht auf der Verwendung eines Stirnpressverbandes zur Übertragung des Drehmoments von einem schrägverzahnten Zahnrad (3) an eine Welle mit aufgeschnittenem Ritzel (9). Wird Drehmoment über das schrägverzahnte Zahnrad übertragen, wird dieses Drehmoment im Zahneingriff in eine tangentiale, radiale und axiale Kraftkomponente aufgeteilt. Die radialen und tangentialen Kraftkomponenten werden reibkraftschlüssig über die stirnseitige Wirkfläche zwischen Zahnrad und Welle übertragen wohingegen die axiale Kraftkomponente über eine Abstandshülse (4), den Lagerinnenring eines Wälzlagers (1), eine Zentrierscheibe (5) und eine Sensorschraube (7) übertragen wird.

Neben der Übertragung der axialen Kräfte dient diese Schraube auch der Erzeugung der benötigten Pressung zur Aufrechterhaltung des stirnseitigen Reibkraftschlusses. Bei der Schraube handelt es sich im Falle des Konzepts um eine Sensorschraube. Diese verfügt

<sup>301</sup> Ross (2016), BS ISO 26262-1:2018

<sup>302</sup> Vgl. Kirchner und Schork (2017), Veröffentlichungsnummer DE 10 2017 120 796 A1

über einen im Schraubenschaft integrierten Piezosensor (6) zur Messung der an der Schraube auftretenden Dehnung. Groche und Brenneis (2014)

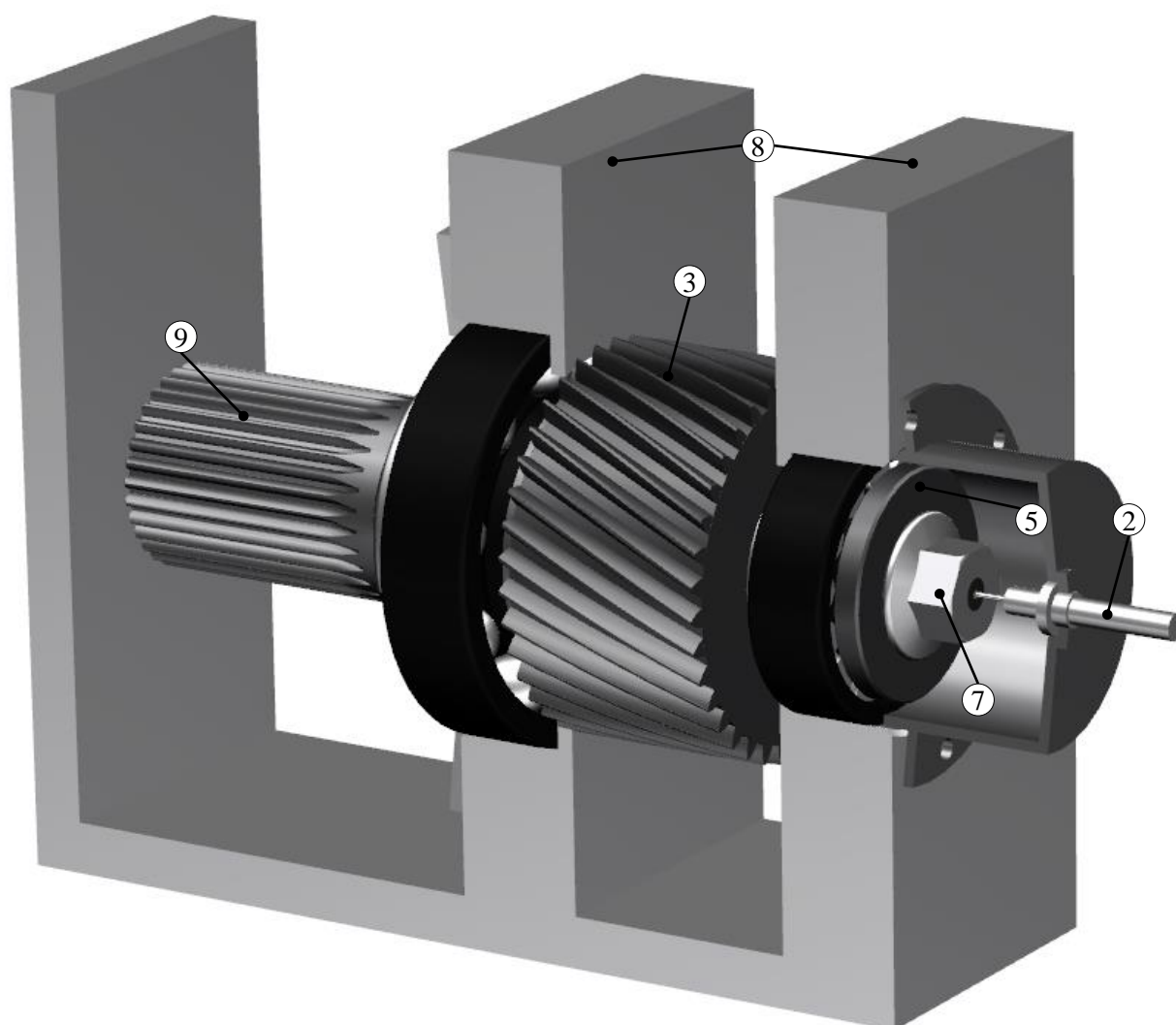


Abbildung 8-9: CAD-Modell des Konzepts der drehmomentmessenden Welle-Nabe-Verbindung<sup>303</sup>

Aus der an der Schraube im Betrieb gemessenen Dehnung kann auf die ursächliche Axialkraft geschlossen werden, woraus wiederum bei bekanntem Schrägungswinkel des Zahnrads das anliegende Moment berechnet werden kann. Bezüglich der auftretenden Axialkräfte ergeben sich drei Fälle, die ebenfalls in Abbildung 8-10 dargestellt sind. Der erste Fall (F1) tritt ein, wenn kein Drehmoment über die Welle-Nabe-Verbindung übertragen wird. Die Dehnung der Schraube entspricht der Dehnung aufgrund der Vorspannkraft und der Verspannung der beteiligten Komponenten. Der zweite Fall (F2) tritt ein, wenn die Kombination aus Schrägungswinkel des Zahnrads und anliegender Zahnflanke eine Axialkraft in Richtung der Sensorschraube hervorruft. Dadurch wird die Sensorschraube zusätzlich gelängt. Der dritte Fall (F3) tritt hingegen dann ein, wenn Schrägungswinkel und

<sup>303</sup> Eigene Darstellung.

anliegende Zahnflanke zu einer Axialkraft in Richtung des Wellenbundes führen. In diesem Fall wird die Schraube entlastet, wodurch die Dehnung abnimmt. Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Schraubkraft und Schraubendehnung (Rötscher-Diagramm), ist die Längenänderung in Folge einer betragsmäßig gleich hohen Axialkraft – und damit eines betragsmäßig gleich hohen Drehmoments – betragsmäßig gleich.

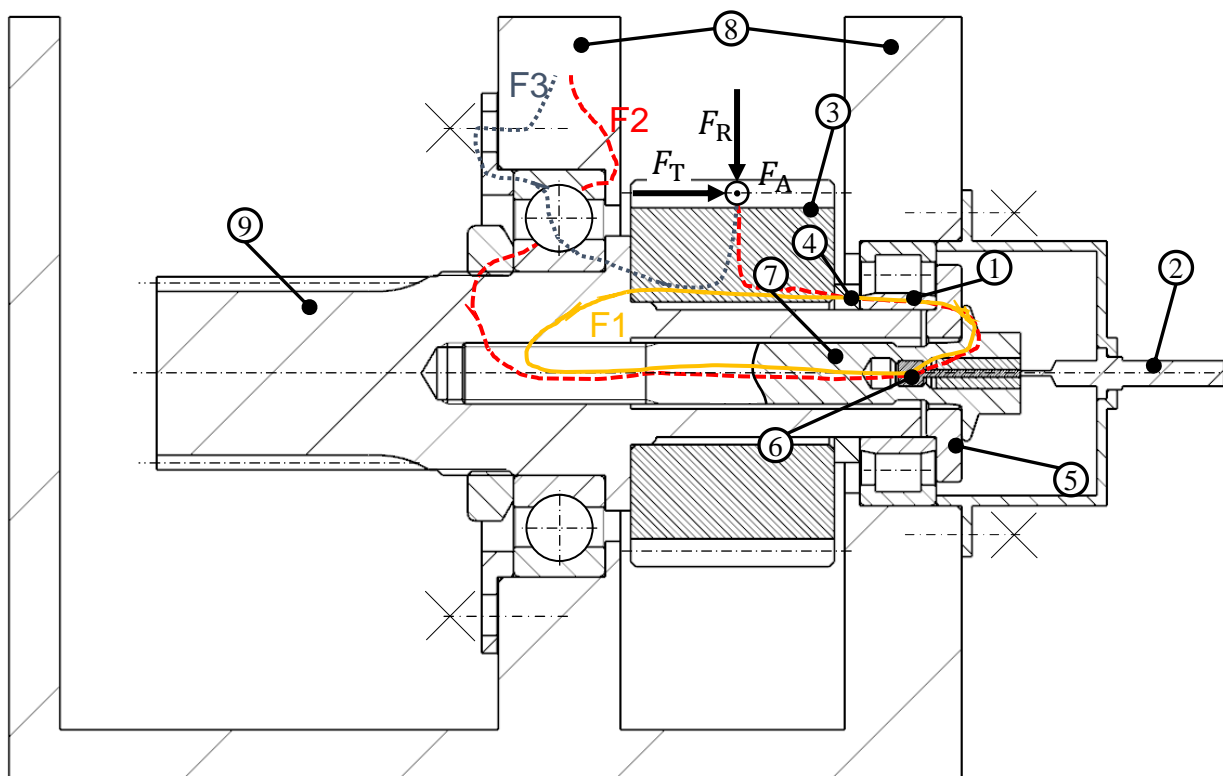


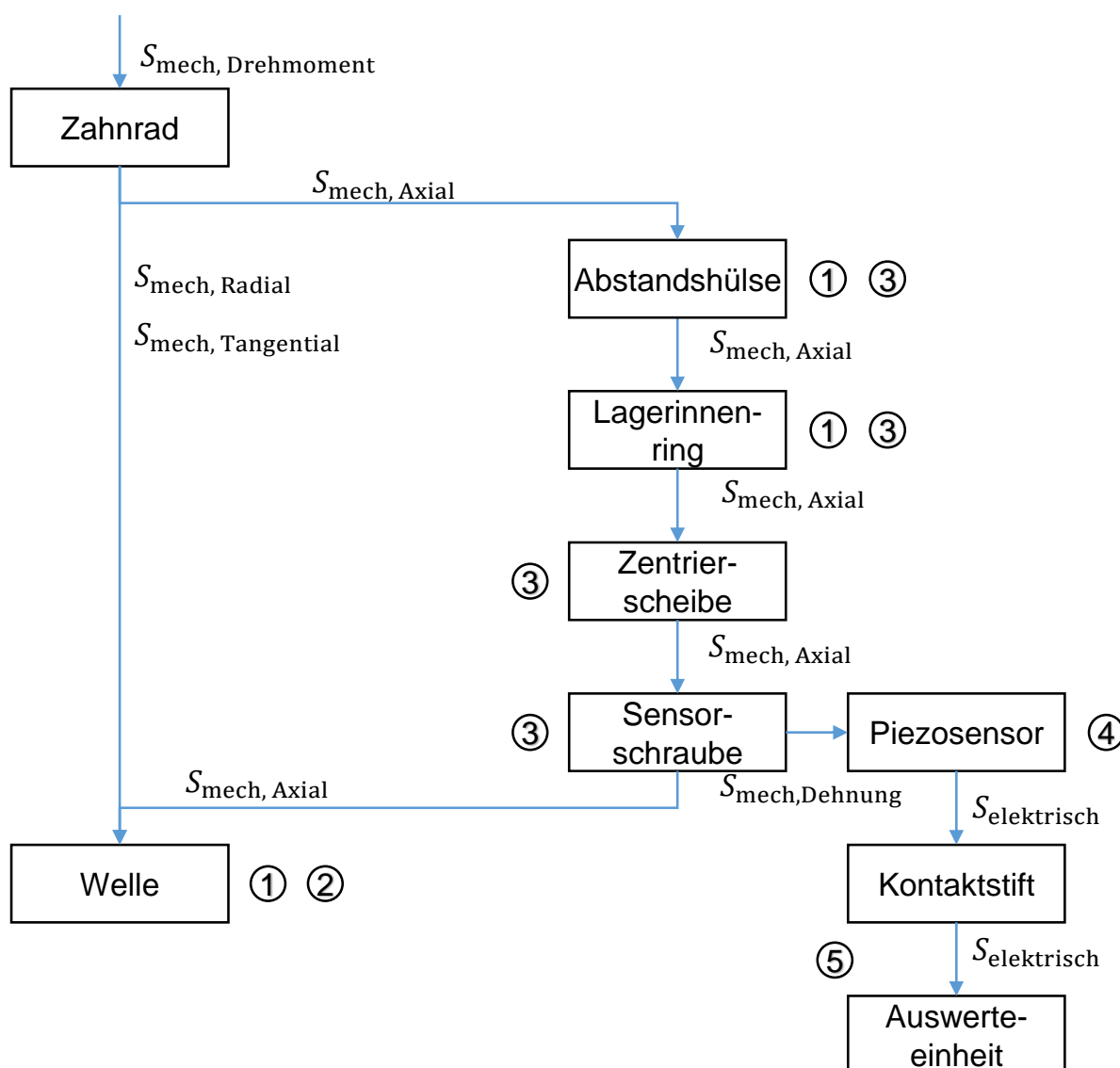
Abbildung 8-10: Kraftflussanalyse des Konzepts der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung<sup>304</sup>

Durch den Einsatz von Prototypen soll nun die Funktionalität und die Machbarkeit dieses Konzepts untersucht werden. Zur Entwicklung dieser Prototypen werden zunächst die Konfigurationen des Konzepts ermittelt und hinsichtlich ihrer Kritikalität nach Abschnitt 7.1 bewertet. Das Ergebnis dieser Bewertung kann Tabelle 8 im Anhang entnommen werden. Als kritisch haben sich dabei die Konfigurationen „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ und „Übertragen des elektrischen Signals“ herausgestellt, da diese einerseits eine sehr hohe Relevanz für das Konzept aufweisen, in dieser Form in keinen vergleichbaren Vorgängergenerationen verwendet wurden und die technische Umsetzung zur Gewährleistung des eindeutigen Zusammenhangs zwischen übertragenem Drehmoment und gemessenen Sensorsignal als schwierig eingeschätzt wird.

Zur Vorbereitung der Ermittlung von Anforderungen an Prototypen zum Konzept der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung wird nun der Signalfluss des nutzbaren Signals analysiert. Beim nutzbaren Signal handelt es sich in diesem Konzept um die Längenänderung der Schraube, die aus der auftretenden Axialkraft resultiert, die wiederum durch das eingeleitete Drehmoment verursacht wird. Die Längenänderung wird dann vom Sensor im

<sup>304</sup> Eigene Darstellung.

Inneren der Schraube in ein elektrisches Signal gewandelt und zur Auswerteeinheit übertragen. Der Signalfluss startet daher im Zahneingriff des schrägverzahnten Zahnrads und endet in der Auswerteeinheit, wie in Abbildung 8-11 dargestellt.



①  $S_{\text{mech, Reibung, Passung}}$

④  $S_{\text{elektrisch, Genauigkeit}}$

②  $S_{\text{mech, Reibung, Last}}$

⑤  $S_{\text{elektrisch, Übertragung}}$

③  $S_{\text{mech, Steifigkeit}}$

Abbildung 8-11: Signalflussanalyse des nutzbaren Signals der sensorintegrierenden Federstegkupplung<sup>305</sup>

Die Signalflussanalyse zeigt, dass das nutzbare Signal des Drehmoments vom Zahnrad zunächst in Axialkraft umgeformt wird, die über die Abstandshülse, den Lagerinnenring

<sup>305</sup> Eigene Darstellung.

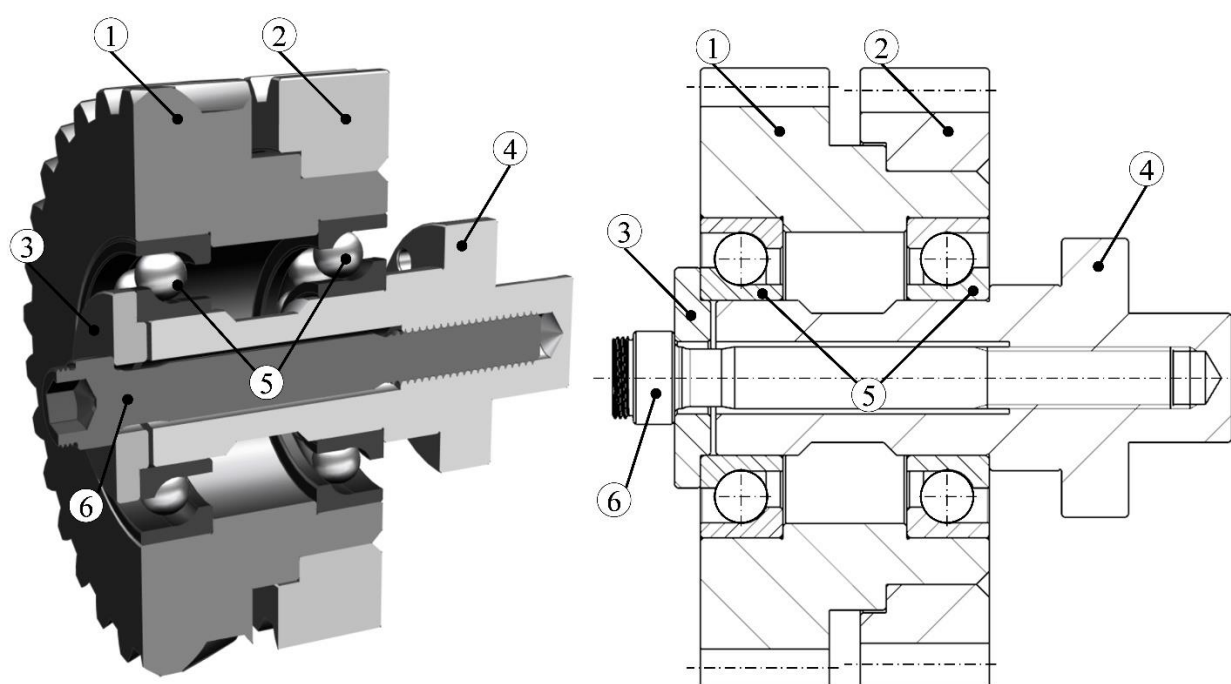
und die Zentrierscheibe zur Sensorschraube geleitet wird. Die Axialkraft führt zur Dehnung der Sensorschraube und der Übertragung dieser Dehnung auf den integrierten Sensor, der diese in das elektrische Signal wandelt. Das elektrische Signal wird schließlich zur Auswerteeinheit übertragen. Störgrößen treten dabei an den Wirkflächen zwischen der Welle und dem Zahnrad, der Abstandshülse und dem Lagerinnenring in Form von Reibung aufgrund der vorliegenden Passung ( $S_{\text{mech,Reibung,Passung}}$ ) auf. Darüber hinaus tritt zwischen Welle und Zahnrad auch eine von der Belastung abhängige Reibung  $S_{\text{mech,Reibung,Last}}$  auf. Diese Reibungen wirken der Axialkraft entgegen und mindern somit den Anteil der Axialkraft, der zur Verformung der Sensorschraube vorhanden ist. Abstandshülse, Lagerinnenring, Zentrierscheibe und Sensorschraube können weitere Störgrößen durch Abweichungen der Steifigkeit aufweisen ( $S_{\text{mech,Steifigkeit}}$ ), die den erwarteten Zusammenhang zwischen Axialkraft und Dehnung beeinflussen. Darüber hinaus unterliegt der Piezosensor im Inneren der Schraube möglichen Abweichungen  $S_{\text{elektrisch,Genauigkeit}}$  in dessen Genauigkeit. Weiterhin können an der Wirkfläche zwischen Kontaktstift und Auswerteeinheit Störgrößen, insbesondere durch den rotierenden Kontakt, auftreten ( $S_{\text{elektrisch,Übertragung}}$ ). Aus der Signalflussanalyse ergibt sich daher, dass die kritischen Konfigurationen „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ und „Übertragen des elektrischen Signals“ nicht direkt voneinander abhängen, jedoch bei der Untersuchung beider Konfigurationen in einem gemeinsamen Prototyp eventuelle Abweichungen zwischen dem erwarteten Wert und dem ermittelten Wert nicht auf die Fehlerursache zurückzuführen sind, aufgrund der vielfältigen identifizierten möglichen Störgrößen.<sup>306</sup> Daher wird zunächst entschieden, dass die Konfigurationen „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ und „Übertragen des elektrischen Signals“ mittels zweier, voneinander unabhängiger, physischer Prototypen untersucht werden sollen. Dadurch lassen sich Einflüsse durch auftretende Störgrößen einfacher zuordnen.

Das CAD-Modell und die technische Zeichnung des Prototyps zur Untersuchung der Konfiguration „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ bestehend aus einem schrägverzahnten und einem geradverzahnten Zahnrad (1 und 2), die mittels angestellter Lagerung (5) auf einer Achse (4) montiert sind und mittels der Sensorschraube (6) und der Zentrierscheibe (3) fixiert sind, sind in Abbildung 8-12 dargestellt. Das Ziel ist dabei, die Konfiguration möglichst frei von Störgrößen zu untersuchen, sodass der Fokus der Untersuchung zunächst auf die Überprüfung der Grundidee des Konzepts gelegt wird. Damit soll die allgemeine Brauchbarkeit des Konzepts überprüft werden, hinsichtlich der Frage, ob die Messung der auftretenden Axialkraft eine ausreichende Aussage über das anliegende Drehmoment liefern kann. Dabei wird erwartet, dass zwischen dem eingeleiteten Drehmoment und dem gemessenen elektrischen Signal an der Sensorschraube ein beschreibbarer und qualitativ aussagekräftiger Zusammenhang besteht. Da mögliche Störgrößen aufgrund der Übertragung des elektrischen Signals ausgeschlossen werden sollen, wird die im ursprünglichen Konzept vorhandene Teillösung der Übertragung mittels rotierenden Kontaktes durch eine nicht-rotierende Signalübertragung ersetzt. Daraus folgt, dass die Sensorschraube und damit auch die Welle im Prototyp nicht rotieren. Da davon ausgegangen wird, dass das nutzbare Signal, insbesondere das nutzbare mechanische Signal, nicht von der Drehung der Welle und der Sensorschraube abhängig ist, dient diese Änderung der Steigerung der Effektivität des Prototyps und der Reduktion des Aufwands, wodurch die Effizienz gesteigert wird. Da darüber hinaus der Einfluss des Zahneingriffs

---

<sup>306</sup> Vgl. Abbildung 7-3

auf das nutzbare Signal untersucht werden soll, wird das nutzbare Signal weiterhin durch die Aufspaltung des eingeleiteten Drehmoments im Zahneingriff erzeugt. Da das Drehmoment jedoch nicht über die Welle, beziehungsweise im Falle des Prototyps Achse, ausgeleitet werden kann, wird ein zusätzliches, geradzahntes Zahnrad zur Ausleitung des Drehmoments im Prototyp integriert. Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Zahneingriffsfrequenzen werden die Zahnräder austauschbar gestaltet. Der durch die Verwendung der Achse im Vergleich zur Welle verlorenen Drehfreiheitsgrad des Systems wird durch die Lagerung der Zahnräder auf der Achse erreicht. Als Lager werden Schrägkugellager gewählt um die Axialkraft optimal weiterzuleiten. Zusätzlich kann dadurch der Einfluss der Lagerreibung durch Variation der Vorspannkraft explorativ untersucht werden.



**Abbildung 8-12: Prototyp der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung zur Untersuchung der Konfiguration „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“<sup>307</sup>**

Mittels des House of Configurations, das in Abbildung 8-13 und Abbildung 8-14 visualisiert ist, können nun Anforderungen an die physischen Prototypen zur Untersuchung der als kritisch identifizierten Konfigurationen ermittelt werden. Zunächst ist festzustellen, dass die Entscheidung, die Konfigurationen „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ und „Übertragen des elektrischen Signals“ unabhängig voneinander zu untersuchen, sich auch durch die Auswertung des House of Configurations untermauern lässt, da beide Konfigurationen nur wenige Überschneidungen bei den Abhängigkeiten zu den Eigenschaften und Merkmalen der Komponenten aufweisen.

<sup>307</sup> Eigene Darstellung.

Konfigurationen		Kritikalität				Zahnrad								Welle				Schraube				Kontaktierung				
		Neuheit	Relevanz	Technische Schwierigkeit	Gesamtkritikalität	Zahneingriffswinkel	Schrägungswinkel	Zähnezahl	Innendurchmesser	Außendurchmesser	Material	...	Außendurchmesser	Material	Länge	Momentenkapazität	...	Genauigkeit Sensor	Vorspannkraft	Material	...	Kontaktart	Materialien	Drehzahl	Schmierung	...
1	Umformung des Drehmoments in Axial-, Radial- und Tangentialkraft	1	4	4	16																					
2	Drehmoment von Zahnrad zu Welle übertragen	1	4	1	4																					
3	Leiten der Axialkraft zum Sensor	10	10	4	400	0	0	0	4	4		4	4	1	0		0	0	0			0	0	0	0	
3.1	Entgegenwirkende Reibkraft durch Passung					0	0	0	10	0	10	10	10	4	0		0	0	0			0	0	0	0	
3.2	Entgegenwirkende Reibkraft durch Belastung					4	4	0	0	0	10	10	10	4	0		0	0	0			0	0	0	0	
4	Wandlung des mechanischen Signals in elektrisches Signal	4	4	10	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		10	10	4			0	0	0	0	
5	Leiten des elektrischen Signals	4	10	10	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0			10	10	10	10	
5.1	Rauschen bewegter Kontakt					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0			10	10	10	10	
5.2	Einfluss Medien					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0			10	10	10	10	

Abbildung 8-13: House of Configurations der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung<sup>308</sup>

Die Auswertung des Grads der Verteilung der kritischen Konfigurationen über die Eigenschaften und Merkmale der Komponenten des Konzepts der drehmomentmessenden Welle-Nabe-Verbindung, wie in Abbildung 8-14 dargestellt, zeigt, dass die einzelnen Konfigurationen und möglichen Störgrößen einen vergleichbaren Grad der Verteilung aufweisen. Die reine Betrachtung dieser Werte bringt daher an dieser Stelle keinen direkten Erkenntnisgewinn. In Verbindung mit Abbildung 8-13 zeigt sich jedoch, dass die Konfigurationen und Störgrößen jeweils nur durch wenige Komponente konzentriert beeinflusst werden. Eine Trennung der Konfigurationen in die zuvor ermittelten Teilsystem wird dadurch bestätigt.

Bezüglich der Konfiguration „Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube“ geht aus dem House of Configurations hervor, dass besonders die Oberflächen und Toleranzen der Kontaktpartner einen hohen Einfluss auf die Funktionalität der Konfiguration aufweisen. Daher werden die Anforderungen hinsichtlich der Toleranzen und Oberflächengüte der Welle auf die Achse übertragen. Zusätzlich wird die Bohrung der Lagerinnenringe so gewählt, dass die entstehende Passung zwischen Welle und Lager der Passung des Lagerinnenrings des Zylinderrollenlagers im Konzept entspricht, sodass der Einfluss der an dieser Stelle entstehenden Reibkraft untersucht werden kann. Die Sensorschraube wird wie im Konzept vorgesehen übernommen und damit auch alle Anforderungen an diese. Das eingeleitete Drehmoment wird daher für den Prototyp im Vergleich zum Konzept nicht angepasst. Die

<sup>308</sup> Eigene Darstellung.

absoluten Durchmesser der verwendeten Bauteile haben keinen direkten Einfluss auf die Konfiguration, woraufhin keine speziellen Anforderungen an diese gestellt werden und so gewählt werden, dass die Sensorschraube wie gefordert weiter verwendet werden kann und die Einleitung eines Drehmoments, aus dem eine Axialkraft in Höhe des Messbereichs der Sensorschraube hervorgeht, ohne Beschädigung möglich ist. Dabei wird jedoch keine Dauerfestigkeit der Komponenten gefordert.

Konfigurationen		Grad der Verteilung
1	Umformung des Drehmoments in Axial-, Radial- und Tangentialkraft	
2	Drehmoment von Zahnrad zu Welle übertragen	
3	Leiten der Axialkraft zum Sensor	5
3.1	Entgegenwirkende Reibkraft durch Passung	5
3.2	Entgegenwirkende Reibkraft durch Belastung	6
4	Wandlung des mechanischen Signals in elektrisches Signal	3
5	Leiten des elektrischen Signals	4
5.1	Rauschen bewegter Kontakt	4
5.2	Einfluss Medien	4

Abbildung 8-14: Grad der Verteilung der kritischen Konfigurationen des Konzepts des sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung<sup>309</sup>

Der zweite Prototyp zur Untersuchung der Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals“ wird ebenfalls als isolierter physischer Prototyp basierend auf den Erkenntnissen der Signalfflussanalyse in Abbildung 8-11 geplant. Bei diesem Prototyp können zunächst alle zur Übertragung des Drehmoments benötigten Funktionen und deren Teillösungen entfernt werden. Da jedoch die Drehung der Welle, beziehungsweise der elektrischen Kontaktstelle als essentiell für die Konfiguration angesehen wird, muss eine Teilfunktion zur Realisierung der Drehung der Welle gewählt werden. Zur Reduktion des Aufwands wird hierbei auf einen einfachen Riementrieb anstelle des Zahnrads zurückgegriffen. Auf die Verwendung der Sensorschraube wird bei diesem Prototyp ebenfalls verzichtet, da die Übertragung des elektrischen Signals nicht von dessen Quelle abhängig ist, wie das House of Configurations verdeutlicht. Die Quelle wird daher durch einen externen Signalgenerator ersetzt, der ein dem Signal der Sensorschraube ähnliches Signal erzeugen kann. Dies führt dazu, dass neben dem im Konzept vorhandenen elektrischen Kontakt von der Welle

<sup>309</sup> Eigene Darstellung.

zur Auswerteeinheit auch ein elektrischer Kontakt zwischen Signalgenerator und Welle existieren muss. Dieser wird auf der gegenüberliegenden Seite des Kontakts zwischen Welle und Auswerteeinheit realisiert und entspricht diesem Kontakt. Das CAD-Modell und die technische Zeichnung des Prototyps zur Untersuchung der Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals“, bestehend aus dem Gehäuse (1), der Welle mit aufgeschnittenem Zahnrad (2), dem Bauteil zur elektrischen Verbindung (3) und der Lagerung (4), sind in Abbildung 8-15 dargestellt. Bezüglich der Anforderungen an diesen Prototyp geht aus dem House of Configurations in Abbildung 8-13 hervor, dass beispielsweise von den Materialparameter der Welle kein Einfluss auf die Konfiguration erwartet wird. Daher können die Anforderungen hinsichtlich des Materials der Welle im Vergleich zum Konzept der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung gelockert werden. Für den Prototyp wird das Material der Welle daher durch Kunststoff substituiert wodurch die Welle zudem mittels additiver Fertigungsverfahren, beispielsweise dem *Fused Deposition Modelling*, hergestellt werden kann, wodurch der Herstellungsaufwand des Prototyps deutlich reduziert werden kann. Großer Einfluss auf die Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals“ wird hingegen von den Eigenschaften und Merkmalen und Eigenschaften des bewegten Kontakts erwartet. Hierbei werden daher die Anforderungen an das Konzept beziehungsweise die durch das Konzept gegebenen Eigenschaften und Merkmale auch beim Prototyp übernommen. Die in der Welle befindliche elektrische Verbindung zwischen dem Kontakt zum Signalgenerator und dem Kontakt zur Auswerteeinheit wird daher aus dem gleichen Material gefertigt, das in der Sensorschraube zum Einsatz kommt.

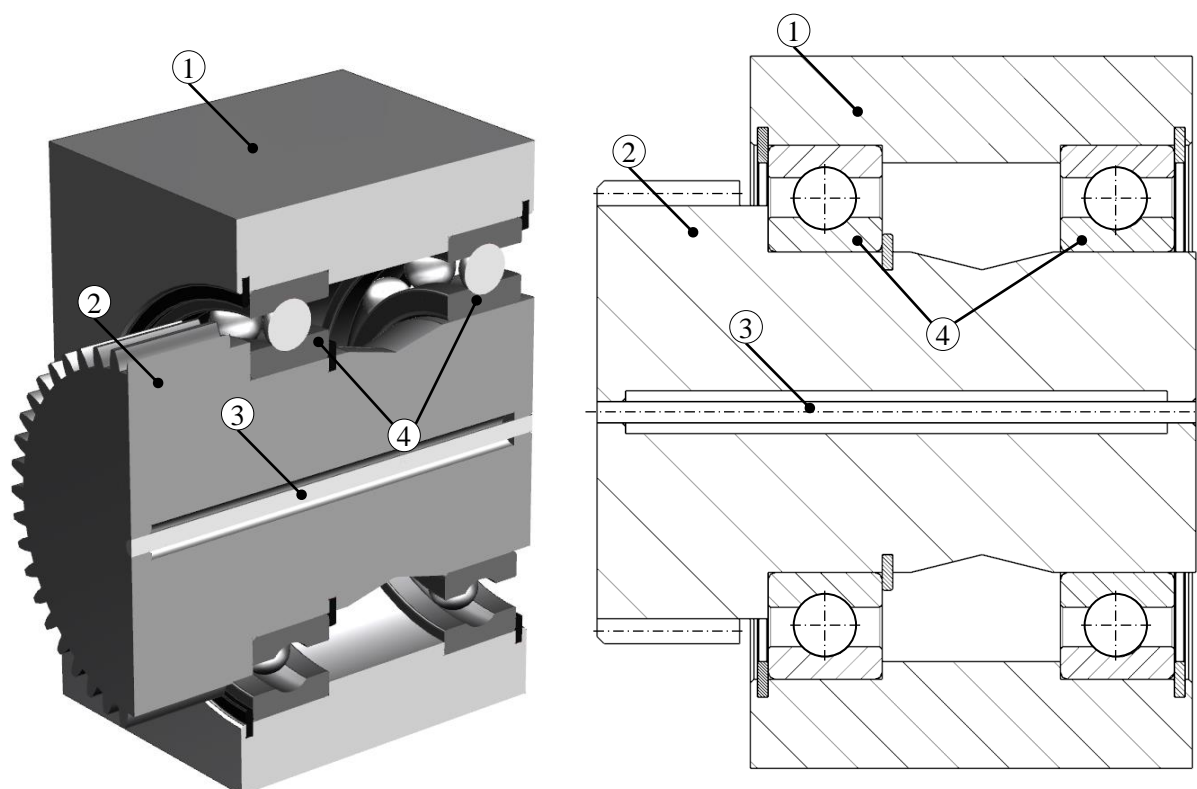


Abbildung 8-15: Prototyp der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung zur Untersuchung der Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals“<sup>310</sup>

<sup>310</sup> Eigene Darstellung.

Auch die Anforderungen an den Pin der Auswerteeinheit, der auf dem rotierenden Kontakt aufliegt, werden ohne Änderungen übernommen. Im Konzept ist vorgesehen, dass der rotierende Kontakt von äußeren Medien geschützt ist. Im Rahmen der prototypischen Untersuchung kann auf diesen Schutz, beziehungsweise die Umhausung, verzichtet werden. Da der Einfluss verschiedener Medien auf den rotierenden Kontakt und die Qualität des darüber übertragenen Signals zunächst nicht abgeschätzt werden kann, kann der Prototyp auch zur Exploration des Einflusses verschiedener Medien, beispielsweise verschiedener Öle mit und ohne Additive untersucht werden.

### 8.3 Entwicklung eines Prototyps einer sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung

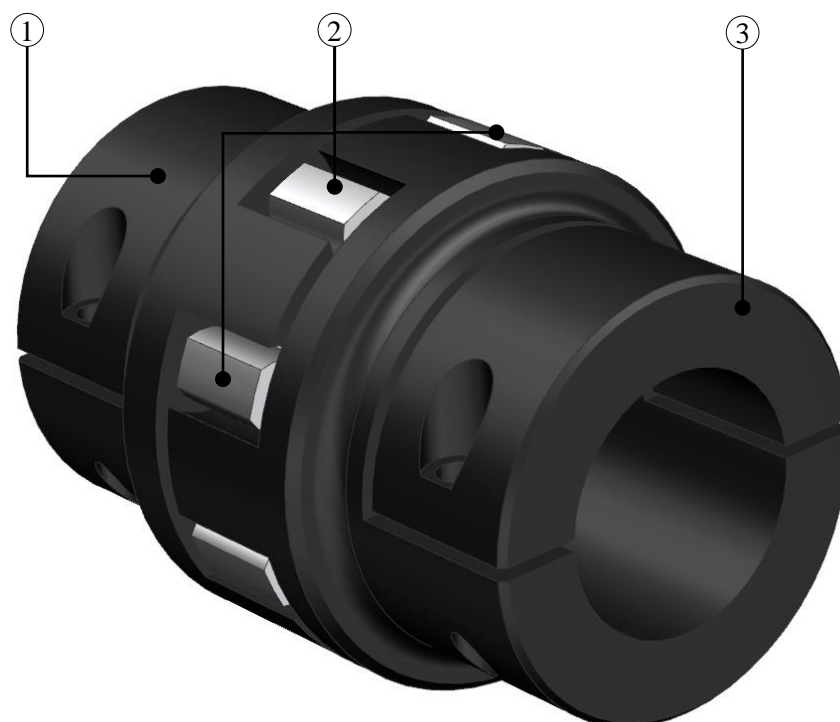


Abbildung 8-16: Konventionelle elastische Klauenkupplung<sup>311</sup>

Das dritte in dieser Arbeit vorgestellte Konzept, zu dem in diesem Abschnitt Prototypen entwickelt werden, ist das Konzept einer sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung. Bei der elastischen Klauenkupplung handelt es sich analog zur Federstegkupplung um eine nicht schaltbare Wellenkupplung zum Ausgleich verschiedener Versatzarten zwischen den verbundenen Wellen. Die auszugleichenden Versatzarten entsprechen dabei den in Abbildung 8-1 gezeigten. Die elastische Klauenkupplung besteht aus zwei metallischen Kupplungshälften, die mit jeweils vier Klauen versehen sind und mit der jeweiligen Welle über Klemmnaben (1 und 3) verbunden sind sowie dem elastischen Elastomerelement in Form eines Zahnkranzes (2) zwischen diesen Kupplungshälften, wie in Abbildung 8-16 dargestellt. Das Drehmoment wird daher über vier parallele Kraftflusspfade übertragen, wovon in einen Pfad das Sensorelement eingebracht wird. Wenn die Steifigkeit des

<sup>311</sup> Eigene Darstellung.

Sensorelements der Steifigkeit des ersetzten elastischen Elements entspricht, wird der Einfluss der Integration der Sensorik auf die Funktion der elastischen Klauenkupplung als irrelevant angesehen.

Im Gegensatz zur sensorintegrierenden Federstegkupplung ist die Idee der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung jedoch, das über die Kupplung übertragene Drehmoment zu messen. Schork et al. (2016) Dazu wird in einem Element des elastischen Zahnkranzes ein Sensorelement appliziert, über das der Verdrehwinkel der Kupplungshälften zueinander ermittelt wird. Aus dem Verdrehwinkel kann über die Drehsteifigkeit der elastischen Klauenkupplung auf das anliegende Drehmoment zurückgeschlossen werden. Das eingebrachte Sensorelement besteht aus zwei Halterungen (2) einem eingespannten Biegeplättchen (1), auf dem ein Dehnmessstreifen appliziert ist und einem Druckstück (3), das mittig auf das Biegeplättchen drückt. Der Aufbau des Konzepts ist in Abbildung 8-17 visualisiert. Über das Druckstück wird die Verdrehung der elastischen Klauenkupplung auf das Biegeplättchen übertragen, wodurch dieses gedehnt wird. Die entsprechende Dehnung wird mittels des DMS gemessen. Ähnlich der sensorintegrierenden Federstegkupplung in Abschnitt 8.1 ist das Ziel der Drehmomentmessung nicht die Überwachung der elastischen Klauenkupplung, sondern die Überwachung des Gesamtsystems. Im Gegensatz zum Einsatz einer Drehmomentmesswelle, die zusätzlich ins Gesamtsystem integriert werden müsste, treten bei der Verwendung der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung geringere zusätzliche Aufwände auf.

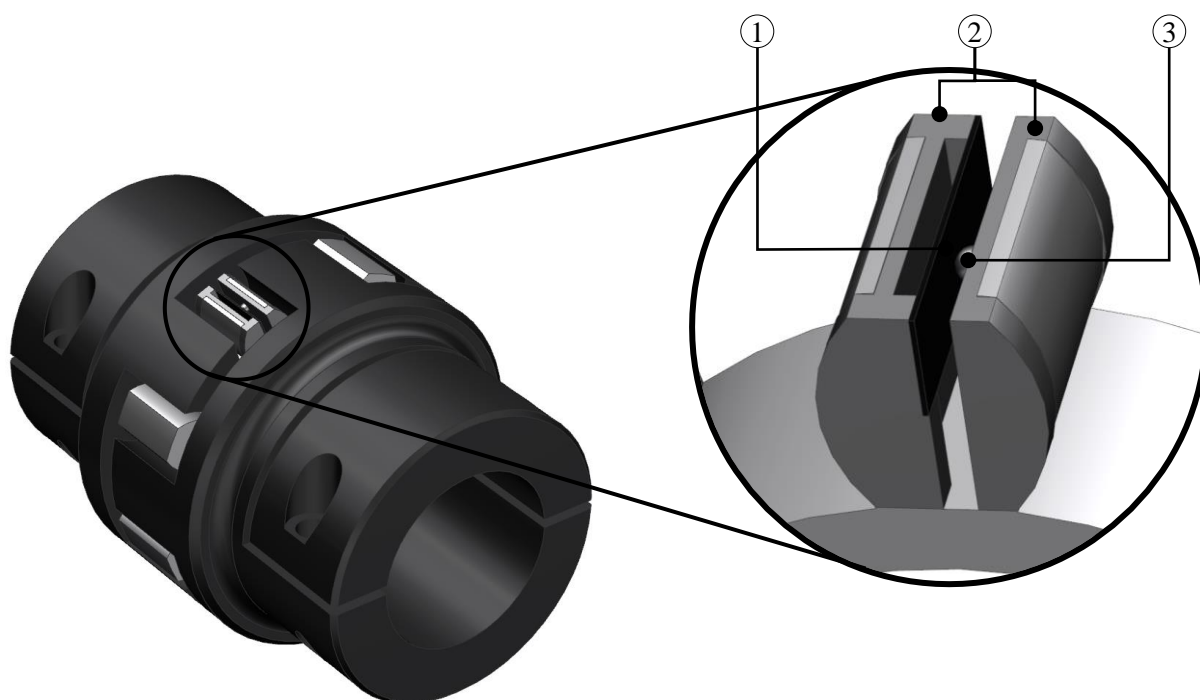


Abbildung 8-17: CAD-Modell des Konzepts der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung<sup>312</sup>

<sup>312</sup> Eigene Darstellung.

Analog zur Entwicklung der Prototypen der sensorintegrierenden Federstegkupplung, werden auch die Prototypen der sensorintegrierenden Prototypen nach dem dreischrittigen Ansatz in Abbildung 6-1 und dem aP<sup>3</sup>EM in Abbildung 5-16 entwickelt. Das Ziel der Prototypentwicklung betrifft den Nachweis der Funktionalität des Konzepts im Sinne der Überprüfung des Rückschlusses auf das anliegende Drehmoment durch Messung der am Biegeplättchen auftretenden Dehnung. Darüber hinaus ist das Ziel der Prototypentwicklung die Verifikation des linearen Zusammenhangs zwischen dem übertragenen Drehmoment und der Verdrehung der Wellen. Dieser Zusammenhang liegt der herstellerseitig angegebenen konstanten Drehfedersteifigkeit der elastischen Klauenkupplung beziehungsweise des verwendeten elastischen Elements zugrunde. Zur Verifikation dieses analytischen Modells wird daher die Entwicklung eines physischen Prototyps angestrebt.

Unter Zuhilfenahme der in Kapitel 7 vorgestellten Methoden, werden nun die Entwicklungsschwerpunkte der Prototypentwicklung definiert und die Anforderungen an diese Prototypen festgelegt. Dazu werden zunächst die Konfigurationen des Konzepts der sensorintegrierenden Federstegkupplung ermittelt und deren Kritikalität bewertet. Diese Bewertung ist Tabelle 9 zu entnehmen. Die Konfigurationen stimmen dabei bezüglich der Leitung des Drehmoments zwischen den Wellen und dem Ausgleich verschiedener Versätze mit den Konfigurationen der sensorintegrierenden Federstegkupplung überein.

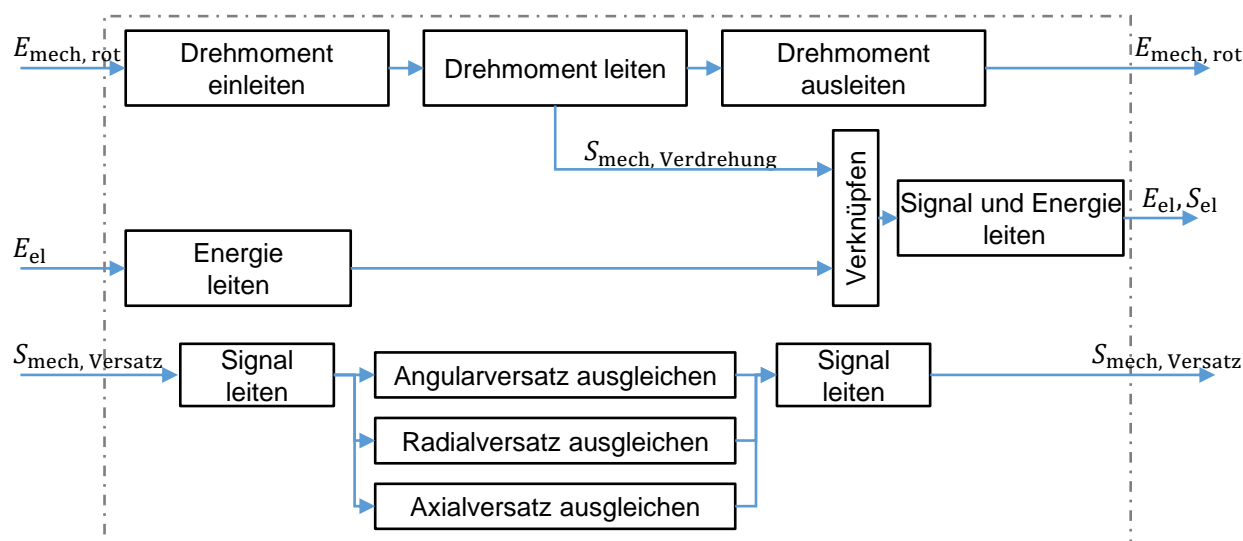
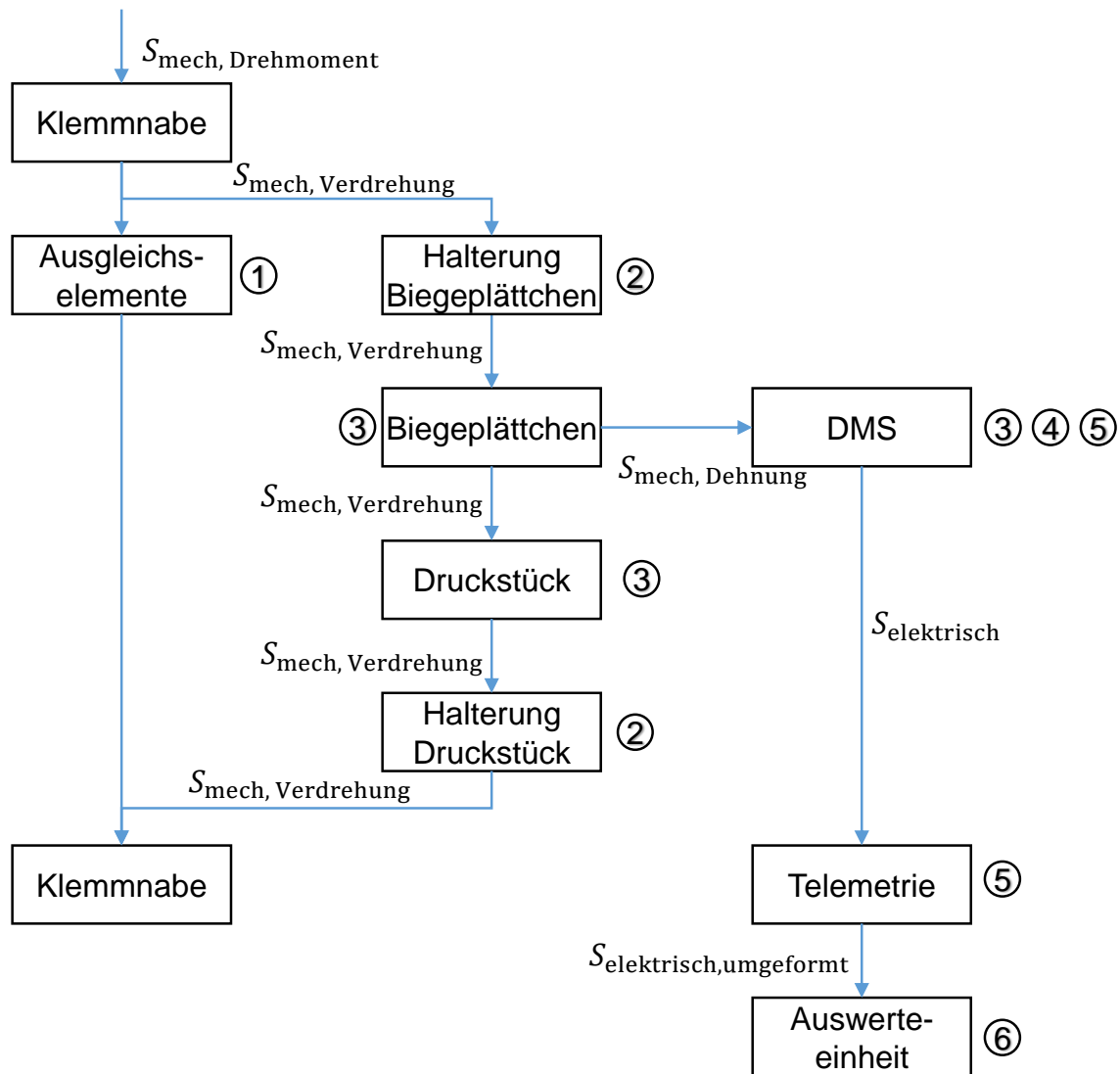


Abbildung 8-18: Zusammenhang der Teilfunktionen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung<sup>313</sup>

Darüber hinaus verfügt die sensorintegrierende elastische Klauenkupplung über die Konfigurationen „Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ sowie „Dämpfung der Drehschwingungen“. Die Bewertung zeigt, dass die Konfiguration „Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ als kritisch anzusehen ist, da diese Konfiguration in dieser Form in keiner Vorgängergeneration und in keinem vergleichbaren Produkt eingesetzt wird und das Vorwissen der Entwickelnden bezüglich dieser Konfiguration gering ist. Die Konfiguration muss zudem für das Produkt als äußerst relevant betrachtet werden, da sie ein Alleinstellungsmerkmal darstellt und bei nichterfüll-

<sup>313</sup> Eigene Darstellung.

len dieser Konfiguration kein Vorteil im Vergleich zur konventionellen elastischen Klauenkupplung besteht. Weiter wird bei der Umsetzung eine nicht vernachlässigbare technische Schwierigkeit erwartet, um die Applikation des Sensorelements im Elastomerelement umzusetzen. Da es sich bei dieser kritischen Konfiguration um eine mit dem Signalfluss verbundene Konfiguration handelt, wird dieser Signalfluss näher analysiert. Dazu wird zunächst der in Abbildung 8-18 dargestellte Zusammenhang der Teilfunktionen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung erarbeitet.



- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| ① $S_{\text{mech, Material}}$       | ④ $S_{\text{mech, Klebung}}$           |
| ② $S_{\text{mech, Nachgiebigkeit}}$ | ⑤ $S_{\text{elektrisch, Kontakt}}$     |
| ③ $S_{\text{mech, Positionierung}}$ | ⑥ $S_{\text{elektrisch, Übertragung}}$ |

Abbildung 8-19: Signalflussanalyse des nutzbaren Signals der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung<sup>314</sup>

<sup>314</sup> Eigene Darstellung.

Ausgehend vom Zusammenhang der Teilfunktionen wird nun die Signalflussanalyse durchgeführt. Das als nutzbar identifizierte Signal ist die Verdrehung beziehungsweise der Verdrehwinkel, der sich infolge des übertragenen Drehmoments und der Elastizität der Klauenkupplung zwischen den Wellen und damit zwischen den Kupplungshälften einstellt. Abbildung 8-19 zeigt die Signalflussanalyse. Zu erkennen ist, dass es sich auch bei diesem Konzept, ähnlich zum Konzept der sensorintegrierenden Federstegkupplung in Abschnitt 8.1 um die Nutzung eines parallelen Kraftleitungspfades handelt, in den das Sensorelement integriert wird. Im Gegensatz zur Federstegkupplung wird in diesem Fall jedoch ein vorhandener Kraftleitungspfad, in Form eines Ausgleichselements, durch das Sensorelement substituiert, anstelle der Einbringung eines zusätzlichen Kraftleitungspfades.

Das Drehmoment wird nun in Abhängigkeit der Steifigkeiten der Ausgleichselemente übertragen. Ist die Steifigkeit des Kraftleitungspfades mit eingebrachtem Sensorelement deutlich geringer als die Steifigkeit der verbleibenden Elemente, kann das darüber übertragene Drehmoment vernachlässigt werden. In diesem Fall sinkt die Gesamtdrehfedersteifigkeit der Kupplung, wodurch bei gleichbleibendem übertragenem Moment erhöhte Verdrehwinkel erwartet werden. Dies muss bei der Auswertung des Sensorsignals berücksichtigt werden.

Darüber hinaus kann mittels der Signalflussanalyse eine mögliche Störgröße ausgehend von den Materialparametern der Ausgleichselemente identifiziert. Liegt keine konstante Drehfedersteifigkeit vor, sondern eine Abhängigkeit, beispielsweise vom Verdrehwinkel oder dessen zeitlicher Änderung, stimmt dies nicht mit den mittels Modell erwarteten Werten überein und es liegt Modellunsicherheit vor.<sup>315</sup> Die entsprechende Störgröße ist mit  $S_{\text{mech,Material}}$  in der Signalflussanalyse zu erkennen. Weitere Störgrößen sind im Bereich der Ausgleichselemente nicht zu identifizieren.

Weitere mechanische Störgrößen ergeben sich aus den Halterungen des Biegeplättchens und des Druckstücks. Beide dieser Halterungen werden als ideal starr angenommen, was auch für die jeweilige Verbindung zum Biegeplättchen beziehungsweise Druckstück gilt. Entspricht diese Annahme nicht der Realität, ergibt sich die Störgröße  $S_{\text{mech,Nachgiebigkeit}}$ . Die Positionierungen des Druckstücks sowie des Biegeplättchens in der jeweiligen Halterung haben großen Einfluss auf die Aussagekraft der mittels Dehnmessstreifens ermittelten Daten. Bei Änderungen der Positionierung zu der im Konzept und Berechnungsmodell vorgesehenen Position, tritt die Störgröße  $S_{\text{mech,Positionierung}}$  auf, durch die das Messergebnis verfälscht wird. Liegen das Biegeplättchen und Druckstück beispielsweise radial weiter außen als angenommen, tritt eine höhere Deformation des Biegeplättchens bei einem entsprechenden Moment auf, wodurch die Berechnung des Moments auf Basis der gemessenen Dehnung einen zu hohen Wert ergibt. Vergleichbares gilt für die fehlerhafte Positionierung des Dehnmessstreifens auf dem Biegeplättchen. Analog zur sensorintegrierenden Federstegkupplung lassen sich für den Signalfluss vom Dehnmessstreifen über die Telemetrie hin zur Auswerteeinheit die gleichen Störgrößen ermitteln. Diese betreffen die Verklebung des DMS ( $S_{\text{mech,Klebung}}$ ), dessen Kontaktierung ( $S_{\text{elektrisch,Kontakt}}$ ), den Kontakt zur Telemetrieinheit sowie die Übertragung des Signals ( $S_{\text{elektrisch,Übertragung}}$ ).

Die Analyse des Signalflusses zeigt, dass die Konfiguration „*Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal*“ und der dazugehörigen Funktionen nicht von der Über-

<sup>315</sup> Vgl. Würtenberger (2017), S. 14.

tragung des elektrischen Signals an die Auswerteeinheit abhängt. Analog zu den Beispielen zur sensorintegrierenden Federstegkupplung und der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung in den Abschnitten 8.1 und 8.2 führen Störgrößen, die auf diese Übertragung einwirken jedoch dazu, dass die Funktionalität der Konfiguration „Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ nicht eindeutig überprüft werden kann, beziehungsweise bei Abweichungen zwischen den erwarteten Werten und den gemessenen Werten keine Fehlerursache zweifelsfrei bestimmt werden kann. Daraus resultiert, dass die Konfiguration „Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ zunächst isoliert mittels physischem Prototyp untersucht wird. Es wird erwartet, dass die Umformung des mechanischen Signals infolge des Drehmoments in die Verdrehung der Wellenenden aufgrund der Werkstoffeigenschaften des Elastomers von der Dynamik des Drehmoments abhängig ist. Steigt das Drehmoment in kurzer Zeit stark an, wird angenommen, dass sich ein kleinerer Verdrehungswinkel und damit eine geringere Dehnung am Biegeplättchen einstellen, als bei einem Anstieg des Drehmoments über einen längeren Zeitraum. Dieser Zusammenhang und die Auswirkungen auf die Aussagefähigkeit der am Biegeplättchen gemessenen Dehnung soll mit dem Prototyp untersucht werden.

Konfigurationen	Kritikalität				Klemmnabe					Ausgleichselemente					Halterung BP								
	Neuheit	Technische Scheitrigkeit	Relevanz	Gesamtkritikalität	Durchmesser	Oberflächengüte	Reibkoeffizient	Klemmkraft	Länge	...	Breite	Dicke	Anzahl	Drehsteifigkeit	Material	...	Steifigkeit	Position Nut	Breite	Höhe	Material	...	
1 Übertragen des Drehmoments zwischen den verbunden Wellen	1	1	4	4																			
2 Ausgleichen des Wellenversatzes	1	1	4	4																			
3 Wandeln der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal	4	4	10	160	0	0	0	4	4		1	1	1	4	4		10	10	4	4	4		
3.1 Abweichungen aufgrund der Nachgiebigkeit					0	0	0	10	0		0	0	0	0	0		10	0	4	4	10		
3.2 Abweichungen aufgrund der Positionierung					0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0	10	4	4	0		
3.3 Abweichungen aufgrund der Verklebung					0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
4 Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit	4	4	4	64	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
4.1 Abweichungen aufgrund der Kontaktierung					0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		
4.2 Abweichungen aufgrund der Übertragungsstrecke					0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		

Abbildung 8-20: House of Configurations der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung – Teil 1<sup>316</sup>

<sup>316</sup> Eigene Darstellung.

Konfigurationen		Biegeplättchen					Druckstück					Halterung DS					DMS			Telemetrie					
		Material	Steifigkeit	Positionierung	Größe	Dauerfestigkeit	...	Steifigkeit	Positionierung	Geometrie	Dauerfestigkeit	...	Steifigkeit	Positionierung	Breite	Länge	...	Position	Verklebung	Kontaktierung	...	Kontaktierung	Bandbreite	Strombedarf	...
1	Übertragen des Drehmoments zwischen den verbunden Wellen																								
2	Ausgleichen des Wellenversatzes																								
3	Wandeln der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal	4	4	10	10	0	10		0		4	10	0	0		10	10	10			0	0	0		
3.1	Abweichungen aufgrund der Nachgiebigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	4	4		0	0	0			0	0	0		
3.2	Abweichungen aufgrund der Positionierung	0	0	10	4	0	0	10	4	0	0	10	4	4		10	0	0			0	0	0		
3.3	Abweichungen aufgrund der Verklebung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	10	0			0	0	0		
4	Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0			10	10	10		
4.1	Abweichungen aufgrund der Kontaktierung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	10			10	0	0		
4.2	Abweichungen aufgrund der Übertragungsstrecke	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0			0	10	0		

Abbildung 8-21: House of Configurations der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung – Teil 2<sup>317</sup>

Basierend auf der Identifikation der kritischen Konfigurationen und der identifizierten Störgrößen, können nun mittels House of Configurations Anforderungen an Prototypen von den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abgeleitet werden. Das House of Configurations der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung ist in Abbildung 8-20, Abbildung 8-21 und Abbildung 8-22 gezeigt. Durch die Auswertung des Grads der Verteilung zeigt sich zunächst, dass die Konfiguration „Wandeln Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ einen hohen Grad der Verteilung aufweist und daher eine Beeinflussung durch viele Eigenschaften und Merkmale der beteiligten Komponenten vorliegt. Zur Untersuchung dieser Konfigurationen müssen daher die identifizierten beteiligten Komponenten, die einen Einfluss auf diese Konfiguration aufweisen, im Prototyp abgebildet werden. Hinsichtlich der auf diese Konfiguration wirkenden Störgrößen, kann lediglich die Abweichung durch eine fehlerhafte Verklebung der Dehnmessstreifen durch einen stark isolierten Prototyp untersucht werden. Abweichungen aufgrund von Nachgiebigkeiten und Positionierung zeigen hingegen einen vernetzten Zusammenhang zu den Komponenten des Konzepts, so dass zu deren Untersuchung ein vollständigerer Prototyp entwickelt werden muss. Zur Untersuchung der Konfiguration „Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit“ hingegen, bietet sich eine isolierte Untersuchung in einem Teilsystem an, da ein geringer Grad der Verteilung vorliegt und Einflüsse fast ausschließlich durch die Komponenten des Telemetriesystems zu erwarten sind.

<sup>317</sup> Eigene Darstellung.

Zu erkennen ist zudem, dass die Konfiguration „Wandeln der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“ sowie die Störgrößen bei dynamischem Betrieb der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung stark von den Materialeigenschaften des Zahnkranzes abhängen. Dabei ist es jedoch nicht ausschlaggebend, in welcher geometrischen Form dieser Zahnkranz vorliegt. Das bedeutet, dass die Abstandsänderung der Klauenkupplungshälften und der damit verbundene Druck des Druckstücks auf das mit Dehnmessstreifen versehene Biegeplättchen, nicht durch eine Verdrehung von Wellenenden erfolgen muss, sondern auch in axialer Richtung (translatorisch) erfolgen kann.

Konfigurationen		Grad der Verteilung
1	Übertragen des Drehmoments zwischen den verbunden Wellen	
2	Ausgleichen des Wellenversatzes	
3	Wandeln der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal	22
3.1	Abweichungen aufgrund der Nachgiebigkeit	8
3.2	Abweichungen aufgrund der Positionierung	11
3.3	Abweichungen aufgrund der Verklebung	1
4	Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit	3
4.1	Abweichungen aufgrund der Kontaktierung	2
4.2	Abweichungen aufgrund der Übertragungsstrecke	1

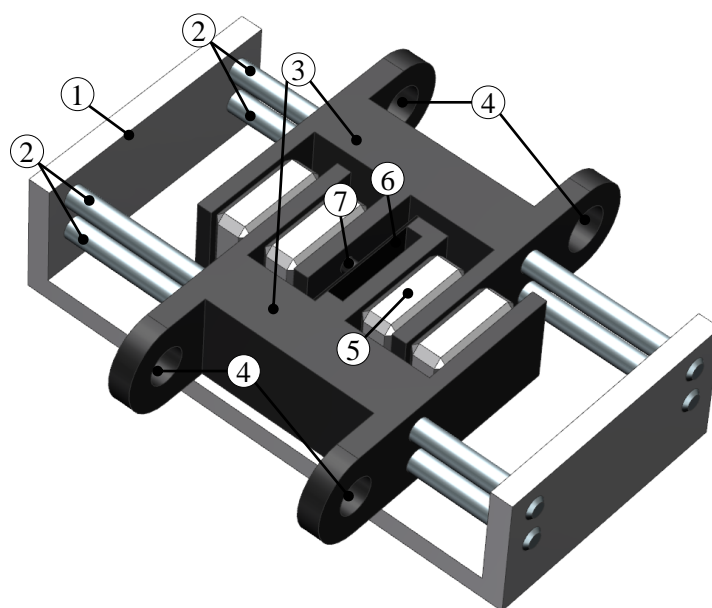
**Abbildung 8-22: Grad der Verteilung der kritischen Konfigurationen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung<sup>318</sup>**

Die Anforderungen hinsichtlich der Geometrie des Zahnkranzes und der Klauenkupplungshälften werden daher stark gelockert und eine Geometrie gewählt, die den Fertigungsaufwand des Prototyps stark reduziert. Diese Geometrie muss jedoch den Anforderungen an die Parallelschaltung der elastischen Elemente und des Sensorelements entsprechen. Um den durch das Drehmoment hervorgerufenen Versatz der Kupplungshälften im Prototyp abzubilden, werden die translatorischen Kupplungsteile mit Schnittstellen für einen Linearmotor zum Aufbringen der Kräfte und eine Kraftmessung zum Abgleich der aus der Verformung des Biegeplättchens ermittelten Kraft und der tatsächlich übertragenen Kraft. Dies entspricht der in Abschnitt 7.5 vorgestellten Möglichkeit, Teillösungen gewisser Teilfunktionen zu substituieren. Daraus ergeben sich Anforderungen an den Prototyp, die an das Produkt in Entwicklung nicht gestellt werden. An den Linearmotor wird beispielsweise

<sup>318</sup> Eigene Darstellung.

die Anforderung gestellt, dass dieser über eine ausreichend hohe Stellkraft verfügt, um bei quasistatischer Belastung einen Versatz der translatorischen Kupplungsteile zu ermöglichen, der zu einer ausreichend hohen Dehnung am Biegeplättchen führt. Diese Dehnung kann beispielsweise 80% der Elastizitätsgrenze des Biegeplättchens betragen. Zudem muss der Linearmotor in der Lage sein, Kräfte mit einer Dynamik einzubringen, die der erwarteten Dynamik der Einleitung des Drehmoments in das Produkt in Entwicklung entspricht. Das CAD-Modell und die technische Zeichnung des Prototyps der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung sind in Abbildung 8-23 und Abbildung 8-24 dargestellt. Zu erkennen sind die Grundplatte (1) mit den Linearführungen (2), auf welchen die Kupplungsteile (3) mit den Schnittstellen für Linearmotoren (4) montiert sind sowie das Elastomerelement (5), das Biegeplättchen (6) und das Druckstück (7).

Das House of Configurations zeigt, dass die Positionierung des Druckstücks und des Biegeplättchens zueinander sowie die Positionierung des Dehnmessstreifens auf dem Biegeplättchen von hoher Bedeutung sind, weshalb die Anforderungen an das Produkt in Entwicklung diesbezüglich für den Prototyp übernommen werden. Dabei wird der Betrag der Abmessungen des Biegeplättchens und des Druckstücks jedoch als weniger ausschlaggebend eingeschätzt, da dadurch lediglich eine Änderung der Höhe der gemessenen Dehnung erwartet wird.



**Abbildung 8-23: CAD-Modell des Prototyps der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung zur Untersuchung der Konfiguration „Wandlung der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal“<sup>319</sup>**

Bei dem Produkt in Entwicklung sind drei Zähne des Zahnkranzes mit dem Sensorelement parallelgeschaltet. Die Anzahl dieser Elemente hat jedoch keinen direkten Einfluss auf die am Biegeplättchen gemessene Dehnung. Die Gesamtsteifigkeit und die resultierende Dämpfungskonstante beeinflussen hingegen den quantitativen Verlauf der gemessenen Dehnung. Der qualitative Verlauf, der bei dieser prototypischen Untersuchung im Vordergrund steht, ist wiederum weniger abhängig von der Höhe dieser Parameter. Daher wird

<sup>319</sup> Eigene Darstellung.

das Material des Elastomers im Prototyp entsprechend des Materials des Elastomers im Produkt in Entwicklung übernommen, wohingegen die Anforderungen an die Abmessung der einzelnen Zähne gelockert werden und daher nicht vom Produkt in Entwicklung übernommen werden.

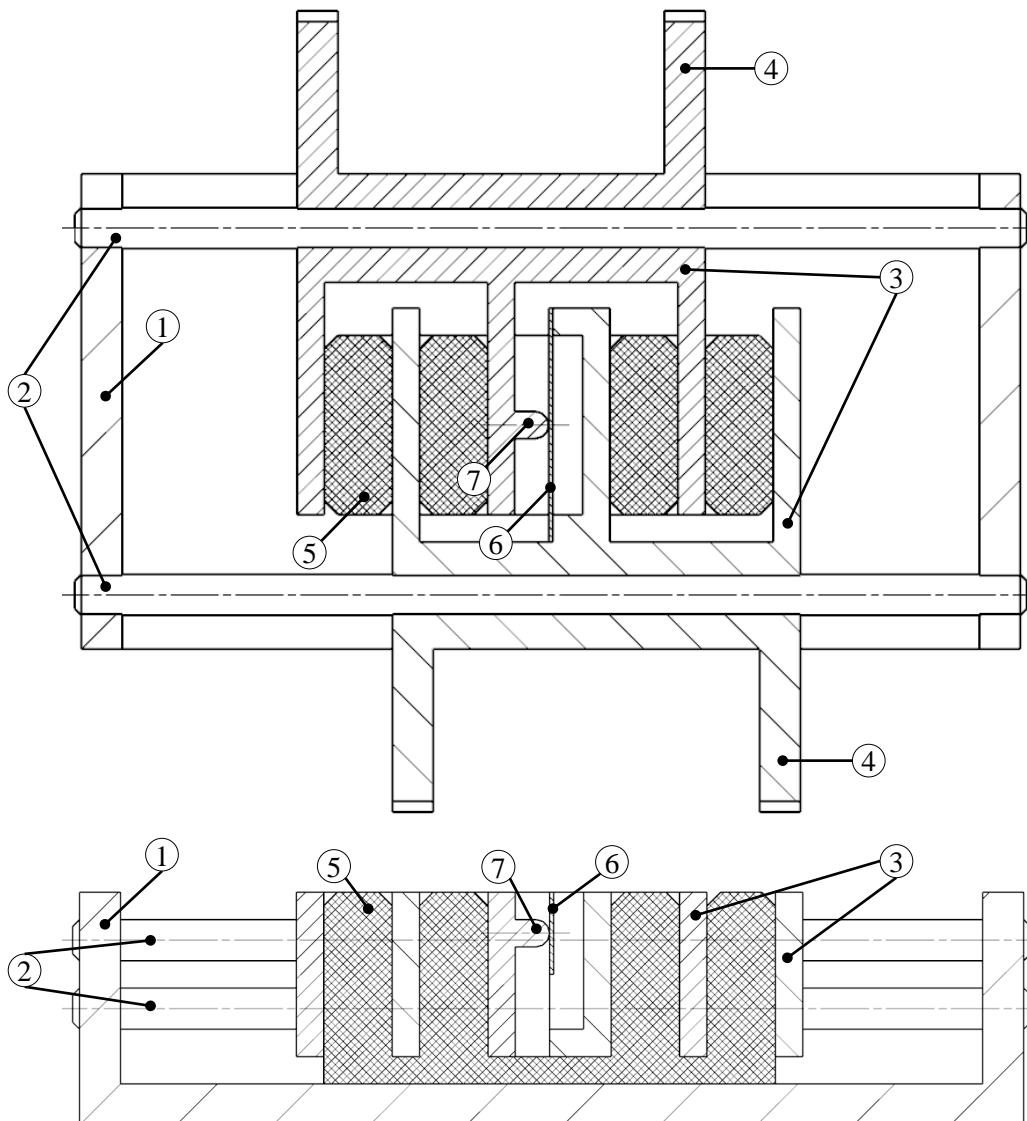


Abbildung 8-24: Technische Zeichnung des Prototyps der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung<sup>320</sup>

<sup>320</sup> Eigene Darstellung.

## 9 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die wichtigsten und zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und in den Kontext der Forschung hinsichtlich der methodischen Entwicklung von Prototypen eingeordnet. Dazu wird diskutiert, inwieweit die Ergebnisse dieser Arbeit zur Erreichung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Ziele beitragen und welchen Beitrag diese Ergebnisse zur Beantwortung der in Abschnitt 3.2 aufgestellten Forschungsfragen leisten. Dabei wird der Nutzen der vorgestellten Modelle und Methoden beschrieben und kritisch hinterfragt.

In dieser Arbeit werden das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung, das auf dem Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung aufbauend auf GRÜNER (2001) und BIRKHOFER ET AL. (1998) basiert (vgl. Kapitel 4) sowie das detaillierte Prozessmodell der Prototypen, aufbauend auf den Arbeiten von HEIDEMANN (2001) (vgl. Abschnitt 5.3), vorgestellt. Anhand dieser Modelle sind die Beschreibung des Entwicklungsprozesses von Prototypen sowie der mit diesen Prototypen durchgeführte Lernprozess der Entwickelnden im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses abbildbar. Insbesondere das detaillierte Prozessmodell des Prototypings lässt sich dabei einerseits dazu einsetzen, die anstehende Prototypingaktivität im Sinne des Frontloadings zu planen, indem bereits bei der Entwicklung des entsprechenden Prototyps die Einflüsse auf das Ergebnis der Untersuchung des Prototyps vorausgedacht werden, wodurch Maßnahmen ergriffen werden können, die die Aussagekraft und Verlässlichkeit dieses Ergebnisses erhöhen. Andererseits dient das detaillierte Prozessmodell des Prototypings dazu, die Prototypingaktivität und den dabei durchgeführten Lernprozess zu dokumentieren, sodass die Interpretation der Ergebnisse der prototypischen Untersuchung auch in späteren Entwicklungsphasen des Produkts in Entwicklung nachvollzogen werden kann. Das abgestimmte Prototypen-, Produkt- und Prozessmodell sowie das detaillierte Prozessmodell des Prototypings dienen darüber hinaus dazu, das Verständnis über die Wichtigkeit einer gezielten und methodischen sowie zielgerichteten Entwicklung von Prototypen zu fördern und den intuitiven Anteil der Prototypingaktivitäten zu reduzieren. Dabei wird der Fokus der Prototypenentwicklung bereits zu Beginn auf die Festlegung des Ziels der Prototypingaktivität gelegt und das Festlegen von Anforderungen an die zu entwickelnden Prototypen wird gefördert.

Zur Festlegung der Anforderungen wird in Kapitel 6 dieser Arbeit eine dreistufige Herangehensweise vorgestellt, durch die Anforderungen an Prototypen basierend auf dem Ursprung dieser Anforderungen schrittweise festgelegt werden können. Im ersten Schritt wird dazu das Ziel der Prototypingaktivität festgelegt, woraufhin im zweiten Schritt übergeordnete Anforderungen festgelegt werden können, deren Ursprung nicht in den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung, sondern den Rahmenbedingungen und Firmenvorgaben liegt. Im dritten Schritt werden anschließend bezogene Anforderungen, basierend auf den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung abgeleitet. Diese Anforderungen betreffen beispielsweise die gleichen Eigenschaften und Merkmale und Eigenschaften des Produkts in Entwicklung, unterscheiden sich jedoch in deren Werten, zum Beispiel in Form einer Lockerung, wenn die entsprechende Eigenschaft beziehungsweise die entsprechende Eigenschaft keinen Einfluss auf das Ziel der Prototypingaktivität hat.

Die Anforderungsermittlung und das Setzen der Entwicklungsschwerpunkte wird durch die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden, einerseits durch die Signalflossanalyse in Abschnitt 7.2 und andererseits durch das House of Configurations in Abschnitt 7.3 unter-

stützt. Durch den Einsatz dieser Methoden sind Produktentwickelnde in der Lage, das Produkt in Entwicklung dahingehend zu analysieren, welche Anforderungen an einen Prototyp gestellt werden müssen, der zur Untersuchung der Funktionalität des Produkts in Entwicklung eingesetzt werden soll. Dies stellt einen Beitrag zur Entwicklung physischer Prototypen dar, mit dem Ziel einer einerseits hohen Effektivität und andererseits hohen Effizienz der entwickelten Prototypen. Die Steigerung der Effektivität ergibt sich daraus, dass der Fokus der zu entwickelten Prototypen auf die Fragestellungen gelegt wird, die mit dem Prototyp beantwortet werden sollen. Dabei wird der Ansatz verfolgt, dass die Fragen so isoliert wie möglich jedoch so umfassend wie nötig untersucht und beantwortet werden. Entsprechend werden im jeweiligen Prototyp möglichst wenige durch die Signalflussanalyse identifizierte Störgrößen im Prototyp abgebildet, sodass bei Abweichungen zwischen dem erwarteten Verhalten des Prototyps und dem auftretenden Verhalten, diese Abweichungen auf die abgebildete Störgröße zurückgeführt werden können. Werden Störgrößen nicht isoliert betrachtet, besteht andernfalls das Risiko, dass Fehler, im Sinne von Abweichungen zwischen erwartetem und auftretendem Verhalten, nicht auf deren Ursache zurückgeführt werden können. Darüber hinaus ergibt sich durch die Anwendung des House of Configurations und die damit verbundene Ermittlung von Anforderungen an Prototypen zur Untersuchung und Beantwortung der festgelegten Fragestellungen eine Steigerung der Effizienz der Prototypen gegenüber dem intuitiven Aufbau physischer Prototypen auf Basis des aktuellen Entwicklungsstandes des Produkts in Entwicklung. Diese Effizienzsteigerung ergibt sich daraus, dass der Prototyp nur die Anforderungen an Eigenschaften und Merkmale des Produkts in Entwicklung erfüllt, die zur Beantwortung der untersuchten Fragestellung essentiell notwendig sind. Anforderungen an Merkmale und Eigenschaften, die hingegen keinen Einfluss auf die untersuchte Fragestellung haben, werden gelockert oder gänzlich ausgeschlossen. Dadurch werden Aufwände, die zur Erreichung der Anforderungen an Merkmale und Eigenschaften des Produkts in Entwicklung aufgebracht werden müssen, jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis der Prototypingaktivität haben, minimiert. Die eingesparten Aufwände umfassen dabei beispielsweise verwendete Materialien, deren Güte reduziert werden kann, die dazugehörigen Fertigungsverfahren und einzuhaltende Toleranzen der Prozessparameter sowie zeitliche Aufwände zur Nachbereitung und Interpretation der im Rahmen der Prototypingaktivität gesammelten Informationen.

Neben dem Beitrag zur Unterstützung der Entwicklung von Prototypen im Rahmen der Produktentwicklung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, leistet diese Arbeit auch einen Beitrag zur wissenschaftlichen Untersuchung der Prototypenentwicklung. Dazu werden die drei Forschungsfragen aus Abschnitt 3.2 beantwortet. Die Grundlage dieser Beantwortung bildet die Hypothese, dass Produktentwicklungsmodelle und -methoden als Basis für die Erstellung von Prototypenentwicklungsmodellen und -methoden durch Anpassungen verwendbar sind. Diese Hypothese wird durch die Vorstellung des abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklungsmodells sowie durch das detaillierte Prozessmodell des Prototypings auf Seiten der Modelle und durch das House of Configurations auf Seiten der Methoden initial bestätigt. Die Anpassungen an diesen Modellen und der Methode basieren dabei auf den Unterschieden zwischen Produkten und Prototypen, die im Rahmen der Beantwortung der ersten Forschungsfrage in Kapitel 4 erarbeitet werden.<sup>321</sup> Als Hauptunterschied wird auf Basis der Literaturrecherche das geänderte Ziel

---

<sup>321</sup> Vgl. FF 1, Abschnitt 3.2

ausgemacht, das nun nicht mehr hauptsächlich in der Durchführung des durch das Produkt in Entwicklung gegebenen Prozesses liegt, sondern in der Durchführung, beziehungsweise Unterstützung, des Lernprozesses der Produktentwickelnden. Durch das differierende Ziel ändern sich zudem die Nutzungsphase sowie die Zielgruppe des Prototyps im Vergleich zum Produkt. Dies zieht eine Änderung der Anforderungen an Prototypen im Vergleich zum jeweiligen Produkt in Entwicklung nach sich, einerseits im Sinne der Lockerung oder des Verzichts auf gewissen Anforderungen und andererseits im Sinne der Aufnahme zusätzlicher Anforderungen aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aufgrund unternehmensinterner Vorgaben oder Applikation zusätzlicher Messtechnik zur Überwachung des Verhaltens des Prototyps.

Aufbauend auf den ermittelten Unterschieden zwischen Produkten und Prototypen befasst sich die zweite in dieser Arbeit untersuchte Forschungsfrage damit, ob beziehungsweise welche existierenden Produktentwicklungsmodelle und -methoden zur Entwicklung von Prototypen eingesetzt werden können und welche Anpassungen dazu an diesen Methoden und Modellen vorgenommen werden müssen.<sup>322</sup> Diese Forschungsfrage wird, ähnlich zur Hypothese, dadurch beantwortet, dass in den Kapiteln 4 bis 7 entsprechende Methoden und Modelle vorgestellt werden. Dabei fließen die Unterschiede hinsichtlich der Zielstellung des Prototyps im Vergleich zum Produkt sowie die geänderte Nutzungsphase in das Modell der abgestimmten Prototypen-, Produkt- und Prozessentwicklung ein, das abgesehen von diesen Änderungen vergleichbar mit dem Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung ist. Da Prototypen mit dem Ziel entwickelt werden, mehr über das Produkt in Entwicklung zu lernen und die Wissensbasis der Entwickelnden zu steigern, entspricht der mit Prototypen durchgeführte Prozess einem Lernprozess, der durch Anpassungen am detaillierten Prozessmodell nach HEIDEMANN (2001) mit dem detaillierten Prozessmodell des Prototypings abgebildet werden kann. Die Anpassungen bilden dabei ab, dass der Lernprozess im Rahmen des Prototypings in zwei Subprozesse unterteilt werden kann, da zunächst lediglich Informationen mit und über den Prototyp gesammelt werden. Diese Informationen müssen anschließend auf das Produkt in Entwicklung übertragen werden beziehungsweise diskutiert werden, inwieweit diese Informationen auf das Produkt in Entwicklung übertragbar sind. Einen Anhaltspunkt dazu bietet die in Abschnitt 5.5 vorgestellte Produktmodellpyramide. Ausgehend von den Änderungen am Prototyp im Vergleich zum Produkt auf den verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide kann die Aussagekraft der mit dem Prototyp gesammelten Informationen bewertet werden. Die Produktmodellpyramide stellt damit ein weiteres Modell der Produktentwicklung dar, das im Rahmen der Prototypenentwicklung genutzt werden kann.

Die dritte in dieser Arbeit behandelte Forschungsfrage bezieht sich auf den Effekt, den die Anwendung von Prototypenentwicklungsmethoden auf das Ergebnis der Prototypenentwicklung hat.<sup>323</sup> Diese Forschungsfrage wird initial durch die in Abschnitt 8 vorgestellten Beispiele der Entwicklung von Prototypen unter Einsatz der in dieser Arbeit beschriebenen Prototypenentwicklungsmethoden beantwortet. Die Entwicklung der Prototypen zur sensorintegrierenden Federstegkupplung (vgl. Abschnitt 8.1), der sensorintegrierenden Welle-Nabe-Verbindung (vgl. Abschnitt 8.2) und der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung (vgl. Abschnitt 8.3) zeigt, dass durch den Einsatz der Prototypenentwicklungsmethoden eine deutliche Abstraktion des Produkts in Entwicklung stattfindet, dabei

---

<sup>322</sup> Vgl. FF 2, Abschnitt 3.2

<sup>323</sup> Vgl. FF 3, Abschnitt 3.2

jedoch der Fokus der prototypischen Untersuchung auf einzelne Fragestellungen gelegt wird. Durch die Anwendung der Prototypenentwicklungsmethoden ist es möglich, die Anforderungen an die Prototypen derart zu ermitteln, dass lediglich die Anforderungen an den Prototyp gestellt werden, die zur Beantwortung der offenen Fragen zwingend erforderlich sind, beziehungsweise mit den Anforderungen an das Produkt in Entwicklung übereinstimmen müssen, sodass das Verhalten des Prototyps mit dem Verhalten des Produkts in Entwicklung vergleichbar ist und die mittels Prototyp gesammelten Informationen auf das Produkt in Entwicklung übertragen werden können.

Durch den Einsatz der Prototypenentwicklungsmethoden steigt dabei zunächst der Entwicklungsaufwand für den jeweiligen Prototyp im Vergleich zur intuitiven Entwicklung eines Prototyps basierend auf dem vorliegenden Entwicklungsstand des Produkts in Entwicklung. Dieser erhöhte Aufwand wird jedoch durch die Einsparungen an Aufwänden in späteren Phasen des Prototypenlebenslaufs und des Prototypenentwicklungsprozesses sowie des Produktentwicklungsprozesses aufgewogen. So werden die benötigten Ressourcen pro Prototyp reduziert, da der Umfang der Prototypen reduziert wird. Durch die Fokussierung auf einzelne Fragestellungen und die konsequente Entwicklung eines Prototyps hinsichtlich dieser Fragestellung, wird zudem das Risiko gesenkt, dass die Ergebnisse der prototypischen Untersuchung nicht auf das Produkt in Entwicklung übertragbar sind oder keine neuen Erkenntnisse liefern, wodurch wiederholte Aufwände vermieden werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden an dieser Stelle kritisch hinterfragt und diskutiert. So liegt zunächst für die Ermittlung der Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen eine sehr geringe Basis an veröffentlichter Literatur vor, in der die vorgestellten Prototypen und die bei der Entwicklung dieser Prototypen eingeflossenen Entscheidungsgrundlagen detailliert beschrieben werden. Dadurch können zwar generelle Unterschiede zwischen dem jeweiligen Produkt und dessen Prototypen ermittelt werden, jedoch bleiben diese Unterschiede sehr oberflächlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen daher auch lediglich in Grundzügen beschrieben, wobei die Fokussierung auf den Lernprozess bei Prototypen im Vergleich zu Produkten als Hauptunterschied zunächst trivial erscheint, jedoch in dieser Form erst im Rahmen dieser Arbeit wissenschaftlich aufgearbeitet wurde.

Ein weiterer Punkt zur Diskussion besteht im sehr fokussierten Kontext, beziehungsweise Anwendungsbereich der vorgestellten Modelle und Methoden. Dieser ist zunächst auf das Gebiet der sensorintegrierenden Maschinenelemente begrenzt und die zur Verifikation der Modelle und Methoden herangezogenen Beispiele begrenzen sich auf eben diesen Anwendungsbereich. Da es sich bei den Beispielen in Kapitel 8 um sehr ähnliche Produkte handelt, führt auch die Anwendung der vorgestellten Methode zu einem sehr ähnlichen Ergebnis, das die Trennung der mechanischen und elektrischen Signalleitung und deren Untersuchung mittels separater Prototypen vorsieht.

Bezüglich des in Kapitel 7 vorgestellten House of Configurations muss kritisch hinterfragt werden, inwieweit die Erfahrung der Anwender einen Einfluss auf das Ergebnis und damit die Prototypenentwicklung hat. Auch bleibt der Nachweis offen, inwieweit Produktentwickelnde von dieser Methode profitieren. Die Beispiele in Kapitel 8 zeigen zwar, dass durch die Anwendung der Methode Prototypen entwickelt werden können, jedoch zeigt dies noch nicht die Validität der Methode. Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen jedoch die Grundlage für Probandenstudien dar, wodurch beispielsweise im Rahmen von Crossover-Studien und Feldversuchen die Validität der Methode nachgewiesen werden kann. Weiterführend können im Rahmen derartiger Studien die Vorteile, die durch den Einsatz der

vorgestellten Methoden im Vergleich zu konventionell entwickelten Prototypen entstehen, untersucht werden, um den Beweis zu erbringen, dass die methodisch entwickelten Prototypen in der Tat eine erhöhte Effektivität und Effizienz gegenüber deren konventionell entwickelter Gegenstücke aufweisen. Abschließend kann durch Studien aufgezeigt werden, inwieweit eine Akzeptanz der Methode unter Produktentwickelnden erreicht werden kann.

Neben der Beantwortung der gestellten Forschungsfragen leistet diese Arbeit zusätzlich einen Beitrag zur wissenschaftlichen Betrachtung von Prototypen im Sinne der Fokussierung auf die Entwicklung dieser Prototypen. Bisherige Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit Prototypen beschreiben zumeist, welche Ziele beim Einsatz von Prototypen im Vordergrund stehen sollten, welchen Einfluss bestimmte Ausprägungen, zum Beispiel verwendete Materialien und Prototypingverfahren des Prototyps auf das Ergebnis der Prototypingaktivität haben und wie die Entscheidung zwischen der Verwendung von physischen und virtuellen Prototypen getroffen werden kann. Die eigentliche Entwicklung der eingesetzten Prototypen wird dabei jedoch meist nicht näher beleuchtet. An dieser Stelle bietet diese Arbeit daher einen essentiellen Ansatzpunkt, um die Forschung hinsichtlich der Entwicklung von Prototypen stärker in den Fokus zu rücken und um Produktentwickelnden Methoden und Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, durch die Prototypingaktivitäten zielgerichteter und aufwandsärmer durchgeführt werden können, wodurch die Effizienz und Effektivität des Prototypings erhöht wird.

## 10 Ausblick und weitere Forschungsthemen

Die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Forschungsergebnisse bieten einige Ansätze für weiterführende Forschungsaktivitäten. Insbesondere die in Abschnitt 7.3 beschriebene Möglichkeit der Auswertung des Grads der Verteilung im House of Configurations, bietet die Möglichkeit der näheren Untersuchung und dem Aufzeigen der dadurch erzielbaren Vorteile in der Entwicklung von Prototypen. Weiterführend erscheint es sinnvoll, die in Kapitel 8 vorgestellten Beispiele zur Veranschaulichung der Anwendung der in Kapitel 7 beschriebenen Methoden zum Setzen der Entwicklungsschwerpunkte und der Ermittlung der Anforderungen an Prototypen weiter zu untersuchen und auf Basis der erstellten CAD-Modelle physische Prototypen herzustellen und diese zu testen. Parallel dazu sollten zu den vorgestellten Produkten Prototypen ohne den Einsatz der in dieser Arbeit vorgestellten Methoden entwickelt und getestet werden, beispielsweise im Rahmen eines studentischen Projekts. Die Ergebnisse der Untersuchungen der mit und ohne Methodeneinsatz entwickelten Prototypen können daraufhin verglichen werden und die Aussagekraft der jeweiligen prototypischen Untersuchungen und der Erkenntnisgewinn beurteilt werden. Anschließend kann der jeweilige Erkenntnisgewinn mit dem Aufwand zur Entwicklung inklusive der für die Herstellung der verschiedenen Prototypen aufgewendeten Ressourcen ins Verhältnis gesetzt werden, um die Effizienz der Prototypenentwicklung mit und ohne Methodeneinsatz zu vergleichen. Werden die in Kapitel 8 vorgestellten Produkte in Entwicklung zum finalen Produkt weiterentwickelt, ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit, das Verhalten der Prototypen mit dem Verhalten des finalen Produkts zu vergleichen. Dadurch kann eine Aussage über die Validität der entwickelten Prototypen getroffen werden. Als valide können die Prototypen dann angesehen werden, wenn das Verhalten der Prototypen dem finalen Produkt in den untersuchten Aspekten entspricht und daher anhand der Prototypen ein Erkenntnisgewinn hinsichtlich des Produkts in Entwicklung erzielt wurde.

Weiterhin erscheint es sinnvoll, die in Kapitel 6 dieser Arbeit vorgestellte dreischrittige Herangehensweise mit Fokus auf die in Kapitel 7 beschriebene Methode zur Identifikation der Entwicklungsschwerpunkte der Prototypenentwicklung im industriellen Umfeld zu erproben und zu evaluieren. Im Rahmen dieser Evaluation ist die Frage zu klären, inwieweit die Erfahrung der beteiligten Entwickler das Ergebnis der Anwendung der Methode und das Ergebnis dieser Anwendung beeinflusst, beziehungsweise unter welchen Voraussetzungen eine optimale Unterstützung durch die Methoden gegeben ist. Als erste Hypothese wird erwartet, dass die Methode besonders bei weniger erfahrenen Produkt- und Prototypenentwicklern einen positiven Einfluss auf das Ergebnis der Prototypenentwicklung hat hinsichtlich der Effektivität und besonders der Effizienz der entwickelten Prototypen.

Neben der Evaluation der vorgestellten Methode im industriellen Umfeld stellt sich auch die Frage, inwieweit das in Abschnitt 5.3 Akzeptanz unter industriellen Produktentwicklern finden kann. Eine Evaluation dieses Modells im industriellen Umfeld erscheint daher ebenfalls sinnvoll.

Es ist zu erwarten, dass sich aufbauend auf dem Ergebnis der Evaluationen Optimierungspotenziale an der dreischrittigen Herangehensweise in Kapitel 6, der Signalflussanalyse in Abschnitt 7.2, des House of Configurations in Abschnitt 7.3 sowie des detaillierten Prozessmodells des Prototypings in Abschnitt 5.3 ergeben. Die Anpassung dieser Methoden und des Modells stellt damit einen weiteren Forschungsschwerpunkt für weiterführende Arbeiten dar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits aufgezeigt, dass anhand der Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen die Möglichkeit besteht, Produktentwicklungsmethoden und -modelle derart anzupassen, dass diese sich als Prototypenentwicklungsmethoden und -modelle weiterverwenden lassen können. Die Analyse der Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht vollumfänglich durchgeführt werden, woraus sich weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich dieser Unterschiede ergibt. Zur Ermittlung dieser Unterschiede können weiterführende, umfangreichere Literaturrecherchen durchgeführt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass wie bereits im Rahmen dieser Arbeit beschrieben, im größten Teil der Veröffentlichungen lediglich das Produkt in Entwicklung detailliert beschrieben wird, gefolgt vom Ergebnis der Untersuchungen mittels Prototyp. Dabei wird die Entwicklung der Prototypen, inklusive der Unterschiede zwischen diesen Prototypen und den jeweiligen Produkten in Entwicklung jedoch kaum näher beleuchtet. Auch das Lernergebnis aus den prototypischen Versuchen wird meist nur unzureichend erläutert. Die Veröffentlichung gescheiterter Prototypenversuche wird im Allgemeinen nicht durchgeführt. An dieser Stelle erscheint es daher ziel führend, direkt im industriellen Umfeld, beispielsweise in Zusammenarbeit mit Unternehmen über einen längeren Zeitraum Einblicke in die Vorgehensweisen und Ansätze der Prototypenentwicklung zu erhalten, sodass auch negative Entwicklungsergebnisse, die nicht proaktiv veröffentlicht werden, zu dokumentieren.

Aufbauend auf der detaillierten Erarbeitung der Unterschiede zwischen Produkten und Prototypen können anschließend weitere Produktentwicklungsmethoden und -modelle identifiziert werden, die hinsichtlich der Verwendung zur Entwicklung von Prototypen angepasst werden können. Weiterführend kann untersucht werden, ob und wie sich die Forschungsbereiche Produktentwicklung und Prototypenentwicklung stärker miteinander vereinen lassen, sodass Forschungsergebnisse aus einem der Bereiche auch im jeweils anderen Forschungsbereich genutzt werden können.

## Anhang A

Tabelle 7: Kritikalitätsbewertung der Konfigurationen der sensorintegrierenden Federstegkupplung

Konfiguration	Neuheit		Technische Schwierigkeit		Relevanz		Gesamt
	Wertung	Begründung	Wertung	Begründung	Wertung	Begründung	
<i>Übertragen des Drehmoments zwischen den verbundenen Wellen</i>	<b>1</b>	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	<b>1</b>	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	<b>4</b>	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	<b>4</b>
<i>Ausgleichen des Wellenversatzes</i>	<b>1</b>	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	<b>1</b>	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	<b>4</b>	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	<b>4</b>
<i>Wandeln des Wellenversatzes in elektrisches Signal</i>	<b>10</b>	Diese Konfiguration ist grundlegend neu und in dieser Form in keinem vergleichbaren Produkt zu finden	<b>10</b>	Zur Nutzung des Wellenversatzes als Eingangssignal muss dieses eine hohe Qualität aufweisen	<b>10</b>	Diese Konfiguration stellt das Alleinstellungsmerkmal des Konzepts dar	<b>1000</b>
<i>Übertragen des elektrischen Signals an Auswerteeinheit</i>	<b>4</b>	Telemetrische Übertragungen existieren in vergleichbaren Produkten, Erfahrung ist jedoch gering	<b>4</b>	Kontaktierung unter Umständen schwierig umzusetzen und Einflüsse der Drehzahl sind zu vermeiden	<b>4</b>	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Begeisterungsmerkmal	<b>64</b>

**Tabelle 8: Kritikalitätsbewertung der Konfigurationen der sensorintegrierenden drehmomentmessenden Welle-Nabe-Verbindung**

Konfiguration	Neuheit		Technische Schwierigkeit		Relevanz		Gesamt
	Wertung	Begründung	Wertung	Begründung	Wertung	Begründung	
<i>Übertragen des Drehmoments von Zahnrad auf Welle</i>	1	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	4	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	4	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	16
<i>Umformen des Drehmoments in Axial-, Radial- und Tangentialkraft</i>	1	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	1	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	4	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	4
<i>Leiten der Axialkraft zur Sensorschraube</i>	4	Die Leitung an sich ist bereits bekannt jedoch die Nutzung als Eingangssignal des Sensors ist neu	10	Anforderungen an Einhaltung der Toleranzen und Oberflächenqualitäten um Signal nicht zu stören	10	Ausfall der Konfiguration führt zum Verlust des Alleinstellungsmerkmals	400
<i>Wandeln der Axialkraft in elektrisches Signal</i>	4	Die Sensorschraube existiert bereits als Produkt, jedoch ist die Art, in der dieses eingesetzt wird neu	4	Sensorschraube als Zukaufteil erfüllt Anforderungen, Anforderungen an Montage jedoch hoch	10	Die Konfiguration ist ein Alleinstellungsmerkmal, das zum Erfolg des Produkts essentiell beiträgt	160
<i>Übertragen des elektrischen Signals</i>	4	Die Übertragung mittels rotierendem Kontakt ist für die Entwicklung vollkommen neu	10	Rotierender Kontakt vergleichsweise unbekannt. Einfluss verschiedener Medien erscheint hoch.	10	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Begeisterungsmerkmal	160

Tabelle 9: Kritikalitätsbewertung der Konfigurationen der sensorintegrierenden elastischen Klauenkupplung

Konfiguration	Neuheit		Technische Schwierigkeit		Relevanz		Gesamt
	Wertung	Begründung	Wertung	Begründung	Wertung	Begründung	
<i>Übertragen des Drehmoments zwischen den verbundenen Wellen</i>	1	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	1	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	4	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	4
<i>Ausgleichen des Wellenversatzes</i>	1	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	1	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	4	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	4
<i>Wandeln der Verdrehung der Wellenenden in elektrisches Signal</i>	4	Das Messprinzip der DMS ist bereits bekannt. Neu ist die Nutzung des mechanischen Signals.	4	Applikation des DMS ist herausfordernd. Schwankungen der Elastomeigenschaften in engen Grenzen	10	Die Konfiguration ist ein Alleinstellungsmerkmal, das zum Erfolg des Produkts essentiell beiträgt	160
<i>Übertragen des elektrischen Signals an Auswertereinheit</i>	4	Telemetrische Übertragungen existieren in vergleichbaren Produkten, Erfahrung ist jedoch gering	4	Kontaktierung unter Umständen schwierig umzusetzen und Einflüsse der Drehzahl sind zu vermeiden	4	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Begeisterungsmerkmal	64
<i>Dämpfung der Drehschwingungen</i>	1	Die Konfiguration existiert in dieser Form bereits im konventionellen Maschinenelement und ist daher bekannt	1	Einfache Umsetzung der Konfiguration basierend auf dem konventionellen Maschinenelement erwiesen	4	Die Konfiguration ist relevant, jedoch kein Alleinstellungsmerkmal	4

## Literaturverzeichnis

- Abramovici, M.; Herzog, O. (Hrsg.) (2016):** Engineering im Umfeld von Industrie 4.0. Einschätzungen und Handlungsbedarf (acatech STUDIE). München: Herbert Utz Verlag.
- Albers, A.; Lohmeyer, Q.; Ebel, B. (2011):** Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects. In: S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAlone, T. J. Howard und Y. Reich (Hg.): DS 68-2: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11). Impacting Society through Engineering Design. Great Britain: Design Society, S. 256–265, zuletzt geprüft am 09.12.2019.
- Albers, A.; Arslan, M.; Rapp, S.; Bursac, N.; Haug, F.; Heitger, N. (2016a):** Produktgenerationsentwicklung - Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen Produktentwicklung.
- Albers, A.; Behrendt, M.; Klingeler, S.; Matros, K. (2016b):** Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: U. Lindemann (Hg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, S. 541–569.
- Albers, A.; Behrendt, M.; Schröter, J.; Ott, S.; Klingeler, S. (2013):** X-in-the-loop: A framework for supporting central engineering activities and contracting complexity in product engineering processes. In: U. Lindemann, S. Venkataraman, YS. Kim, SW. Lee, M. Cantamessa und B. Yannou (Hg.): Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design. Castle Cary, Somerset: Design Society (The Design Society, 75).
- Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S. (2017):** PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: *Forsch Ingenieurwes* 81 (1), S. 13–31. DOI: 10.1007/s10010-016-0210-0.
- Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E. (2015):** Product Generation Development - Importance and Challenges from a Design Research Perspective. In: N. E. Mastorakis und C. W. Solomon To (Hg.): New developments in mechanics, S. 16–21.
- Albers, A.; Düser, T. (2010):** Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In: International Federation of Automobile Engineers' and Technicians' Associations (Hg.): FISITA 2010 World Automotive Congress. International Federation of Automobile Engineers' and Technicians' Associations. Budapest, Hungary: FISITA, S. 173–182.
- Albers, A.; Düser, T.; Ott, S. (2008):** X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen. In: 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 16./17. September 2008, Kassel, Germany: Kassel.
- Albers, A.; Haug, F.; Fahl, J.; Hirschter, T.; Reinemann, J.; Rapp, S. (2018):** Customer-Oriented Product Development: Supporting the Development of the Complete Vehicle through the Systematic Use of Engineering Generations. In: 4th IEEE International Symposium on Systems Engineering. 2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). Rome: IEEE, S. 1–8.
- Albers, A.; Klingler, S.; Wagner, D. (2014):** Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In: D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković und N. Bojčetić (Hg.): Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference. Zagreb: The Design Society, S. 81–90.

- Albers, A.; Wintergerst, E. (2014):** The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In: A. Chakrabarti und L. T. M. Blessing (Hg.): An Anthology of Theories and Models of Design, Bd. 23. London: Springer London, S. 151–171.
- Al-Ghassani, A. M.; Kamara, J. M.; Anumba, C. J.; Carrillo, P. M. (2006):** Prototype System for Knowledge Problem Definition. In: *J. Constr. Eng. Manage.* 132 (5), S. 516–524. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:5(516).
- Aven, T. (2012):** The risk concept—historical and recent development trends. In: *Reliability Engineering & System Safety* 99, S. 33–44. DOI: 10.1016/j.res.2011.11.006.
- Baskerville, R.-L.; Stage, J. (1996):** Controlling Prototype Development Through Risk Analysis. In: *MIS Quarterly* 20 (4), S. 481. DOI: 10.2307/249565.
- Binz, H. (2016):** Einleitung. In: H. Binz (Hg.): Hybride Intelligente Konstruktionselemente (HIKE) - Abschlusskolloquium der DFG-Forschergruppe 981. Stuttgart: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (Bericht des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Nr. 643), S. 38–51.
- Binz, H.; Bartholdt, M. (2014):** Universitäre Lehre in der Produktentwicklung -Leitfaden der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP). In: *Konstruktion* (66).
- Birkhofer, H.; Dannheim, F.; Grüner, C. (1998):** Umwelt- und marktgerechte Produkte - Utopie oder ernsthaftes Entwicklungsziel? In: *VDI Berichte* 1400, S. 1–18.
- Blessing, L.T.M.; Chakrabarti, A. (2009):** DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London.
- Blomkvist, J.; Holmlid, S. (2011):** Existing Prototyping Perspectives: Considerations for Service Design. In: I. Koskinen, T. Härkäsalmi, R. Mazé, B. Matthews und J. J. Lee (Hg.): Proceedings of the Nordes'11: The 4TH Nordic Design Research Conference : MAKING DESIGN MATTER!: School of Art and Design, Aalto University, Helsinki, Finland.
- Böhmer, A. I.; Sheppard, S.; Kayser, L.; Lindemann, U. (2017):** Prototyping as a Thinking Approach in Design. Insights of Problem-Solving Activities while Designing a Product. In: R. Jardim-Gonçalves (Hg.): 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC 2017). Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 955–963.
- Bordegoni, M.; Cugini, U.; Caruso, G.; Polistina, S. (2009):** Mixed prototyping for product assessment: a reference framework. In: *Int J Interact Des Manuf* 3 (3), S. 177–187. DOI: 10.1007/s12008-009-0073-9.
- Breglio, G.; Irace, A.; Pugliese, L.; Riccio, M.; Russo, M.; Strano, S.; Terzo, M. (2019):** Development and Testing of a Low-Cost Wireless Monitoring System for an Intelligent Tire. In: *Machines* 7 (3), S. 49–58. DOI: 10.3390/machines7030049.
- Bridgman, P. W. (1963):** Dimensional analysis. New Haven: Yale University Press.
- Bruder, E. (2011):** Thermische Stabilität von Stählen mit ultrafeinkörnigen Gradientengefügen und deren mechanische Eigenschaften. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

- Buchenau, M.; Suri, J. F. (2000):** Experience Prototyping. In: W. A. Kellogg und D. Boyarski (Hg.): DIS2000. Designing Interactive Systems, Processes, Practices, Methods and Techniques 17-19. SIGCHI (Group : U.S.). New York: Association for Computing Machinery, S. 424–433.
- Buchholz, C.; Kind, S.; Blume, C.; Enin, A.; Stark, R. (2018):** Hybrid Prototype-in-the-Loop. In: *ZWF* 113 (4), S. 240–245. DOI: 10.3139/104.111879.
- Camburn, B.; Dunlap, B.; Gurjar, T.; Hamon, C.; Green, M.; Jensen, D. et al. (2015a):** A Systematic Method for Design Prototyping. In: *J. Mech. Des* 137 (8), S. 1–13. DOI: 10.1115/1.4030331.
- Camburn, B.; Dunlap, B.; Kuhr, R.; Viswanathan, V.; Linsey, J.; Jensen, D. et al. (2013a):** Methods for Prototyping Strategies in Conceptual Phases of Design. Framework and Experimental Assessment. In: American Society of Mechanical Engineers (Hg.): Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference: American Society of Mechanical Engineers, U.S., V005T06A033.
- Camburn, B.; Dunlap, B.; Viswanathan, V.; Linsey, J.; Jensen, D.; Crawford, D. (2013b):** Connecting Design Problem Characteristics to Prototyping Choices to Form a Prototyping Strategy. ASEE Annual Conference, Atlanta, zuletzt geprüft am 19.03.2019.
- Camburn, B.; Viswanathan, V.; Linsey, J.; Anderson, D.; Jensen, D.; Crawford, R. et al. (2017a):** Design prototyping methods. State of the art in strategies, techniques, and guidelines. In: *Des. Sci.* 3, S. 1–33. DOI: 10.1017/dsj.2017.10.
- Camburn, B. A.; Arlitt, R.; Perez, K. B.; Anderson, D.; Choo, P. K.; Lim, T. et al. (2017b):** Design Prototyping of Systems. In: A. Maier, S. Škec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel et al. (Hg.): Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design. Design Information and Knowledge. Glasgow: The Design Society.
- Camburn, B. A.; Sng, K. H.; Perez, K. B.; Otto, K.; Wood, K. L.; Jensen, D.; Crawford, R. (2015b):** The Way Makers Prototype: Principles of DIY Design. In: American Society of Mechanical Engineers (Hg.): ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. August 2-5, 2015, Boston, Massachusetts, USA. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers.
- Camere, S.; Bordegoni, M. (2016):** A Lens on Future Products: An Expanded Notion of Prototyping Practice. In: D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić und S. Škec (Hg.): Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference, S. 155–164.
- Christie, E. J.; Jensen, D. D.; Buckley, R. T.; Menefee, D. A.; Wood, K. L.; Crawford, R. (2012):** Prototyping Strategies: Literature Review and Identification of Critical Variables. In: American Society for Engineering Education (Hg.): 2012 ASEE Annual Conference & Exposition.
- Cooper, R. G. (1983):** A process model for industrial new product development. In: *IEEE Trans. Eng. Manage.* EM-30 (1), S. 2–11. DOI: 10.1109/TEM.1983.6448637.
- Cooper, R. G. (2008):** Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch. 3. ed, repr. New York: Basic Books.

- Crostack, A. (2018):** Grundlagen einer Konstruktionsmethodik für Hybride Intelligente Konstruktionselemente (HIKE). Stuttgart: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart (Bericht / IKTD, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Nr. 669).
- Deininger, M.; Daly, S.; Sienko, K.; Lee, J.; Obed, S.; Effah Kaufmann, E. (2017):** Does Prototype Format Influence Stakeholder Design Input? In: A. Maier, S. Škec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel et al. (Hg.): Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design. Design Information and Knowledge. Glasgow: The Design Society, S. 553–562.
- Denkena, B.; Morke, T. (2017):** Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence - Keys to Industry 4.0. Saint Louis: Elsevier Science.
- Denkena, B.; Mörke, T.; Krüger, M.; Schmidt, J.; Boujnah, H.; Meyer, J. et al. (2014):** Development and first applications of gentelligent components over their lifecycle. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7 (2), S. 139–150. DOI: 10.1016/j.cirpj.2013.12.006.
- DIN ISO 2768-1, 1991-06-00:** Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung.
- DIN 69901-5, 2009-01-00:** Project management - Project management systems - Part 5: Concepts.
- DIN ISO 10007, 2019:** Qualitätsmanagement – Leitfaden für Konfigurationsmanagement (ISO 10007:2017).
- DIN EN 60812, 03.07.2015:** Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).
- Dow, S.; Glassco, A.; Kass, J.; Schwarz, M.; Schwartz, D. L.; Klemmer, S. R. (2010):** Parallel prototyping leads to better design results, more divergence, and increased self-efficacy. In: *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 17 (4), S. 1–24. DOI: 10.1145/1879831.1879836.
- Drezner, J.; Huang, M. (2009):** On Prototyping: Lessons from RAND Research. Hg. v. RAND Corporation. RAND Corporation, zuletzt geprüft am 11.04.2019.
- Dunlap, B. U.; Hamon, C. L.; Camburn, B. A.; Crawford, R. H.; Jensen, D. D.; Green, M. G. et al. (2014):** Heuristics-Based Prototyping Strategy Formation: Development and Testing of a New Prototyping Planning Tool. In: ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2017a):** Technische Systeme und ihre Eigenschaften. In: Klaus Ehrlenspiel und Harald Meerkamm (Hg.): Integrierte Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 20–60.
- Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald (Hg.) (2017b):** Integrierte Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Elsen, C.; Häggman, A.; Tomonori, H.; Yang, M. C. (2012):** Representation in early stage design: an analysis of the influence of sketching and prototyping in design projects. In: *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*.
- Elverum, C. W.; Welo, T.; Tronvoll, S. (2016):** Prototyping in New Product Development. Strategy Considerations. In: *Procedia CIRP* 50, S. 117–122. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.010.

- Elverum, Christer W.; Welo, Torgeir (2014):** The Role of Early Prototypes in Concept Development. Insights from the Automotive Industry. In: *Procedia CIRP* 21, S. 491–496. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.127.
- Ely, D.; Mendelson, H. (1998):** Optimal parallel and sequential prototyping in product design. Hg. v. Stanford University Graduate School of Business. Stanford, CA.
- Garcia-Pozuelo, D.; Olatunbosun, O.; Strano, S.; Terzo, M. (2019):** A real-time physical model for strain-based intelligent tires. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 288, S. 1–9. DOI: 10.1016/j.sna.2018.12.010.
- Gerber, E.; Carroll, M. (2012):** The psychological experience of prototyping. In: *Design Studies* 33 (1), S. 64–84. DOI: 10.1016/j.destud.2011.06.005.
- Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. (2010):** Additive Manufacturing Technologies. Boston, MA: Springer US.
- Gordon, V. S.; Bieman, J. M. (1988):** Rapid prototyping: lessons learned. In: *IEEE Software*, Bd. 12 (1, 12), S. 85–95.
- Gramlich, Sebastian (2013):** Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln. Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, 423).
- Groche, P.; Birkhofer, H.; Bauer, O.; Göllner, T.; Gramlich, S.; Kaune, V. et al. (2012):** Potenziale einer durchgängigen Produktentstehung - Nutzung technologieinduzierter Eigenschaften zur Entwicklung von Blechstrukturen. In: *Konstruktion* (11-12), S. 85–90.
- Groche, P.; Brenneis, M. (2014):** Manufacturing and use of novel sensoric fasteners for monitoring forming processes. In: *Measurement* 53, S. 136–144. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.03.042.
- Groche, P.; Vucic, D.; Jöckel, M. (2007):** Basics of linear flow splitting. In: *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2-3), S. 249–255. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.023.
- Grüner, C. (2001):** Die strategiebasierte Entwicklung umweltgerechter Produkte. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte // VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, 349), zuletzt geprüft am 28.11.2019.
- Hamon, C.; Green, M.; Dunlap, B.; Camburn, B.; Crawford, R.; Jensen, D. (Hg.) (2014):** Virtual or physical prototypes? Development and testing of a prototyping planning tool.
- Heidemann, Bernd (2001):** Trennende Verknüpfung. Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen. Düsseldorf: VDI (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, 351).
- Hess, T.; Summers, J. D. (2013):** Case Study: Evidence of Prototyping Roles in Conceptual Design. In: U. Lindemann (Hg.): Design for harmonies. ICED 13, the 19th International Conference on Engineering Design. Design Society. Castle Cary, Somerset: Design Society (The Design Society, 75), S. 249–258.
- Hilton, E.; Linsey, J.; Goodman, J. (2015):** Understanding the prototyping strategies of experienced designers. In: *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. Camino Real El Paso, El Paso, TX, USA: IEEE, S. 1–8.

- Hohlfeld, B. (2014):** Automotive Software Engineering. Automobilherstellung. Technische Universität Dresden. Technische Universität Dresden, 2014. Online verfügbar unter [http://www.es.tu-darmstadt.de/fileadmin/download/lehre/ase/2014/03\\_Die\\_Automobilherstellung.key.pdf](http://www.es.tu-darmstadt.de/fileadmin/download/lehre/ase/2014/03_Die_Automobilherstellung.key.pdf), zuletzt geprüft am 2018.
- Horváth, I.; Du Bois, E. (2012):** Using Modular Abstract Prototypes as Evolving Research Means in Design Inclusive Research. In: ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Chicago, Illinois, USA: American Society of Mechanical Engineers, S. 475–486.
- Hostettler, R.; Böhmer, A. I.; Lindemann, U.; Knoll, A. (2017):** TAF Agile Framework. Reducing Uncertainty within Minimum Time and Resources. In: R. Jardim-Gonçalves (Hg.): 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC 2017). Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 767–775.
- Houde, S.; Hill, C. (1997):** What do Prototypes Prototype? In: M. Helander und T. K. Landauer (Hg.): Handbook of human-computer interaction. 2nd, completely rev. ed. Amsterdam: Elsevier, S. 367–381, zuletzt geprüft am 21.11.2019.
- Hubka, V. (1984):** Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Janocha, H. (2007):** Adaptronics and smart structures. Basics, materials, design, and applications. 2., rev. ed. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Jensen, M. B.; Balters, S.; Steinert, M. (2015):** Measuring Prototypes - A Standardized Quantitative Description of Prototypes and their Outcome for Data Collection and Analysis. In: C. Weber, S. Husung, M. Cantamessa, G. Cascini, D. Marjanovic und S. Venkataraman (Hg.): Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15): Design Theory and Research Methodology Design Processes: Design Society (80).
- Jensen, M. B.; Elverum, C. W.; Steinert, M. (2017):** Eliciting unknown unknowns with prototypes: Introducing prototrials and prototrial-driven cultures. In: *Design Studies* 49, S. 1–31. DOI: 10.1016/j.destud.2016.12.002.
- Kampker, A.; Förstmann, R.; Ordnung, M.; Haunreiter, A. (2016):** Prototypen im agilen Entwicklungsmanagement. In: *ATZ Automobiltech Z* 118 (7-8), S. 72–77. DOI: 10.1007/s35148-016-0065-6.
- Kampker, A.; Helmes, H. H.; Kreisköther, K.; Büning, M. K.; Haunreiter, A. (2018):** Nutzung von Prototypen im elektrischen Antriebsstrang. In: *emobilitytec* (1), S. 28–31. Online verfügbar unter [https://www.emobilitytec.de/wp-content/uploads/sites/12/2018/03/EMT\\_2018\\_01\\_Internet.pdf](https://www.emobilitytec.de/wp-content/uploads/sites/12/2018/03/EMT_2018_01_Internet.pdf).
- Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji, S. (1984):** Attractive Quality and Must-be Quality. In: Journal of the Japanese Society for Quality Control. In: *Journal of the Japanese Society for Quality Control* 14 (2), S. 147–156.
- Kirchner, E. (Hg.) (2020):** Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung. Von der Idee zum erfolgreichen Produkt. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

- Kirchner, E.; Schork, S. (2017):** Antriebsstrang mit integrierter Drehmomenterfassung. Angemeldet durch Technische Universität Darmstadt am 08.09.2017. Veröffentlichungsnr: DE 10 2017 120 796 A1.
- Kriesi, C.; Blindheim, J.; Bjelland, Ø.; Steinert, M. (2016):** Creating Dynamic Requirements through Iteratively Prototyping Critical Functionalities. In: *Procedia CIRP* 50, S. 790–795. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.122.
- Kukko-Liedes, V.; Mikkonen, M. V.; Björklund, Tv (2019):** Experimentation Throughout the Product Development Process - Lessons from Food and Beverage Ventures. In: *Proc. Int. Conf. Eng. Des.* 1 (1), S. 1145–1154. DOI: 10.1017/dsi.2019.120.
- Kurvinen, E.; Koskinen, I.; Battarbee, K. (2008):** Prototyping Social Interaction. In: *Design Issues* 24 (3), S. 46–57. DOI: 10.1162/desi.2008.24.3.46.
- Lederer, P. J.; Karmarkar, U. S. (Hg.) (1997):** The practice of quality management. Boston: Kluwer. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0819/96052832-d.html>.
- Leifer, L.; Steinert, M. (2011):** Dancing with ambiguity: Causality behavior, design thinking, and triple-loop-learning. In: *Information Knowledge Systems Management* 10 (1-4), S. 141–158. DOI: 10.3233/IKS-2012-0191.
- Lemons, G.; Carberry, A.; Swan, C.; Jarvin, L.; Rogers, C. (2010):** The benefits of model building in teaching engineering design. In: *Design Studies* (31), S. 288–309.
- Lenarduzzi, V.; Taibi, D. (2016):** MVP Explained: A Systematic Mapping Study on the Definitions of Minimal Viable Product. In: *Software Engineering and Advanced Applications (SEAA), Euromicro Conference*, S. 112–119.
- Lim, Y.-K.; Stolterman, E.; Tenenberg, J. (2008):** The Anatomy of Prototypes: Prototypes as Filters, Prototypes as Manifestations of Design Ideas. In: *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 15 (2), S. 1–27. DOI: 10.1145/1375761.1375762.
- Lindemann, U. (2009):** Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Lüders, K.; Oppen, G. von; Bergmann, L.; Schaefer, C. (2012):** Klassische Physik - Mechanik und Wärme. Neu konzipiert und aktualisiert. Berlin: de Gruyter (De Gruyter Studium, / Klaus Lüders; Gebhard von Oppen ; Bd. 1).
- Martin, G.; Schork, S.; Vogel, S.; Kirchner, E. (2018a):** MME – Potentiale durch mechatronische Maschinenelemente. In: *Konstruktion* (01-02/2018), S. 71–75.
- Martin, G.; Vogel, S.; Schirra, T.; Vorwerk-Handing, G.; Kirchner, E. (2018b):** Methodical Evaluation of Sensor Positions for Condition Monitoring of Gears. In: P. Ekströmer, S. Schütte und J. Ölvander (Hg.): *Proceedings of NordDesign 2018 (NordDESIGN)*.
- Martínez-Román, J. A.; Romero, I. (2013):** About the determinants of the degree of novelty in small businesses' product innovations. In: *Int Entrep Manag J* 9 (4), S. 655–677. DOI: 10.1007/s11365-013-0269-0.

- Matthiesen, S. (2002):** Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH) (Forschungsberichte Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, 6).
- Matthiesen, S.; Gwosch, T.; Schäfer, T.; Dültgen, P.; Pelshenke, C.; Gittel, H.-J. (2016):** Experimentelle Ermittlung von Bauteilbelastungen eines Power Tool Antriebsstrangs durch indirektes Messen in realitätsnahen Anwendungen als ein Baustein in der Teilsystemvalidierung. In: *Forsch Ingenieurwes* 80 (1-2), S. 17–27. DOI: 10.1007/s10010-016-0203-z.
- Menold, J. (2017):** Prototype for X (PFX): A Prototyping Framework to Support Product Design: Pennsylvania State University.
- Menold, J.; Jablokow, K.; Simpson, T. (2017):** Prototype for X (PFX). A holistic framework for structuring prototyping methods to support engineering design. In: *Design Studies* 50, S. 70–112. DOI: 10.1016/j.destud.2017.03.001.
- Menold, J.; Jablokow, K.; Simpson, T. (2018):** The Prototype for X Framework. Assessing Impact on Self-Reported Prototyping Behavior of Student Designers. In: *J. Mech. Des.* DOI: 10.1115/1.4041781.
- Menold, J.; Jablokow, K.; Simpson, T. W.; Waterman, E. A. (2016):** The Prototype for X (PFX) framework: Assessing its impact on students' prototyping awareness. In: *ASME Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*.
- Menold, J.; Simpson, T. W.; Jablokow, K. (2019):** The prototype for X framework. Exploring the effects of a structured prototyping framework on functional prototypes. In: *Research in Engineering Design* 30 (2), S. 187–201. DOI: 10.1007/s00163-018-0289-4.
- Michaelraj, A. (2012):** Taxonomy of physical prototypes. Structure and validation: Proquest, Umi Dissertatio.
- Mitchell, W. J. (2004):** Beyond the ivory tower. Constructing complexity in the digital age. In: *Science (New York, N.Y.)* 303 (5663), S. 1472–1473. DOI: 10.1126/science.1091973.
- Mobley, R. K. (2002):** An introduction to predictive maintenance. 2. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- Moe, R. E.; Jensen, D.; Wood, K. (2004):** Prototype Partitioning Based on Requirement Flexibility. In: American Society of Mechanical Engineers (Hg.): 16th International Conference on Design Theory and Methodology. New York, NY: ASME, S. 65–77.
- OECD (2005):** Oslo manual. Proposed guidelines for collecting and interpreting technological innovation data. OECD-European Communities. Paris.
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.; Wallace, K.; Blessing, L. (2007):** Engineering design. A systematic approach. 3rd ed. London: Springer.
- Paliokas, I.; Arapidis, C.; Mpimpitsos, M. (2013):** Game Based Early Programming Education: The More You Play, the More You Learn. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): Transactions on Entertainment IX, Bd. 7544. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 115–131.

- Petrakis, K.; Hird, A.; Wodehouse, A. (2019):** The Concept of Purposeful Prototyping: Towards a New Kind of Taxonomic Classification. In: *Proc. Int. Conf. Eng. Des.* 1 (1), S. 1643–1652. DOI: 10.1017/dsi.2019.170.
- Ponn, J.; Lindemann, U. (2008):** Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Reed Doke, E. (1990):** An industry survey of emerging prototyping methodologies. In: *Information & Management* 18 (4), S. 169–176. DOI: 10.1016/0378-7206(90)90037-I.
- Reynolds, O. (1883):** XXIX. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. In: *Phil. Trans. R. Soc.* 174, S. 935–982. DOI: 10.1098/rstl.1883.0029.
- BS ISO 26262-1:2018, 20.12.2018:** Road vehicles. Functional safety.
- Rogers, D.; Church, M.; Patel, U.; Menon, C. (2013):** The Evolution of Rapid Prototyping. In: *Symposium on International Automotive Technology 2013*. DOI: 10.4271/2013-26-0082.
- Ropohl, G. (2009):** Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Ross, H.-L. (2016):** Functional safety for road vehicles. New challenges and solutions for E-mobility and automated driving. Cham, s.l.: Springer International Publishing.
- Roth, K. (2000):** Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage, erweitert und neu gestaltet. Berlin: Springer.
- Sauer, J.; Franke, H.; Ruettinger, B. (2008):** Designing interactive consumer products: utility of paper prototypes and effectiveness of enhanced control labelling. In: *Applied ergonomics* 39 (1), S. 71–85. DOI: 10.1016/j.apergo.2007.03.001.
- Sauer, T. (2006):** Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen. Zugl.: Darmstadt, Univ., Diss., 2006. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, 390).
- Schirra, T.; Martin, G.; Kirchner, E. (2019):** Feasibility Study of Impedance Analysis for Measuring Rolling Bearing Loads. USA: Society of Tribologists and Lubrication Engineers. Nashville, Tennessee.
- Schmitt, R.; Pfeifer, T. (2015):** Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser.
- Schork, S.; Gramlich, S.; Kirchner, E. (2016):** Entwicklung von Smart Machine Elements - Ansatz einer smarten Ausgleichskupplung. In: D. Krause, K. Paetzold und S. Wartzack (Hg.): Design for X. Beiträge zum 27. DfX-Symposium. Technische Universität Hamburg; TuTech Innovation GmbH; DfX-Symposium; Symposium Design for X. Hamburg: TuTech Verlag, S. 181–192.
- Schork, S.; Kirchner, E. (2018a):** Defining Requirements in Prototyping: The Holistic Prototype and Process Development. In: P. Ekströmer, S. Schütte und J. Ölvander (Hg.): Proceedings of NordDesign 2018 (NordDESIGN).

- Schork, S.; Kirchner, E. (2018b):** Method for the Development of Early Prototypes of Mechatronic Machine Elements Based on their Critical Properties. In: D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić und N. Pavković (Hg.): DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference (essentials), S. 1325–1336.
- Schork, S.; Kirchner, E. (2019):** Purpose-Oriented Modelling of the Learning Process When Using Prototypes. In: *Proc. Int. Conf. Eng. Des.* 1 (1), S. 1573–1582. DOI: 10.1017/dsi.2019.163.
- Schuh, G.; Doelle, C.; Schloesser, S. (2018):** Agile Prototyping for technical systems. Towards an adaption of the Minimum Viable Product principle. In: P. Ekströmer, S. Schütte und J. Ölvander (Hg.): Proceedings of NordDesign 2018 (NordDESIGN).
- Sefelin, Reinhard; Tscheligi, Manfred; Giller, Verena (2003):** Paper prototyping - what is it good for? In: *CHI EA '03: CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 778-119. DOI: 10.1145/765891.765986.
- Stachowiak, H. (1973):** Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
- Stücheli, M.; Meboldt, M. (2013):** Mechatronic Machine Elements: On Their Relevance in Cyber-Physical Systems. In: Michael Abramovici und Rainer Stark (Hg.): Smart product engineering. Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, Germany, March 11th - 13th, 2013, Bd. 2. Berlin: Springer (Lecture Notes in Production Engineering), S. 263–272, zuletzt geprüft am 31.10.2019.
- Sunin, M. N.; Ahmed-Kristensen, S.; Andreasen, M. M. (2010):** The Role of a Specification in the Design Process: A Case Study. In: D. Marjanović, M. Štorga und N. Bojčetić (Hg.): Proceedings of Design 2010. 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia. International Design Conference. Zagreb, S. 955–964, zuletzt geprüft am 11.12.2019.
- Sutcliffe, A.; Sawyer, P. (2013):** Requirements elicitation: Towards the unknown unknowns. In: 21st IEEE International Requirements Engineering Conference (RE). Rio de Janeiro-RJ, Brazil, 15.07.2013: IEEE, S. 92–104.
- Telenko, C.; Wood, K.; Otto, K.; Rajesh Elara, M.; Foong, S.; Leong Pey, K. et al. (2016):** Designettes: An Approach to Multidisciplinary Engineering Design Education. In: *J. Mech. Des* 138 (2), S. 133–143. DOI: 10.1115/1.4031638.
- Turki, T. (2014):** Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen. Dissertation. Fakultät für Maschinenbau (MACH). Institut für Produktentwicklung (IPEK).
- Ulrich, K.-T.; Eppinger, S.-D. (1995):** Product design and development. International eds. New York: McGraw-Hill.
- VDI Richtlinie 2221, 2019-11:** Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung.
- VDI-Richtlinie 3404, 2009:** Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen.
- Virzi, R. A.; Sokolov, J. L.; Karis, D. (1996):** Usability problem identification using both low- and high-fidelity prototypes. In: M. J. Tauber, B. Nardi und van der Veer, G. C. (Hg.): Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems common ground - CHI '96. New York, New York, USA: ACM Press, S. 236–243.

- Viswanathan, V.; Linsey, J. (2011):** Design Fixation in Physical Modeling: An Investigation on the Role of Sunk Cost. In: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences*, S. 119–130. DOI: 10.1115/DETC2011-47862.
- Vorwerk-Handing, G.; Gwosch, T.; Schork, S.; Kirchner, E.; Matthiesen, S. (2019):** Classification and Examples of Next Generation Machine Elements. In: *Forschung im Ingenieurwesen*. DOI: 10.1007/s10010-019-00382-1.
- Wäldele, M. (2012):** Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmen-basierte Produktentwicklung. Düsseldorf: VDI (Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, 414).
- Walker, M.; Takayama, L.; Landay, J. A. (2002):** High-Fidelity or Low-Fidelity, Paper or Computer? Choosing Attributes when Testing Web Prototypes. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 46 (5), S. 661–665. DOI: 10.1177/154193120204600513.
- Wall, M. B.; Ulrich, K. T.; Flowers, W. C. (1992):** Evaluating Prototyping Technologies for Product Design. In: *Res Eng Design* 3 (3), S. 163–177. DOI: 10.1007/BF01580518.
- Wasserstein, R. L.; Lazar, N. A. (2016):** The ASA Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose. In: *The American Statistician* 70 (2), S. 129–133. DOI: 10.1080/00031305.2016.1154108.
- Weber, C.; Deubel, T. (2003):** New theory-based concepts for PDM and PLM. In: A. Folkesson, K. Gralen, M. Norell und U. Sellgren (Hg.): *Research for practice - innovation in products, processes and organisations*. 14th International Conference on Engineering Design. Glasgow: Design Society (DS / Design Society, 31).
- Wood, K. L.; Otto, K. N. (1999):** *Product Design. Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Würtenberger, J. (2017):** Ein Beitrag zur Identifikation und Beherrschung von Unsicherheit bei der Modellierung technischer Systeme. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Yan, Q.-Z.; Williams, J. M.; Li, J. (2002):** Chassis Control System Development Using Simulation: Software in the Loop, Rapid Prototyping, and Hardware in the Loop. In: *SAE Transactions*, 111, S. 1734–1744. DOI: 10.4271/2002-01-1565.
- Yang, M. C. (2005):** A study of prototypes, design activity, and design outcome. In: *Design Studies* 26 (6), S. 649–669. DOI: 10.1016/j.destud.2005.04.005.
- Zemke, S. C. (2012):** Student Learning in Multiple Prototype Cycles. In: *The ASEE Annual Conference and Expedition*.
- Zorriassatine, F.; Wykes, C.; Parkin, R.; Gindy, N. (2005):** A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 217 (4), S. 513–530. DOI: 10.1243/095440503321628189.
- Zwicky, F. (1967):** The Morphological Approach to Discovery, Invention, Research and Construction. In: F. Zwicky und A. G. Wilson (Hg.): *New Methods of Thought and Procedure. Contributions to the Symposium on Methodologies*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 273–297.

## Eigene Veröffentlichungen

### 2016

Schork, S.; Gramlich, S.; Kirchner, E. (2016): Entwicklung von Smart Machine Elements - Ansatz einer smarten Ausgleichskupplung. In: D. Krause, K. Paetzold und S. Wartzack (Hgs.): Design for X. Beiträge zum 27. DfX-Symposium. Technische Universität Hamburg; TuTech Innovation GmbH; DfX-Symposium; Symposium Design for X. Hamburg: TuTech Verlag, S. 181–192.

### 2017

Schirra, T.; Schork, S.; Kirchner, E. (2017): Konstruierend mit Mikroinvasiven Intelligenten Maschinenelementen- Wälzlager als Element der Energie- und Signalübertragung. In Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hgs.): Design for X - Beiträge zum 28. DfX-Symposium Oktober 2017, Bamberg, In: Symposium Design for X 2017, Bamberg, 4.-5. Oktober 2017, S. 153-163

### 2018

Gramlich, S.; Ionescu, E.; Kirchner, E.; Schäfer, K.; Schork, S. (2018): Vom Material zur Produktioninnovation. Eine kritische Betrachtung der Innovationskette. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg (essentials).

Martin, G.; Schork, S.; Vogel, S.; Kirchner, E. (2018): MME – Potentiale durch mechatronische Maschinenelemente. In: Konstruktion (01-02/2018), S. 71–75.

Schork, S.; Kirchner, E. (2018): Defining Requirements in Prototyping: The Holistic Prototype and Process Development. In: P. Ekströmer, S. Schütte und J. Ölvander (Hgs.): Proceedings of NordDesign 2018 (NordDESIGN).

Schork, S.; Kirchner, E. (2018): Method for the Development of Early Prototypes of Mechatronic Machine Elements Based on their Critical Properties. In: D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić und N. Pavković (Hgs.): DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference (essentials), S. 1325–1336.

### 2019

Schork, S.; Kirchner, E. (2019): Purpose-Oriented Modelling of the Learning Process When Using Prototypes. In: Proc. Int. Conf. Eng. Des. 1 (1), S. 1573–1582. DOI: 10.1017/dsi.2019.163.

Vorwerk-Handing, G.; Gwosch, T.; Schork, S.; Kirchner, E.; Matthiesen, S. (2019): Classification and Examples of Next Generation Machine Elements. In: Forschung im Ingenieurwesen. DOI: 10.1007/s10010-019-00382-1.

### 2020

Schork, S.; Vorwerk-Handing, G.; Vogel, S.; Kirchner, E. (2020): Mechatronic Machine Elements – Approach to Develop Prototypes Based on the Signal Flow. In: I. Horváth (Hg.): Tools and methods of competitive engineering. Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2020. Delft: Delft University of Technology

Schork, S.; Kirchner, E. (2020): Prototypen entwickeln und einsetzen. In: E. Kirchner (Hg.): Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung. Von der Idee zum erfolgreichen Produkt: Springer Berlin Heidelberg, S. 338–367.

Schork, S.; Güttinger, K.; Kirchner, E. (2020): Eigenschaftsanalyse zur Entwicklung additiv gefertigter Prototypen – Das House of Properties. In: Forschung im Ingenieurwesen. DOI: 10.1007/s10010-020-00412-3.

## **Betreute studentische Arbeiten**

### **2016**

Schirra, T.: Entwicklung eines Prüfstandskonzepts zur Untersuchung von stromdurchflossenen Wälzlagern. Master-Thesis, 2016.

### **2017**

Heuser, M.: Methodik zur Implementierung strategischer Produktionsziele in die Produkt- und Prozessplanung. Master-Thesis, 2017.

Welzbacher, P.: Analyse technischer Schwachstellen smarterer Ausgleichkupplungen. Bachelor-Thesis, 2017.

Schösser, F.: Prototypenentwicklung sensorintegrierter Ausgleichkupplungen durch Identifikation kritischer Eigenschaften. Bachelor-Thesis, 2017.

### **2018**

Tilsner, C.: Entwicklung des Innovationsworkshops „Integration von Sensorik in Maschinenelementen“. Master-Thesis, 2018.

### **2019**

Häußer, M.: Analyse der Eignung agiler Methoden zur Unterstützung der Entwicklung physischer Produkte. Master-Thesis, 2019.

Wen, J.: Der Unterschied von Produkt und Prototyp im Rahmen der methodischen Produktentwicklung. Master-Thesis, 2019.

Haider, M.: Entwicklung von Prototypen zum Konzept „Drehmomentmessung im Antriebsstrang mittels Sensorschraube“. Bachelor-Thesis, 2019.

Güttinger, K.: Vorgehen zur Ermittlung von Anforderungen an Prototypen zur Validierung von Kunststoff-Spritzgussbauteilen. Master-Thesis, 2019.

---

## Lebenslauf

### Persönliche Informationen

Name: Stefan Schork  
Geburtsdatum: 22.03.1989  
Geburtsort: 64646 Heppenheim  
Nationalität: Deutsch

### Ausbildung und beruflicher Werdegang

- 05/2016 – 04/2020      **Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotionsstudent**  
Technische Universität Darmstadt  
Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente  
Angestrebter Abschluss: Doktor-Ingenieur  
Thema der Dissertation: Ein Beitrag zur methodischen Entwicklung von und mit Prototypen
- 08/2013 – 02/2016      **Master of Science Mechanical and Process Engineering**  
Technische Universität Darmstadt  
Abschluss: Master of Science  
Titel der Masterthesis: Schlüsseleigenschaften und Erfolgsfaktoren von Smart Machine Elements
- 09/2009 – 07/2013      **Bachelor of Science Mechanical and Process Engineering**  
Technische Universität Darmstadt  
Abschluss: Bachelor of Science  
Titel der Bachelor Thesis: Entwicklung und Implementation von Fahr-simulatorszenarien in ein bestehendes Versuchskonzept
- 08/2005 – 07/2009      **Abitur**  
Gymnasiale Oberstufe, Alfred-Delp-Schule Dieburg  
Abschluss: Abitur