

Tobias Stürmlinger

**Ein Beitrag zum Produkt-Produktions-  
CoDesign durch eine Methode zur  
Modellierung der Abhängigkeiten und  
Ableitung von Entwicklungsrisiken und -  
potentialen**

A contribution to product-production co-design  
through a method for modeling dependencies  
and deriving development risks and potentials

Band 162

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen  
(Hrsg.)



Forschungsberichte



Tobias Stürmlinger

**Ein Beitrag zum Produkt-Produktions-CoDesign durch eine Methode zur Modellierung der Abhängigkeiten und Ableitung von Entwicklungsrisiken und -potentialen**

A contribution to product-production co-design through a method for modeling dependencies and deriving development risks and potentials

Band 162

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2023  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

# **Ein Beitrag zum Produkt-Produktions-CoDesign durch eine Methode zur Modellierung der Abhängigkeiten und Ableitung von Entwicklungsrisiken und -potentialen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

**DISSERTATION**

von

M.Sc. Tobias Stürmlinger

Tag der mündlichen Prüfung:	13.02.2023
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer



# Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe\* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

\* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)



## Vorwort zu Band 162

Der Produktentstehungsprozess, wie er von ALBERS und GAUSEMEIER definiert wurde, fasst die Aktivitäten Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung zusammen zu einem Gesamtkonstrukt. Dabei muss festgestellt werden, dass diese drei Kernaktivitäten über lange Zeit sequentiell, also nacheinander, und oft auch wenig vernetzt abgelaufen sind. Diese Art die Produktentstehung zu organisieren und zu planen, ist bei den Herausforderungen des 21. Jahrhunderts mit zunehmender Komplexität und Kompliziertheit der Produktlösungen, der Ergänzung des Begriffes Produkt zu einer Kombination aus mechatronischer Produktlösung plus Service und gegebenenfalls Geschäftsmodell und den gesellschaftlichen Herausforderungen, die sich aus der Berücksichtigung der Umweltaspekte, aber auch der, durch die Globalisierung getriebenen, extremen Konkurrenz auf den Märkten, nicht mehr adäquat. Wir können nicht mit den Methoden und Prozessen des 20. Jahrhunderts die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts in der Produktentstehung angehen, wie ich an mehreren Stellen festgestellt habe. Es ist also notwendig, hier zu neuen Ansätzen zu kommen. Im Rahmen der Karlsruher Schule für Produktentwicklung – KaSPro – aber auch den Aktivitäten im Forschungsverbund des KIT zum Thema „Neue Ansätze für die Produktentstehung“ entstehen ganzheitliche neue Konzepte und Lösungsansätze, um mit dieser Herausforderung umzugehen. Wir fassen das zusammen unter dem Begriff „Produkt- und Produktions-Co-Design“. Das meint eine starke Parallelisierung und Vernetzung der Produktentwicklung, inklusive der Produktplanung mit der nun parallelisierten Produktionssystementwicklung, bis hin zum Betrieb der Produktion.

Der Ansatz beruht auf der Systemtheorie und im Kern, basierend auf den Ansätzen von ROPOHL, auf dem im Rahmen der KaSPro von ALBERS definierten ZHO-Modell. Das ZHO-Modell beschreibt den Produktentstehungsprozess ganzheitlich als Überführung eines Systems von Zielen und Anforderungen durch ein Handlungssystem, das zum Beispiel im Unternehmen selbst repräsentiert ist, hin zu einem System von Objekten und Lösungen. Dabei sind Zielsystem und Objektsystem nicht statisch zu betrachten, sondern dynamisch zeitabhängig über das Handlungssystem gekoppelt. Mit diesem Ansatz und dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung, das jede Art von Produktentwicklung als Abbildung eines Referenzsystems mit unterschiedlichsten Elementen auf eine neue Produktgeneration modelliert, ist eine Basis geschaffen, um das Produkt- und Produktions-Co-Design neu anzugehen.

Das PGE-Modell ist dabei allgemeingültig. Es gilt sowohl für die Produkte, die in Generationsfolgen bereits entwickelt worden sind – das ist der Standardfall in den meisten Unternehmen, insbesondere im Bereich der Serienprodukte, aber natürlich auch für die einmalige Erstentwicklung einer neuen Produktgeneration, also einer G1 Entwicklung, sowie auch für die Einzelentwicklung einer Lösung, wie zum Beispiel im Anlagenbau. Das Konzept beruht darauf, dass immer ein Referenzsystem entsteht, das während des Produktent-

stehungsprozesses kontinuierlich mit Elementen befüllt und erweitert wird. Diese Referenzsystemelemente werden dann durch geeignete Variationen auf die neue Lösung abgebildet. Natürlich können auch Referenzsystemelemente, die sich im Syntheseprozess als ungeeignet für die Verwendung in der aktuell zu entwickelnden Generation erwiesen haben, wieder aus dem Referenzsystem entfernt werden. Dies Konzept kann sowohl für die Entwicklung des Produktes als auch auf die Entwicklung des Produktionssystems, ja sogar für die Entwicklung des Produktportfolios im Rahmen der Produktplanung verwendet werden. Die Veröffentlichungen, die im Rahmen der KaSPro zu diesem Thema in den letzten zehn Jahren entstanden sind, haben eine große Sichtbarkeit erreicht. Das Modell der PGE nach Albers ist ein Modell, das die Entwicklungspraxis der Unternehmen in einem grundlegenden Ansatz beschreibt.

Im Kontext dieser ganzheitlichen Forschung ist auch die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Tobias Stürmlinger angeordnet. Er hat sich zum Ziel gesetzt, die Ansätze zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Produktion und Produktionssystem im Konzept und auf Basis der Modelle der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung zu untersuchen und zu modellieren. Das Ergebnis ist eine Methodik, die sowohl wesentliche Beiträge zur grundlegenden Forschung in der Produktentstehung leistet und gleichzeitig auch für die Praxis im Kontext des Produkt-Produktions-Co-Design wertvolle Ansätze liefert.

Oktober, 2022

Albert Albers

## Kurzfassung

Durch die Mechatronisierung und Digitalisierung von Produkten, einem hohen Kundenbedarf an individuellen Produkten auf der einen Seite und die hierfür notwendigen flexiblen Produktionssysteme unter dem Einsatz von Industrie 4.0 Technologien auf der anderen Seite, steigt die Komplexität in der Entwicklung von Produkten und den zugehörigen Produktionssystemen. Für einen effizienten Produktentstehungsprozess müssen diese beiden Domänen integriert betrachtet werden und Methoden für das Produkt-Produktions-CoDesign entwickelt werden, die die Entwickler hierbei unterstützen. Eine große Herausforderung hierbei ist es, die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem frühzeitig identifizieren zu können, um späte Änderungen im Produktentstehungsprozess zu vermeiden und damit die Entwicklungskosten zu reduzieren.

In dieser Arbeit wird ein Vorgehensmodell samt Teilmethoden entwickelt, in dem auf Basis der Referenzsystemelemente aus dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem modelliert werden und die Ausbreitung von Änderungen in der in Entwicklung befindlichen Produktgeneration innerhalb und zwischen der Domänen Produkt und Produktionssystem untersucht werden. Hierzu werden einerseits Vorlagen für die Erfassung von Informationen aus den Ebenen Produktfunktion, Produktgestalt und Produktionsprozesse erstellt und andererseits eine Abhängigkeitsmatrix entwickelt, in der die komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Ebenen dargestellt werden. Daraus wird unter Einbeziehung des Neuentwicklungsanteils das technische Entwicklungsrisiko alternativer Lösungen im Produkt-Produktions-CoDesign ermittelt, welches den Entwicklern in der Entscheidungsfindung unterstützt. Des Weiteren wird eine Teilmethode entwickelt, mit der Entwicklungspotentiale durch Nutzung von Industrie 4.0 Technologien an Produkt und Produktionssystem in den jeweiligen Produktentstehungsaktivitäten identifiziert werden können und den damit verbundenen Aufwänden in Bezug auf notwendige Menge und Detailgrad der Daten aus dem Produktionsprozess gegenübergestellt werden.

Die Anwendung der entwickelten Teilmethoden in Forschungsprojekten und Anwendungsfällen der industriellen Praxis zeigt deren Anwendbarkeit und deren prinzipiellen Nutzen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl Entwicklungspotentiale als auch -risiken identifiziert werden können und den Produkt- und Produktionssystementwicklern somit eine Unterstützung im Produkt-Produktions-CoDesign geboten wird.



## Abstract

Due to the mechatronization and digitalization of products, a high customer demand for individual products on the one hand and flexible production systems under the use of Industrie 4.0 technologies that are required for the realization of this on the other hand, the complexity in the development of products and the associated production systems is increasing. For an efficient product engineering process, these two domains must be considered in an integrated manner and methods for the product-production system co-design must be developed to support the developers in this process. A major challenge here is to be able to identify the interdependencies between product and production system at an early stage in order to avoid late changes in the product development process and thus reduce development costs.

In this work a process model including partial methods is developed, in which, on basis of the reference system elements from the model of the PGE - product generation engineering, the interdependencies between product and production system are modeled and the propagation of changes in the product generation under development within and between the domains product and production system are examined. For this purpose, templates for the acquisition of information in the levels product function, product embodiment and production processes are created on the one hand and a dependency matrix is developed on the other hand, in which the complex interactions between these levels are represented. From this, the technical development risk of alternative solutions of the product-production-system is determined, taking into account the new development share, which supports the developers in their decision-making process. Furthermore, a method is developed to identify development potentials through the use of Industry 4.0 technologies in the product and production system in the respective product development activities and to compare these with the associated efforts in terms of the necessary quantity and level of detail of the data from the production process.

The application of the developed methods in research projects and application cases of industrial praxis shows their applicability and their principal benefit. The results show that both development potentials and risks can be identified and that product and production system developers are thus provided with support in product-production system co-design.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit habe ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfasst.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, der mir meine Forschung ermöglicht und durch die wissenschaftliche Betreuung wichtige Impulse gegeben hat. Ich habe stets großes Vertrauen in die Ausgestaltung meiner Forschung gespürt und große Freiheiten in meiner Zeit am Institut genossen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer möchte ich für die Übernahme des Korreferats und den häufigen Austausch danken, der im Rahmen eines von ihm geleiteten, öffentlich geförderten Projekts, stattfand. Dabei hatte ich mit Herrn Prof. Albers und Herr Prof. Fleischer denkwürdige Reisen nach China, auf denen ich viel gelernt habe.

Des Weiteren möchte ich mich beim gesamten IPEK-Team bedanken. Angefangen bei Administration und IT, die mir den Rücken freigehalten haben und ich mich somit auf meine Forschungsarbeit konzentrieren konnte bis zu den wissenschaftlichen Mitarbeitern, mit denen ich mich innerhalb oder außerhalb der Projektarbeit intensiv ausgetauscht habe. Dies führte zu zahlreichen Erkenntnissen aber auch viel Spaß auf der Arbeit.

Ein besonderer Dank geht an Katharina Bause, welche mir erst als Gruppenleiterin und später als Oberingenieurin bei Seite gestanden hat. Als Gruppenleiter habe ich viel von ihr gelernt. Wir haben gemeinsam einige schwierige Herausforderungen gemeistert und mit viel Motivation aber auch insbesondere in freundschaftlicher Atmosphäre die Projektlandschaft am IPEK mitgestaltet.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden, meiner Familie und meiner Freundin bedanken. Hier habe ich stets Ermutigung aber auch die wichtige Ablenkung gefunden um mich auf das Ziel der Promotion fokussieren zu können. Dafür bedanke ich mich von ganzem Herzen!

Karlsruhe, den 15.01.2023



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xxi</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b> .....	<b>5</b>
2.1 Der Produktentstehungsprozess .....	5
2.1.1 Herausforderungen im Produktentstehungsprozess .....	6
2.1.2 iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell.....	9
2.1.3 Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung.....	11
2.1.4 Simultaneous Engineering.....	14
2.1.5 Produkt-Produktions-CoDesign .....	15
2.2 Modellierung der Abhängigkeiten von Produkt und Produktionssystem.17	
2.2.1 Modellierung und Erfassung von Informationen eines Produkts	17
2.2.2 Darstellungsformen von Abhängigkeiten und Auswirkungen (MDM & DSM) .....	21
2.3 Auswirkungs- und Risikoanalyse in der Entwicklung von Produkt und Produktionssystem .....	24
2.3.1 Abhängigkeitsmatrizen von Produkt-Subsystemen zur Risikobewertung .....	25
2.3.2 Bewertung der Strukturrobustheit von Produktkonzepten .....	27
2.3.3 PGE-Risikoportfolio .....	29
2.4 Industrie 4.0.....	30
2.4.1 Potentialfindung für Industrie 4.0 Lösungen.....	32
<b>3 Motivation und Zielsetzung</b> .....	<b>35</b>
3.1 Motivation und Forschungslücke .....	35
3.2 Zielsetzung.....	37
3.2.1 Forschungsvorgehen .....	39
<b>4 Definitionen</b> .....	<b>43</b>
4.1 Produktionssystem .....	43
4.2 Industrie 4.0 Funktionen .....	43
4.3 Design for Industrie 4.0 .....	44

4.4	Design with Industrie 4.0.....	44
<b>5</b>	<b>Zielsystem der zu entwickelnden Methode .....</b>	<b>45</b>
5.1	Analyse der bestehenden Methoden zur Auswirkungs- und Risikoanalyse zwischen Produkt und Produktionssystem .....	45
5.2	Ableitung des initialen Zielsystems für die zu entwickelnde Methode....	48
<b>6</b>	<b>Initiale Methode zur Unterstützung im PPCD .....</b>	<b>53</b>
6.1	Vorgehensmodell.....	53
6.2	Teilschritte und -methoden .....	55
6.2.1	Identifikation & Analyse des Referenzsystems.....	55
6.2.2	Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen an Referenzsystemelementen .....	60
<b>7</b>	<b>Initiale Anwendung der Methode .....</b>	<b>67</b>
7.1	Methodische Analyse und Auswahl eines Autoidentifikationssystems in der Antriebskegelradproduktion .....	67
7.1.1	Analyse der Referenzprodukte als Elemente des Referenzsystems .....	68
7.1.2	Analyse der Elemente des Referenzproduktionssystems.....	74
7.1.3	Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen .....	77
7.1.4	Anpassung des Produktdesigns und des Produktionssystems..	80
7.2	Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen am Beispiel einer Federwindmaschine.....	80
7.3	Zwischenfazit nach Anwendung der Methode.....	86
<b>8</b>	<b>Weiterentwicklung der Methode.....</b>	<b>89</b>
8.1	Modellierung der relevanten Elemente des Referenzsystems zur Auswirkungs- und Risikoanalyse .....	89
8.1.1	Beschreibung des Modells .....	91
8.1.2	Bestimmung der Änderungsausbreitung .....	92
8.1.3	Bestimmung des Grads der Änderungsausbreitung.....	97
8.1.4	Bestimmung des Entwicklungsrisikos durch Kombination des Grads der Änderungsausbreitung mit dem Neuentwicklungsanteil .....	99
<b>9</b>	<b>Anwendung der weiterentwickelten Teilmethoden.....</b>	<b>103</b>
9.1	Bewertung des Entwicklungsrisikos einer neuen Produktgeneration eines Leichtbaugetriebegehäuses .....	103
9.1.1	Modellierung der relevanten Referenzsystemelemente.....	105
9.1.2	Modellierung alternativer Produktkonzepte .....	107
9.1.3	Bestimmung des Entwicklungsrisikos.....	113

9.2	Bewertung des Entwicklungsrisikos für ein Autoidentifikationssystem eines Antriebskegelrads .....	117
9.2.1	Modellierung der relevanten Referenzsystemelemente .....	117
9.2.2	Modellierung alternativer Produktkonzepte .....	119
9.2.3	Bestimmung des Entwicklungsrisikos .....	123
<b>10</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Fazit .....</b>	<b>129</b>
10.1	Beantwortung der Forschungsfragen und -hypothese .....	131
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>135</b>
11.1	Zusammenfassung .....	135
11.2	Ausblick .....	136
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>I</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau der Arbeit .....	3
Abbildung 2.1:	Darstellung des integrierten Produktentstehungsprozesses nach Albers und Gausemeier (2012).....	6
Abbildung 2.2:	Qualitative Darstellung der Entwicklung der Anzahl an Komponenten, Funktionen und Interaktionen in und zwischen Systemen (Beihoff et al., 2014). Insbesondere im Zuge der Industrialisierung, Mechatronisierung und Digitalisierung bzw. Vernetzung steigt die Anzahl an Interaktionen, Funktionen und Komponenten stark an. ....	7
Abbildung 2.3:	Rule of Ten – Die Kosten pro Fehler in der Produktentstehung steigen je nach Entdeckungszeitpunkt stark an. (Darstellung von Jost, 2019 in Anlehnung an Reinhart et al., 1996, S. 49). Abkürzungen: F&E: Forschung und Entwicklung; QM: Qualitätsmanagement .....	8
Abbildung 2.4:	Das iPeM - integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der Produktgenerations-, Produktionssystem-, Validierungssystem- und Strategieentwicklung (Albers, Reiß et al., 2016).....	9
Abbildung 2.5:	Modell der PGE mit Darstellung des Referenzsystems am Beispiel des Tesla Roadsters. Das Fahrwerk muss an den veränderten Massenschwerpunkt durch das Batteriesystem angepasst werden, das durch den angepassten Einsatzort eine andere Betriebsstrategie aufweist. (Albers, Rapp et al., 2019) 11	11
Abbildung 2.6:	Visualisierung grundlegender Aspekte des PPCD. In der PGE werden Elemente des Referenzsystems unter Berücksichtigung der Evolution des Produktionssystems verwendet. Dabei muss auch der Markt mit seinen Anforderungen und die zugehörigen Geschäftsmodelle berücksichtigt werden.(Albers, Rapp et al., 2022).....	16
Abbildung 2.7:	Black-Box Darstellung eines Systems, in dem durch eine oder mehrere Funktionen Energie, Stoff und Signal als Eingangs- zu Ausgangsgrößen überführt werden (nach Pahl et al., 2007, S. 43) .....	18
Abbildung 2.8:	Beispielhafte Erzeugnisgliederung (Darstellung von Wang, 2018 nach Pahl et al., 2007).....	19

Abbildung 2.9:	Übersicht über den C&C <sup>2</sup> -Ansatz mit dessen Elementen, Grundhypothesen und einem Beispielhaften C&C <sup>2</sup> -Modell. (Darstellung von Matthiesen et al., 2020 nach Matthiesen et al., 2018) .....	21
Abbildung 2.10:	DSM (nach Browning, 2001). Element 1 beeinflusst Element 4, Element 2 beeinflusst Element 3, Element 3 beeinflusst Element 1 und Element 4 beeinflusst Element 3.....	22
Abbildung 2.11:	DMM aus den DSM der Domänen A und B (nach Eppinger & Browning, 2012, S. 237) .....	23
Abbildung 2.12:	MDM, bestehend aus den DSM der Domänen Ziele, Produkt, Prozess, Organisation und Werkzeuge, sowie deren DMM (Danilovic & Browning, 2007).....	24
Abbildung 2.13:	Klassifizierung der Informationsflüsse zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung nach ihrer Nutzung innerhalb der beiden Disziplinen nach Steimer und Aurich (2016) .....	25
Abbildung 2.14:	Methode zur Vorhersage von Änderungen (Clarkson et al., 2001) .....	26
Abbildung 2.15:	Direkte Abhängigkeits-, Wahrscheinlichkeits-, Auswirkungs- und Risikomatrizen einzelner Produktkomponenten (Clarkson et al., 2001) .....	27
Abbildung 2.16:	Kritische Elemente Portfolio zur Kategorisierung der Elemente eines Produktkonzepts basierend auf Auswirkungswahrscheinlichkeit und normiertem Einfluss (Gausemeier et al., 2012) .....	28
Abbildung 2.17:	PGE-Risikoportfolio zur Risikobewertung von Teilsystemen. Das Entwicklungsrisiko einer neuen Produktgeneration steigt mit dem Neuentwicklungsanteil und wenn Referenzsystemelemente aus externen Unternehmen oder Institutionen stammen. (Albers, Rapp et al., 2017) .....	30
Abbildung 2.18:	Überblick über die vier industriellen Revolutionen (btelligent.com).....	31
Abbildung 2.19:	Aufbau des Leitfadens Industrie 4.0 (Anderl & Fleischer, 2015) .....	31
Abbildung 2.20:	Framework für Design for Industrie 4.0.(Schuh et al.) Die Herausforderungen sind in die acht Quadranten Orientierung, Daten, Interaktion und Ressourcen in Produkt und (Produktions-) Prozess unterteilt.....	32

Abbildung 2.21:	Beispielhafter Clusterstreckbrief zur Beschreibung von Technologien. (Kohl et al., 2019).....	33
Abbildung 3.1:	Überblick über den Konfigurationsprozess schlüsselfertiger Produktionssysteme im Projekt I4TP. (Fleischer, Albers et al., 2022) Die in dieser Arbeit entwickelte Methode gliederte sich im Projekt maßgeblich zwischen den Schritten „Feature Extractor“ und „Turnkey Configurator“ ein.....	36
Abbildung 3.2:	Vorgehen in der entwicklungsmethodischen Forschung (Marxen, 2014; Marxen & Albers, 2012).....	39
Abbildung 3.3:	In dieser Arbeit angewendetes Forschungsvorgehen.....	40
Abbildung 5.1:	Anwendungsaktivitäten der zu entwickelnden Methode im iPeM .....	50
Abbildung 6.1:	Vorgehensmodell zur ganzheitlichen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem nach Albers, Stürmlinger et al. (2019). In einem ersten Syntheseschritt wird das Referenzsystem identifiziert und schließlich analysiert. Produktseitig werden Gestalt-Funktions-Zusammenhäng analysiert und anschließend die Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktionssystem modelliert. Zuvor identifizierte (Industrie 4.0) Potentiale können in die Modellierung aufgenommen werden. Etwaige Anpassungen an Produkt und Produktionssystem werden modelliert und einer Auswirkungs- und Risikoanalyse unterzogen, welche auf den modellierten Zusammenhängen basiert. ....	54
Abbildung 6.2:	Zugeordnete Funktionen, Gestaltmerkmale und Produktionsprozesse.....	60
Abbildung 6.3:	Vorgehen zur Identifikation relevanter Industrie 4.0 Daten (Stürmlinger et al., 2018).....	61
Abbildung 6.4:	Framework zu Design with Industrie 4.0. Daten aus dem Referenzsystem werden zu Kennwerten verdichtet und voranalysiert in einer Datenbank, bestehend aus Qualitäts-, Leistungs-, Maschinendaten und Feedbacks des Maschinenbedieners oder Nutzers, abgelegt. Diese fließen je nach Entwicklungsziel in verschiedene Phasen des hier vereinfacht dargestellten PEP und werden zur Entwicklung der nächsten Generation des Produkts oder Produktionssystems genutzt. (nach Stürmlinger et al., 2018).....	62
Abbildung 6.5:	Entwicklungspotentialmatrix für Design with Industrie 4.0 (basierend auf Stürmlinger et al., 2018). Die Wichtigkeit von	

	Entwicklungszielen (blau) wird für jede relevante Produktentstehungsaktivität von 0 bis 3 bewertet, der dafür notwendige Datenaufwand (türkis) von - - (Daten nicht benötigt) bis + + (Rohdaten in vollem Umfang benötigt). Aufwand und Nutzen werden schließlich gegenübergestellt.....	63
Abbildung 7.1:	Produktmerkmale des untersuchten Antriebskegelrads (Comak, 2018) und (Stürmlinger et al., 2019) .....	68
Abbildung 7.2:	Funktionsbaum des Antriebskegelrads, aufgeteilt in Betriebsfunktionen (Hauptfunktionen) und Hilfsfunktionen für die Produktion. Gestrichelt umrandete Funktionen, die in der nächsten Produktgeneration erfüllt werden müssen, wurden von den Produkt- und Produktionssystementwicklern des Automobilherstellers definiert.....	69
Abbildung 7.3:	Vereinfachte Fertigungsschritte in der Antriebskegel- und Tellerradfertigung. Darstellung von Stürmlinger et al. (2019) in Anlehnung an Koller und Hardjosuwito (2015).....	74
Abbildung 7.4:	Übersicht über verfügbare Auto-ID-Systeme. Eigene Darstellung nach Hippenmeyer und Moosmann (2016).....	78
Abbildung 7.5:	Links: Im Anwendungsfall untersuchte Federwindemaschine(Wafios AG, 2021); Rechts: beispielhaft dargestellte Bogenfeder (Brand KG, 2020).....	81
Abbildung 7.6:	Windezentrum einer Federwindemaschine. Der Draht (115) wird durch die Drahtführung (116) auf den ersten (124) und zweiten (122) Windestift geschoben und somit umgeformt. Die Federsteigung wird durch den Steigungskeil (130) realisiert und die Feder durch das Schneidewerkzeug (152) abgetrennt. (Sigg, 2015).....	82
Abbildung 7.7:	In Workshops mit anwendendem und herstellendem Unternehmen einer Federwindemaschine erarbeitete Entwicklungspotentialmatrix für Industrie 4.0. Während Schadensmodelle der Windestifte den größten Nutzen zeigen ist das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand beim Schadensmodell des Schneidewerkzeugs am höchsten. Nach (Stürmlinger et al., 2018) .....	85
Abbildung 8.1:	Auswirkungsmatrix - ein Matrixbasiertes Modell zur Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem des Referenzsystems mit generischen Abhängigkeiten nach Jost (2019) und Stürmlinger et al. (2020).	

	Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen sind nicht gerichtet und durch ein „X“ markiert.....	90
Abbildung 8.2:	Auswirkungsmatrix zur Auswirkungsanalyse mit dargestellter Änderungsausbreitung. Von Gestaltmerkmal 1 der Komponente 1 geht eine Änderung (rot) aus. Merkmal n der Komponente n, sowie Funktion 1 und die Produktionsprozesse 1 und 3 sind direkt von den Änderungen betroffen (orange). Ändern sich diese, breiten sich die Änderungen wiederum auf Maschine 1, Prozess n Funktion n und Merkmal 1 der Komponente n aus (gelb). Weitere Änderungsausbreitungen sind nicht dargestellt. Nach Jost (2019) und Stürmlinger et al. (2020).....	94
Abbildung 8.3:	Auswirkungsmatrix der neuen Produktgeneration mit Prinzipvariation unter dem Einfügen des Merkmals 1b und Entfernen von Merkmal 1 der Komponente 1 .....	96
Abbildung 8.4:	Risikodiagramm dreier generischer, alternativer Produktalternativen unter Einbezug des Grads der Änderungsausbreitung und des Neuentwicklungsanteils (Albers et al., 2021; Jost, 2019).....	99
Abbildung 9.1:	Am Markt befindliches Roller-Getriebegehäuse $G_{n-1}$ als Referenzprodukt zur Weiterentwicklung für die nächste Produktgeneration $G_n$ mit den Komponenten (1) Flansch, (2) Aufhängung, (3) Deckel und (4) Mittelteil. Diese Komponenten gehören alle zum Bauteil Gehäuse. (Albers, Revfi & Spadinger, 2017).....	104
Abbildung 9.2:	Auswirkungsmatrix der relevanten Referenzsystemelemente bestehend aus dem am Markt befindlichen Roller-Getriebegehäuse und dessen Produktionssystem .....	106
Abbildung 9.3:	Konzept einer möglichen Leichtbaulösung mit Aussparungen im Mittelteil und Polymereinsatz (Albers, Moeser & Revfi, 2018). Damit wird eine Trennung der Funktion „Medien abdichten“ realisiert. Rechts: Schnitt durch das Gehäuse (grau) und Polymereinsatz (schwarz) (Albers et al., 2021). Es entsteht ein neues Wirkflächenpaar zwischen Polymereinsatz und Deckel samt Lagersitz .....	107
Abbildung 9.4:	Auswirkungsmatrix des Produktkonzepts mit Aussparungen im Mittelteil und der Integration eines Polymereinsatzes. Die initiale Prinzipvariation des Mittelteils hat eine Auswirkung auf den Drehprozess des Deckels durch die Änderungsausbreitung über die Funktion „Medien abdichten“, welche den	

	Polymereinsatz erforderlich macht, der wiederum mit dem Deckel in Wechselwirkung steht. Hohe Kosten entstehen durch eine ggf. neu anzuschaffende Spritzgussmaschine. (Albers et al., 2021) .....	109
Abbildung 9.5:	Pfad der Änderungsausbreitung über die initiale Prinzipvariation des Mittelteils.....	110
Abbildung 9.6:	Alternatives Leichtbaukonzept mit Wabenstruktur im Mittelteil des Gehäuses (Albers, Moeser & Revfi, 2018) .....	111
Abbildung 9.7:	Auswirkungsmatrix des Produktkonzepts mit Wabenstruktur im Mittelteil. Bis auf den Fräsprozess gibt es keinerlei Auswirkungen, welcher allerdings hohe Produktionszeiten und -kosten verursacht. ....	112
Abbildung 9.8:	Risikodiagramm der beiden alternativen Leichtbaukonzepte unter Einbezug des Grads der Änderungsausbreitung und des Neuentwicklungsanteils ohne Berücksichtigung derer Kritikalitäten. ....	116
Abbildung 9.9:	Auswirkungsmatrix der relevanten Referenzsystemelemente bestehend aus dem am Markt befindlichen AKR und dessen Produktionssystem. ....	118
Abbildung 9.10:	Auswirkungsmatrix der Alternative 1 mit aufgeprägtem DMC auf die Stirnseite des AKR. Fläche 6 erfüllt somit nur noch die Funktion einer LSS. Die Aufprägung des DMC auf die Stirnfläche macht die Vergrößerung deren Durchmessers notwendig. Die Stirnfläche steht in direkter Wechselwirkung mit Fläche 9 samt deren Verzahnung, die mit dem Abtriebskegelrad die Hauptfunktion „Drehmoment übertragen“ erfüllt. Durch die Bearbeitung der Stirnfläche und Fläche 9 sind auch deren Produktionsprozesse „Hartdrehen“, „Verzahnungsfräsen“ und „Läppen“ von Änderungen betroffen. Für die Prägemaschine sind neue Prozessparameter notwendig. ....	120
Abbildung 9.11:	Pfad der Änderungsausbreitung über die initiale Ausprägungsvariation des Produktionsprozesses „DMC Prägen“.....	121
Abbildung 9.12:	Auswirkungsmatrix der Alternative 2 mit ÜV des DMC und dessen Prägeprozesses. Die neue Rotationsmaschine stellt eine PV des Produktionssystems dar. ....	122
Abbildung 9.13:	Risikodiagramm der beiden Alternativen unter Einbezug des Grads der Änderungsausbreitung und des	

	Neuentwicklungsanteils ohne Berücksichtigung derer Kritikalitäten.....	127
Abbildung 11.1:	Darstellung der Verknüpfung von Elementen eines Mehrwegeventils in den Domänen Produkt und Produktionssystem (Mandel et al., 2020). .....	137
Abbildung 11.2:	Abhängigkeiten zwischen Variationsarten von Produkt und Produktionssystem am Beispiel eines immer kleiner werdenden Lochs (Albers et al., 2020). Wird das Loch in Produktgeneration $G_n$ kleiner, so handelt es sich beim Produkt um eine GV, beim Produktionssystem um eine AV mit geänderten Prozessparametern und kleinerem Werkzeug. Eine weitere Verkleinerung des Lochs (GV) in der Generation $G_{n+1}$ führt ab einem gewissen Punkt zu einer PV des Produktionssystems, da der bisherige Fertigungsprozess die Geometrie nicht mehr realisieren kann.....	138



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Bewertung der Methoden zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem und der Evaluation der Auswirkungen und Risiken von Neu- und Weiterentwicklungen .....	47
Tabelle 6.1:	Beschreibung einer Teilfunktion eines Produkts, basierend auf Wang (2018) und Albers, Stürmlinger et al. (2019) .....	57
Tabelle 6.2:	Beschreibung der Gestaltebene eines Produkts nach Wang (2018) und Albers, Stürmlinger et al. (2019).....	58
Tabelle 6.3:	Beschreibung der Prozesse zur Produktion eines Produkts, nach Wang (2018) und Albers, Stürmlinger et al. (2019).....	59
Tabelle 7.1:	Detaillierte Informationen über ausgewählte Betriebsfunktionen und deren Unterfunktionen des Antriebskegelrads .....	70
Tabelle 7.2:	Detaillierte Informationen über ausgewählte Hilfsfunktionen für die Produktion und deren Unterfunktionen des Antriebskegelrads .....	71
Tabelle 7.3:	Informationen der den aufgeführten Funktionen zugeordneten Gestaltmerkmale .....	73
Tabelle 7.4:	Fertigungsprozesse der jeweiligen Gestaltmerkmale des AKR76	
Tabelle 7.5:	Bewertung verschiedener Auto-ID-Systeme nach vom Automobilhersteller als entscheidend eingestuften Kriterien ...	79
Tabelle 8.1:	Neuentwicklungsanteil und Grad der Änderungsausbreitung von A1, A2 & A3 .....	100
Tabelle 8.2:	Unterstützung zur Bewertung der Gewichtungsfaktoren $k_{1,i}$ und $k_{2,j}$ für die Berechnung des Entwicklungsrisikos im PPCD ...	101



# Abkürzungsverzeichnis

AKR	Antriebskegelrad
Auto-ID	Autoidentifikation
AV	Ausprägungsvariation
C&C <sup>2</sup> -A	Contact Channel & Connector Ansatz
DMC	Data Matrix Code
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
ETWA	Extended Target Weighing Approach
F&E	Forschung und Entwicklung
GFZ	Gestalt-Funktions-Zusammenhänge
GV	Gestaltvariation
HF	Hauptfunktion
I4TP	Sino-German Industry 4.0 Factory Automation Platform
IPEK	Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KPI	Key Performance Indicator, dt.: Leistungskennzahl
LGG	Leichtbaugetriebegehäuse
MDM	Multidomain Matrix
MMD	Multi-Material-Design
NF	Nebenfunktion
P	Produkt
PE	Produktentstehung
PEP	Produktentstehungsprozess

PGE	Produktgenerationsentwicklung
PPCD	Produkt-Produktions-CoDesign
PS	Produktionssystem
PSE	Produktionssystementwicklung
PV	Prinzipvariation
SGE	Systemgenerationsentwicklung
QM	Qualitätsmanagement
ÜV	Übernahmevariation
wbk	Institut für Produktionstechnik

## Formelzeichen

$C_p$	Summe der potentiell mögl. Änderungsauswirkungen
$C_r$	Summe der relevanten Änderungsausbreitungen
$D_C$	Grad der Änderungsausbreitung
$R_D$	Entwicklungsrisiko
$\delta_{GV,n}$	Neuentwicklungsanteil aus Gestaltvariation
$\delta_{N,n}$	Gesamter Neuentwicklungsanteil
$\delta_{PV,n}$	Neuentwicklungsanteil aus Prinzipvariation
$\delta_{ÜV,n}$	Neuentwicklungsanteil aus Übernahmevariation



# 1 Einleitung

Im Produktentstehungsprozess können in späten Phasen Fehler auftreten, etwa, wenn mit dem vorhandenen Produktionssystem nicht die vom Entwicklungsteam gewünschte Produktqualität erreicht werden kann oder Wechselwirkungen zwischen Elementen des Produkt- oder Produktionssystems auftreten, die nicht bekannt waren. Dies führt dazu, dass entweder Änderungen am Design des Produkts oder aufwändige Anpassungen am Produktionssystem vorgenommen werden müssen. Beides führt nach der Rule of Ten zu sehr hohen Kosten (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 168). Durch die hohe Komplexität mechatronischer Produkte und flexibler Produktionssysteme sind deren Abhängigkeiten für die Produkt- und Produktionssystementwickler<sup>1</sup> nur schwer nachvollziehbar. Solche Problemstellungen lassen sich in interdisziplinären Teams im Sinne des Simultaneous Engineering lösen. Hierzu existieren im Stand der Forschung zahlreiche Untersuchungen, jedoch meist mit Fokus auf der Organisation von Teams oder auf Methoden der Produktentwicklung. Methoden zur fachübergreifenden Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen im Sinne des Produkt-Produktions-CoDesigns (PPCD) sind kaum untersucht.

In der vorliegenden Arbeit wird diese Lücke adressiert, indem ein Vorgehensmodell samt Teilmethoden entwickelt wird, welches Produkt- und Produktionssystementwickler in der Modellierung der Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Domänen Produkt und Produktionssystem unterstützt und eine Abschätzung von Auswirkungen und Risiken bei der Entwicklung einer neuen Produktgeneration ermöglicht. Auf dieser Basis können außerdem Industrie 4.0 Potentiale im Sinne von Design for und Design with Industrie 4.0 identifiziert werden.

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wird im Stand der Forschung auf den Produktentstehungsprozess (PEP) im Allgemeinen, sowie auf Methoden und Prozesse im Produktentstehungsprozess und im Kontext des PPCD eingegangen, die zum Verständnis der Arbeit wichtig sind und genutzt oder weiterentwickelt werden. Daraus

---

<sup>1</sup> Werden Produkt- und Produktionssystementwickler oder Entwickler und Ingenieure genannt, so sind damit ausdrücklich Zugehörige aller Geschlechter gemeint. Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit das generische Maskulin verwendet.

wird in Kapitel 3 die Motivation und Zielsetzung der Arbeit, samt Forschungshypothese und Forschungsfragen abgeleitet. Da im Rahmen der Arbeit einige Begriffe neu eingeführt werden oder deren Bedeutung in den richtigen Kontext gesetzt werden müssen, werden in Kapitel 4 einige Definitionen aufgeführt. Aufbauend auf dem in Kapitel 5 beschriebenen Zielsystem der zu entwickelnden Methode wird diese in Kapitel 6 initial entwickelt. Nach der initialen Anwendung einiger Teilmethoden in Kapitel 7 und einem damit einhergehenden Zwischenfazit, wird die Methode in Kapitel 8 weiterentwickelt. Die weiterentwickelte Methode wird in Kapitel 9 nochmals angewendet, woraufhin ein abschließendes Fazit gezogen wird. Abschließend werden in Kapitel 10 die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte an die Arbeit gegeben.

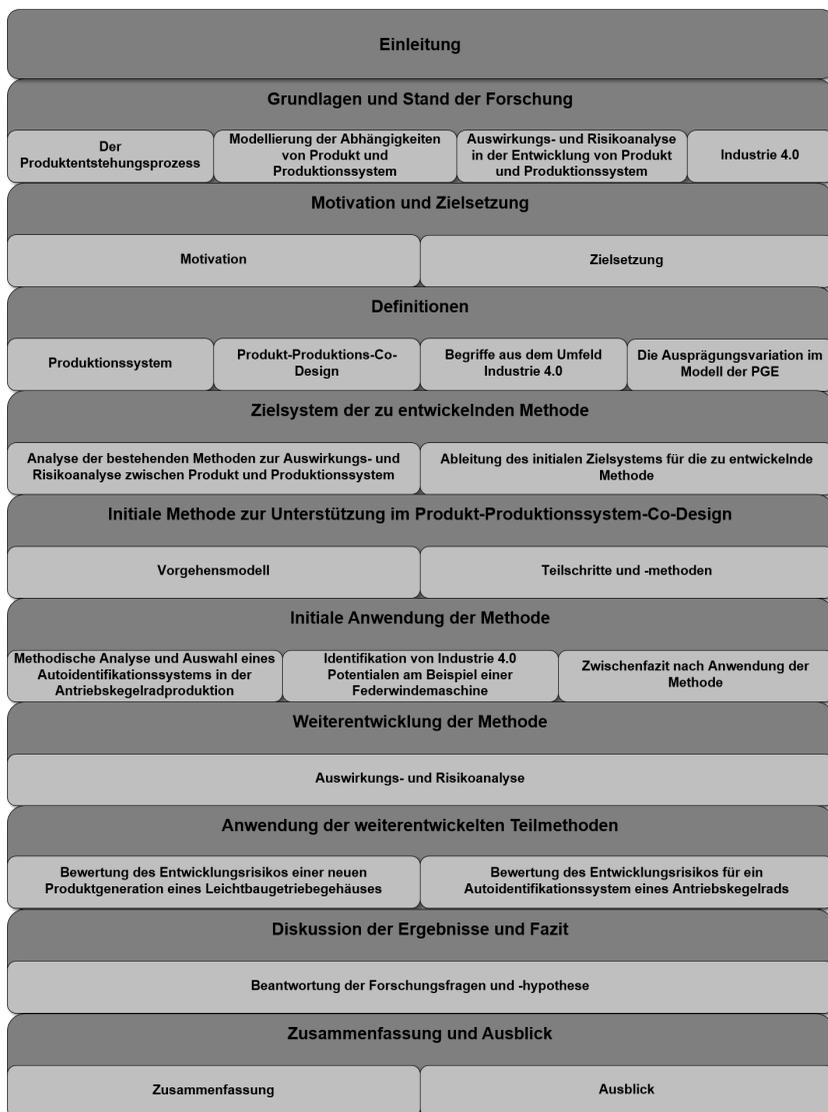


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit



## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der Stand der Forschung erläutert, der entweder für das Verständnis der Arbeit wichtig sind, aus dem die Motivation abgeleitet wird oder Methoden die im Rahmen der Arbeit genutzt oder weiterentwickelt werden und die zum Aufzeigen des Forschungsbedarfs beziehungsweise der Abgrenzung von diesem dienen.

### 2.1 Der Produktentstehungsprozess

Für das Verständnis dieser Arbeit wird zu Beginn der Produktentstehungsprozess samt seinen Herausforderungen sowie Methoden und Modellen vorgestellt, um diesen effizient zu gestalten. Unter der Vielzahl an existierenden Methoden und Modellen, um den Produktentstehungsprozess zu beschreiben und zu unterstützen, werden im Folgenden nur einige genannt, die zum Verständnis der Arbeit dienen oder auf deren Elementen aufgebaut wird. Dies betrifft insbesondere Bausteine der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro). Albers und Gausemeier (2012) definieren den Produktentstehungsprozess wie folgt:

*„Die Produktentstehung ist Teil des Produktlebenszyklus und beschreibt den grundsätzlichen Ablauf von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf [...]. Sie umfasst die drei Hauptaufgabenbereiche strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung. Der eigentlichen Produktentwicklung ist also die systematische Erarbeitung des „Entwicklungsauftrags“ vorangestellt. Die Produktionssystementwicklung erfolgt parallel zur Produktentwicklung; sie beinhaltet die Aufgabenbereiche Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Arbeitsmittelpassung und Produktionslogistik (insbesondere Materialflussplanung).“*

Hier wird deutlich, dass die Produktentwicklung und die Produktionssystementwicklung parallele und voneinander abhängige Prozesse sind. So müssen diese eng miteinander abgestimmt werden, um ein möglichst leistungsfähiges und kostengünstiges Produkt entwickeln zu können (Gausemeier et al., 2007, S. 40).

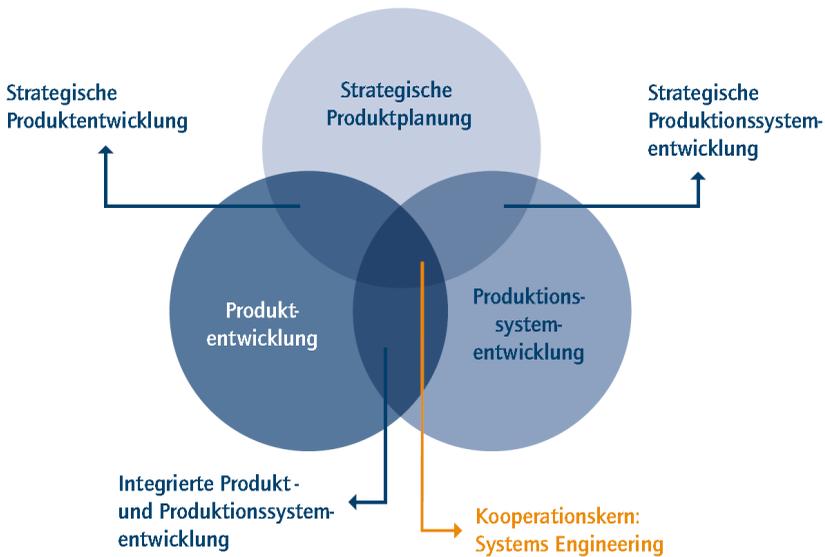


Abbildung 2.1: Darstellung des integrierten Produktentstehungsprozesses nach Albers und Gausemeier (2012)

### 2.1.1 Herausforderungen im Produktentstehungsprozess

Aktuelle Trends und Entwicklungen im Produktentstehungsprozess bringen große Herausforderungen für Produkt- und Produktionssystementwickler mit sich. Diese werden nachfolgend erläutert, was zur späteren Ableitung des Forschungsbedarfs dient.

Beihoff et al. (2014) stellen fest, dass die Forderung von Kunden und anderen Stakeholdern nach einem immer größeren Funktionsumfang in Systemen bei gleichzeitig steigenden Qualitätsanforderungen, höherer Zuverlässigkeit, kürzeren Produktlebenszyklen und attraktiven Preisen die Komplexität und Vernetzung verschiedener Systeme erhöht.

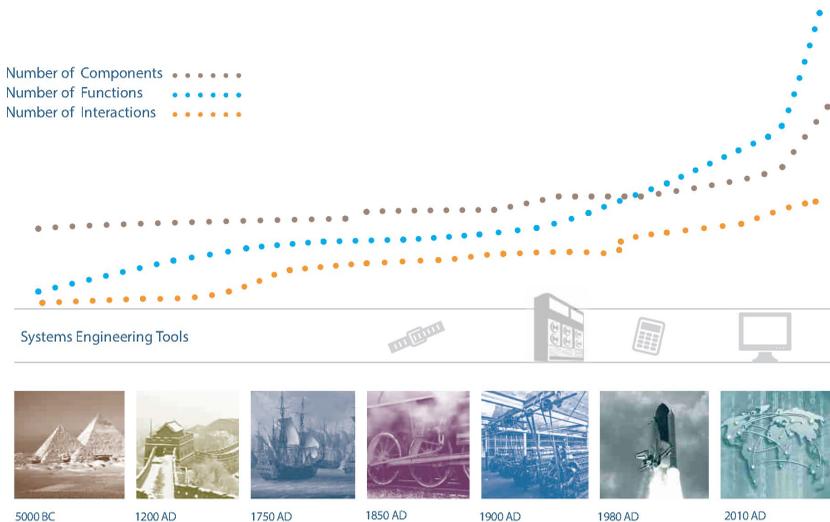


Abbildung 2.2: Qualitative Darstellung der Entwicklung der Anzahl an Komponenten, Funktionen und Interaktionen in und zwischen Systemen (Beihoff et al., 2014). Insbesondere im Zuge der Industrialisierung, Mechanisierung und Digitalisierung bzw. Vernetzung steigt die Anzahl an Interaktionen, Funktionen und Komponenten stark an.

Dies wird in Abbildung 2.2 durch die steigende Anzahl an Komponenten, Funktionen und Interaktionen von Systemen in der Menschheitsgeschichte deutlich. Diese Komplexität steigt seit der Einführung des Computers und besonders durch die Vernetzung von Systemen und damit notwendigen mechatronischen Systemen in den letzten Jahren sprunghaft an.

Komplexe Systeme erschweren für Produkt- und Produktionssystementwickler eine frühzeitige Entdeckung von Fehlern (Eckert et al., 2004). Die „Rule of Ten“ besagt, dass die Kosten zur Behebung eines Fehlers in jeder Entwicklungsphase um den Faktor 10 steigen, weshalb Unsicherheiten im Entwicklungsprozess möglichst frühzeitig ausgeräumt werden sollten (Reinhart et al., 1996, S. 49). Korrekturen von Fehlern führen damit in späteren Entwicklungsphasen zu einem hohen Aufwand und erheblichen Kosten (Albers & Braun, 2011, S. 9). Während der Entwicklung und Konstruktion eines Produkts werden durch die Festlegung der Gestalt, des Materials und der notwendigen Fertigungsprozesse über 70% der Produktgesamtkosten definiert, obwohl in dieser Phase selbst nur ein sehr geringer Anteil der Gesamtkosten entstehen (Verein deutscher Ingenieure, 1987). Somit entstehen während der Konstruktion eines Produkt 80% der Fehler, jedoch werden 70% der auftretenden Fehler

erst in der Produktion oder der Validierung des Prototyps entdeckt. Zur Vermeidung von Fehlern und der Reduktion von Unsicherheiten ist in den frühen Phasen der Produktentwicklung somit der Einsatz unterstützender Methoden sinnvoll. (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 168–173)

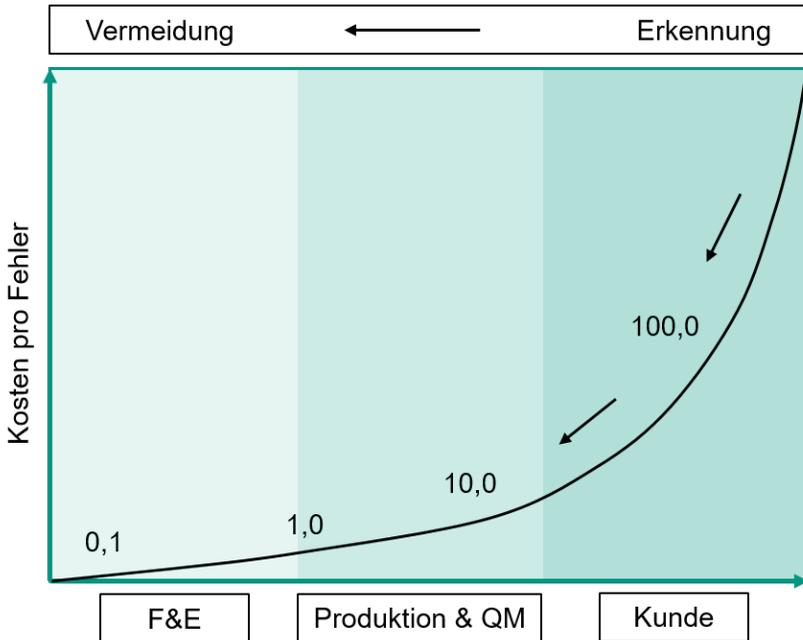


Abbildung 2.3: Rule of Ten – Die Kosten pro Fehler in der Produktentstehung steigen je nach Entdeckungszeitpunkt stark an. (Darstellung von Jost, 2019<sup>1</sup> in Anlehnung an Reinhart et al., 1996, S. 49). Abkürzungen: F&E: Forschung und Entwicklung; QM: Qualitätsmanagement

---

<sup>1</sup> Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

## 2.1.2 iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Für ein tieferes Verständnis der Produktentstehung und als Unterstützung für Produktentwickler existieren zu dessen Beschreibung diverse Prozessmodelle. Neben der eigentlichen Entwicklung des Produkts umfasst die Produktentstehung die Entwicklung des Produktionssystems mit seinen Produktionsprozessen sowie alle anderen Aktivitäten während des Produktlebenszyklus, wie z.B. den Verkauf oder den Abbau, die einen großen Einfluss auf die Produktentwicklung haben (Albers, 2010). Die meisten Modellierungsansätze konzentrieren sich nur auf bestimmte Aspekte, berücksichtigen aber nicht die Interaktion zwischen Aktivitäten, Anforderungen, Ergebnissen und Methoden. Mit dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) existiert ein ganzheitlicher Ansatz, der die Lücke zwischen Prozessmanagement und Produktentwicklung schließt (Albers et al., 2010). Albers und Meboldt (2007) entwickelten das iPeM, welches von Albers, Reiß et al. (2016) weiterentwickelt wurde um nicht nur die Entwicklung einer Produktgeneration abbilden zu können, sondern auch die Entwicklung zukünftiger Produktgenerationen sowie die Entwicklung des Validierungssystems, des Produktionssystems und der damit verbundenen Strategie.

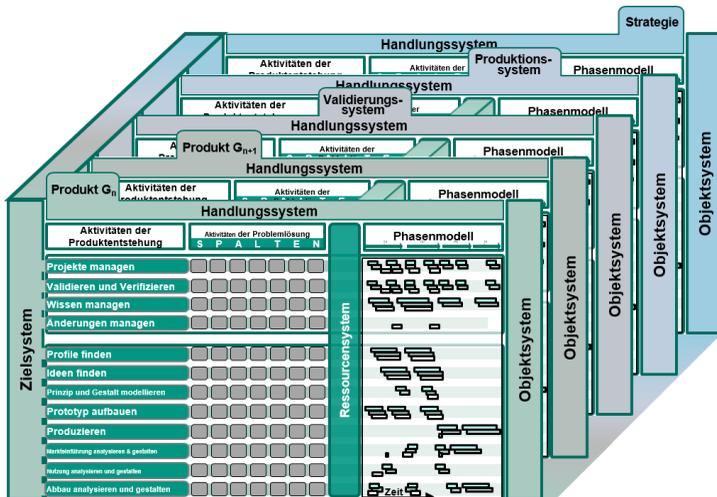


Abbildung 2.4: Das iPeM - integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der Produktgenerations-, Produktionssystem-, Validierungssystem- und Strategieentwicklung (Albers, Reiß et al., 2016)

Grundlage des iPeM bildet der Ansatz der Systemtheorie nach Ropohl (1975), in dem das Zielsystem über ein Handlungssystem in ein Sach- bzw. Objektsystem überführt wird. Das Handlungssystem beinhaltet Aktivitäten der Produktentstehung, Aktivitäten der Problemlösung, dem Ressourcensystem und dem Phasenmodell. Die grundlegenden Aktivitäten der Produktentstehung von Albers (2010) werden durch Basisaktivitäten, welche parallel zu allen anderen Aktivitäten verlaufen, ergänzt (Albers, Reiß et al., 2016).

Basisaktivitäten, nach Albers, Reiß et al. (2016), sind:

- Projekte managen,
- Validieren und Verifizieren,
- Wissen managen,
- Änderungen managen.

Kernaktivitäten der Produktentstehung, basierend auf Albers (2010), sind:

- Profile finden,
- Ideen finden,
- Prinzip und Gestalt modellieren,
- Prototyp aufbauen,
- Produzieren,
- Markteinführung analysieren und gestalten,
- Nutzung analysieren und gestalten,
- Abbau analysieren und gestalten.

Die Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Produktionssystem werden im iPeM deutlich. Die Kernaktivität „Produzieren“ beschreibt Reiß (2018) wie folgt:

*„Tätigkeiten zur Realisierung des Produkts: Die Aktivität gliedert sich in die zielgerichtete Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte (Output).“*

Es handelt sich dabei also um die Realisierung des Produkts durch das Produktionssystem, welches sich im Ressourcensystem der in Entwicklung befindlichen Produktgeneration befindet. Damit steht das Produktionssystem in den Aktivitäten der Produktentwicklung in Wechselwirkung mit dem Produkt. Des Weiteren ist im iPeM die Ebene Produktionssystem beschrieben, welche über Ziel- und Ressourcensystem mit der Entwicklung der aktuellen und nächsten Produktgeneration verbunden ist. Bei der Entwicklung einer Produktgeneration und des zugehörigen Produktionssystems sind also Abhängigkeiten und Wechselwirkungen vorhanden.

### 2.1.3 Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Albers et al. (2014) stellten in einer empirischen Studie mit Teilnehmern aus Unternehmen unterschiedlicher Größe und Branchen fest, dass über 80% der Produkte in Generationen entwickelt werden. Das Modell der PGE gilt auch für Produkte, für die es keine direkte Vorgängergeneration gibt, da auch hier existierende Konzepte und Lösungen für Subsysteme existieren (Albers, Bursac & Wintergerst). Nach Albers, Rapp et al. (2019) existieren zu einem in Entwicklung befindlichen Produkt nicht nur Referenzprodukte, sondern ein ganzes Referenzsystem. Sie definieren dieses wie folgt:

*“The reference system for the development of a new product generation is a system whose elements originate from already existing or already planned socio-technical systems and the associated documentation and are the basis and starting point for the development of the new product generation.”*

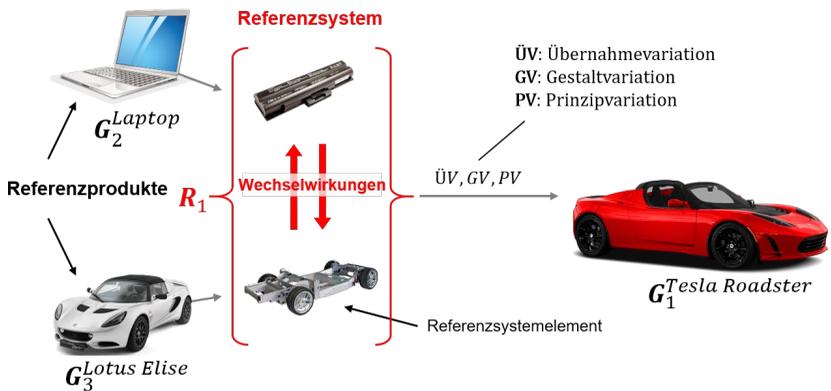


Abbildung 2.5: Modell der PGE mit Darstellung des Referenzsystems am Beispiel des Tesla Roadsters. Das Fahrwerk muss an den veränderten Massenschwerpunkt durch das Batteriesystem angepasst werden, das durch den angepassten Einsatzort eine andere Betriebsstrategie aufweist. (Albers, Rapp et al., 2019)

Das Referenzsystem besteht also aus bereits existierenden sozio-technischen Systemen und deren Dokumentation. Damit wird deutlich, dass sowohl Referenzprodukte, als auch existierende Produktionssysteme wichtige Elemente des Referenzsystems in der Produktgenerationsentwicklung sind.

Auch Systeme, die nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit einer Produktgeneration stehen, spielen im Produktentstehungsprozess eine wichtige Rolle. Mit Hilfe des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung, lassen sich auch diese Entwicklungspfade abbilden. (Albers, Kürten et al.; Albers & Rapp, 2021) Albers, Bursac und Wintergerst beschreiben eine in Entwicklung befindliche Produktgeneration  $G_n$  nach dem Modell der PGE wie folgt:

*„Nach diesem Modell setzt sich eine neue Produktgeneration ( $G_n$ ) zusammen aus: Einer Menge von Teilsystemen (TS), die bei möglichst geringen Anpassungen übernommen werden (ÜS); einer Menge von neuentwickelten TS durch Gestaltvariation (GS) und einer Menge von neuentwickelten TS durch Prinzipvariation (PS).“*

Teilsysteme werden also entweder unter möglichst kleinen Anpassungen übernommen oder erfahren Neuentwicklungen in Form von Gestalt- oder Prinzipvariation. Diese drei Variationsarten werden nach Albers, Bursac und Wintergerst nachfolgend erläutert und mathematisch beschrieben:

Bei einer **Übernahmevariation (ÜV)** werden Teilsysteme in Gänze übernommen oder dabei nur an Bauteilschnittstellen bzw. Connectoren<sup>2</sup> leicht konstruktiv angepasst um den Anforderungen der Systemintegration gerecht zu werden.

Eine Neuentwicklung durch **Gestaltvariation (GV)** ist durch die Übernahme eines Lösungsprinzips aus dem Referenzsystem charakterisiert, bei dem die funktionsbestimmenden Eigenschaften jedoch zur Optimierung der Leistung und Qualität der in Entwicklung befindlichen Produktgeneration  $G_n$  variiert werden.

---

<sup>2</sup> Eines der Grundelemente des C&C<sup>2</sup>-A, der in Kapitel 2.2.1.3 beschrieben wird

Die **Prinzipvariation (PV)** beschreibt eine Neuentwicklung eines Teilsystems, bei der ähnliche Funktionen und Eigenschaften durch ein anderes Lösungsprinzip umgesetzt werden.

$$\dot{U}S_n\{TS|\dot{U}V_{(TS)}\}; GS_n\{TS|GV_{(TS)}\}; PS_n\{TS|PV_{(TS)}\} \quad 2.1$$

Damit gilt:

$$G_n = \dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n \quad 2.2$$

Durch den Bezug einer dieser drei Teilmengen auf die Gesamtheit aller Teilsysteme, lässt sich der Anteil der Variationsart bestimmen, die dieser Teilmenge zugrunde liegt. So ergibt sich der Übernahmevariationsanteil  $\delta_{\dot{U}V,n}$  als Summe aller TS, die übernommen werden, durch die Summe aller TS einer neuen Produktgeneration. Analog verhält sich dies für die Anteile an GV und PV. (Albers, Bursac & Rapp, 2017)

$$\delta_{\dot{U}V,n} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|G_n|} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 2.3$$

$$\delta_{GV,n} = \frac{|GS_n|}{|G_n|} = \frac{|GS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 2.4$$

$$\delta_{PV,n} = \frac{|PS_n|}{|G_n|} = \frac{|PS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 2.5$$

Bei einer retrospektiven Analyse zweier Anwendungsfälle (Prüfkopf eines Prüfstands für Kupplungsversuche und Aktor eines Maschinenwerkzeugs) zeigte sich, dass die jeweiligen Variationsanteile von verschiedenen Faktoren abhängen. So zeigte sich etwa, dass bei einem weniger detaillierten Modell in beiden Anwendungsfällen der Anteil an PV sank. Außerdem können bei neuen Elementen unterschiedliche Variationsarten angenommen werden, je nachdem welche Referenzelemente betrachtet werden. (Rapp et al., 2020)

### 2.1.3.1 Die Ausprägungsvariation in der Systemgenerationsentwicklung

In Kapitel 2.1.3 sind die geltenden Definitionen für ÜV, GV und PV im Modell der PGE definiert. Diese Definitionen sind weiterhin gültig, jedoch wurde bei der Betrachtung von Referenzsystemen deutlich, dass der Begriff der Gestaltvariation in der Betrachtung verschiedener Systemarten und –sichten, wie Funktionen und Eigenschaften, nicht immer zielführend ist. Aus diesem Grund definieren Albers et al. (2020) die **Ausprägungsvariation (AV)**, welche wie die ÜV und die PV etwa auch zur Beschreibung von Variationen von Produkteigenschaften, Simulationsmodellen und Produktionssystem geeignet ist und eine Generalisierung der PV darstellt.

*„Ausprägungsvariation (AV): Die Verknüpfung der Elemente im Referenzsystem wird bei der neuen Systemgeneration beibehalten. Das Lösungsprinzip bleibt also im Vergleich zum Referenzsystem unverändert. Allerdings wird die Ausprägung der Elemente variiert.“*

Bezogen auf die Gestalt mechatronischer Systeme kann die AV nach wie vor als GV bezeichnet werden. Die Elemente einer Gestalt bleiben erhalten, jedoch wird deren Ausprägung variiert.

### 2.1.4 Simultaneous Engineering

Albers, Basedow et al. identifizieren in einer Studie zu Herausforderungen bei der Entwicklung von smarten Produktionsmaschinen mit acht Experten aus der Industrie in den Bereichen Hersteller, Kunde und Anwender unter anderem die steigende Komplexität und Individualisierung und die Notwendigkeit der Integration mehrerer Disziplinen in den Entwicklungsprozess als große Herausforderungen. Aus Kundensicht ist eine Schlüsselherausforderung außerdem die Identifikation der richtigen Services und Merkmale smarterer Produktionsmaschinen.

Um die Herausforderungen im Produktentstehungsprozess mit gleichzeitiger Betrachtung des zugehörigen Produktionssystems und des Validierungssystems zu bewältigen, wurde der Ansatz des Simultaneous Engineering entwickelt. Dies ist ein bekannter Ansatz in der Produktentwicklung, um Entwicklungszeit und Produktkosten zu reduzieren und die Produktqualität, unter Einbeziehung des Produktionssystems, des Validierungssystems und des Vertriebs zu erhöhen (Albers, 1994; Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 275; Frankenberger et al., 1998). Eine Definition des Simultaneous Engineering liefert Albers (1994):

*„Simultaneous Engineering ist eine Organisationsstrategie, die eine Senkung der Produktentwicklungszeiten und Kosten bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität des Produktes und der Produktionseinrichtungen durch systematische Verbesserung der Zusammenarbeit der internen Funktionsbereiche Entwicklung, Produktionsplanung, Produktion und Administration und der Zusammenarbeit mit den Entwicklungs- und Produktionsbereichen der Kunden, der Zulieferer des Zulieferers sowie der Produktionsmittelhersteller verfolgt, mit dem Ziel, die Abläufe weitestgehend zu parallelisieren und die zeitgleiche Entwicklung und Erstellung von Produkt und Produktionsmittel sicherzustellen.“*

Eine Studie des Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO mit 661 Mitarbeitern unterschiedlicher Positionen aus Unternehmen verschiedener Branchen zeigt, dass knapp 76 % der Befragten der Meinung sind, dass Erfahrungen aus der Produktion schneller in die Produktentwicklung zurückgeführt werden muss, als es bisher der Fall ist (Ganschar et al., 2013). Dass die Umsetzung von Simultaneous Engineering in Unternehmen herausfordernd ist, zeigt eine Studie von Kinkel und Som (2007) unter 1700 Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes: Demnach geben nur 39 % der befragten Maschinenbauunternehmen an, Simultaneous Engineering zu nutzen. Nur 10 % nutzen es stark, wohingegen 29 % nur eine mittlere oder geringe Nutzung angeben.

Dabei beschreibt Albers (1994) einige organisatorische Maßnahmen um Simultaneous Engineering erfolgreich umzusetzen. Eine davon ist der sinnvolle Einsatz von Methoden im Produktentstehungsprozess. Diese wurde beispielsweise für Kreativitätstechniken zur Ideenfindung spezifiziert, nicht jedoch für die gleichzeitige Entwicklung des Produktionssystems. Auch Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 290) beschreiben einige Methoden, die jedoch auch einen produktbezogenen Schwerpunkt aufweisen und nicht die Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung adressieren und das PPCD vereinfachen.

### **2.1.5 Produkt-Produktions-CoDesign**

Um diese Lücke zu adressieren, definierten Albers, Rapp et al. (2022) nach Albers, Lanza et al. (2022) das Produkt-Produktions-CoDesign (PPCD) wie folgt:

*„Der neue Ansatz des Produkt-Produktions-CoDesign (PPCD) beschreibt die hoch vernetzte und parallelisierte Entstehung, d.h. Planung, Entwicklung und Realisie-*

... von Produkten und deren Produktionssystem(en) sowie der Gestaltung zugehöriger Geschäftsmodelle. Das PPCD berücksichtigt den effizienten und effektiven Betrieb der Produktion sowie der strukturierten Außerbetriebnahme der Produkte und Produktionssysteme. Die Planung erfolgt dabei zwingend über mehrere Produktgenerationen und die zugehörige Produktionssystemevolution hinweg.“

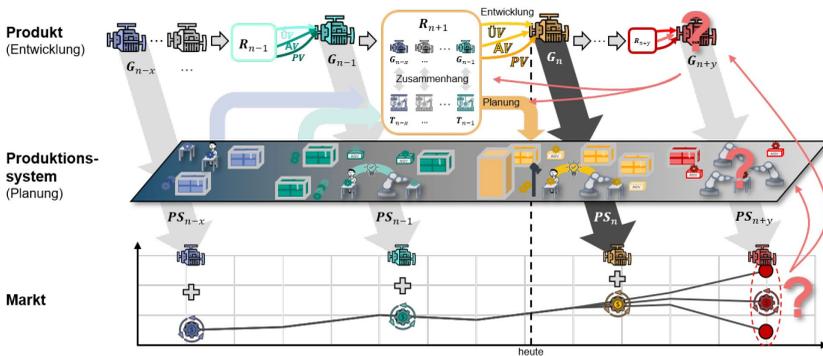


Abbildung 2.6: Visualisierung grundlegender Aspekte des PPCD. In der PGE werden Elemente des Referenzsystems unter Berücksichtigung der Evolution des Produktionssystems verwendet. Dabei muss auch der Markt mit seinen Anforderungen und die zugehörigen Geschäftsmodelle berücksichtigt werden. (Albers, Rapp et al., 2022)

Da Produkte in Generationen entwickelt werden und die Evolution von Produktionssystemen ganzheitlich betrachtet werden muss, werden geeignete Methoden und Werkzeuge benötigt, um die systematische Wiederverwendung von produkt- und produktionssystembezogenem Wissen und deren Abhängigkeiten zu unterstützen. Dabei ist die Berücksichtigung nicht nur einer, sondern aller vorangegangenen Produktgenerationen und Produktionssysteme entscheidend. Es gilt, die Produkt- und Produktionsplanung an den Anforderungen des Marktes zu orientieren auszurichten und geeignete Geschäftsmodelle zu entwickeln. Entscheidend ist, dass Flexibilität und Grenzen von Produkten und Produktionssystemen konsequent definiert werden, damit die vorgesehenen Anpassungen des Produktes - soweit möglich - durch Anpassungen des entsprechenden Produktionssystems zu realisieren sind. (Albers, Lanza et al., 2022) Diese Herausforderung und der Bedarf an Methoden für die integrierte Entwicklung im PPCD werden beispielhaft an der agilen Produktion elektrischer Traktionsmotoren beschrieben. Demnach werden produktionsbezogene Schwächen im Stator design häufig erst in der Prototypenphase des Produktionssystems entdeckt. (Fleischer et al., 2021; Fleischer, Doppelbauer et al., 2022)

## **2.2 Modellierung der Abhängigkeiten von Produkt und Produktionssystem**

Die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen der in Entwicklung befindlichen Produktgeneration und dem Produktionssystem, mit dem diese umgesetzt werden soll, ist ein elementarer Bestandteil des PPCD. In den folgenden Unterkapiteln werden daher bekannte Methoden und Ansätze beschrieben, mit deren Hilfe Informationen und Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Domänen Produkt und Produktionssystem modelliert werden können.

### **2.2.1 Modellierung und Erfassung von Informationen eines Produkts**

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden die Eigenschaften von Produktfunktionen und der Produktgestalt beschrieben, deren Zusammenhänge mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz modelliert werden können. Die Produktgestalt wird direkt durch das Produktionssystem realisiert und führt somit zur gewünschten Funktion.

#### **2.2.1.1 Eigenschaften von Produktfunktionen**

Um zum Verständnis beizutragen, was Funktionen sind und durch welche Attribute und Eigenschaften man diese beschreiben kann, wird in diesem Unterkapitel in Kürze die systemtheoretische Betrachtung von Funktionen erläutert.

Albers und Matthiesen (2002) beschreiben, dass ein Produkt die vom Kunden gewünschten Produkteigenschaften und damit die verbundenen Funktionen erfüllen muss.

*„Die Funktionen eines technischen Produkts spielen also die zentrale Rolle in der Produktentwicklung.“*

Funktionen werden in Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden, die jeweils wiederum in Teil- und Elementarfunktionen unterteilt werden können. Ein Produkt erfüllt dabei mindestens eine Hauptfunktion, kann aber sowohl mehrere Haupt-, als auch Teilfunktionen erfüllen. (Verein deutscher Ingenieure, 1996) In der systemtheoretischen Betrachtung überführen Funktionen Eingangs- zu Ausgangsgrößen. Hiervon werden drei relevante Grundarten benannt: Materie bzw. Stoff, Energie und Signal bzw. Information. (Pahl et al., 2007, 41 ff.; Ropohl, 1975)

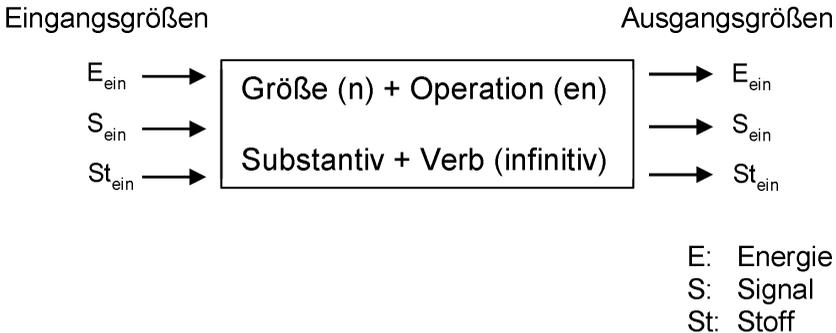


Abbildung 2.7: Black-Box Darstellung eines Systems, in dem durch eine oder mehrere Funktionen Energie, Stoff und Signal als Eingangs- zu Ausgangsgrößen überführt werden (nach Pahl et al., 2007, S. 43)

Neben der Beschreibung, welche Energie, Stoff und Informationen durch Funktionen übertragen oder auch transformiert werden, können Funktionen durch das Prinzip beschrieben werden, durch das sie erfüllt werden - etwa physikalische und chemische Prinzipien (Pahl et al., 2007, 52 ff.). Dies hilft dem Produktentwickler, über die richtige Prinziplösung für die geforderte Funktionalität nachzudenken.

### 2.2.1.2 Eigenschaften der Produktgestalt

Wie die Funktionen des Produkts kann auch die Produktgestalt beschrieben werden, die diese Funktionen erfüllt. Die Produktgestalt ergibt sich aus der strukturierten Anordnung derer Baugruppen und Komponenten (Krause et al., 2012). Vajna et al. (2009) beschreiben, dass die Merkmale eines Produkts dessen Gestalt erfassen, wozu die räumliche Anordnung, Struktur und geometrische Formen, Oberflächenbeschaffenheiten etc. aber auch Materialien gehören. Diese müssen vom Produktentwickler direkt beeinflusst werden können. Produkteigenschaften beschreiben, wie sich diese Merkmale auf das Verhalten des Produkts auswirken, beispielsweise auf Funktionen, Herstellkosten und vieles mehr. (Vajna et al., 2009) In dieser Arbeit werden Produktmerkmale als Konstruktionsmerkmale wie Löcher, Phasen, bearbeitete Oberflächen etc. verstanden.

Zur Erfassung aller Produktmerkmale wird bei Bedarf im ersten Schritt die Erstellung einer sogenannten Erzeugnisgliederung vollzogen, die als eine Aufteilung in kleinere Einheiten verstanden wird (Pahl et al., 2007, S. 553–554).

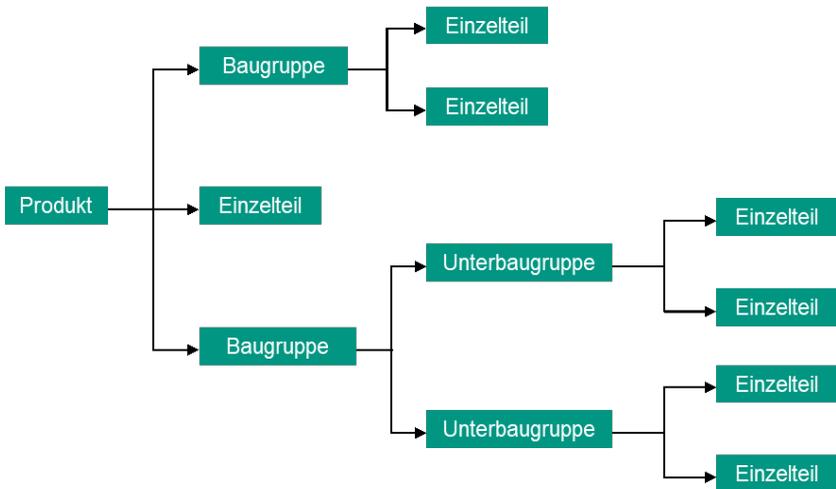


Abbildung 2.8: Beispielhafte Erzeugnisgliederung (Darstellung von Wang, 2018 nach Pahl et al., 2007)

### 2.2.1.3 Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz

Um in dieser Arbeit die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem modellieren zu können, ist vorgelagert eine Modellierung der Zusammenhänge unterschiedlicher Eigenschaften innerhalb des Produkts notwendig. Der Fokus liegt hier auf der Modellierung der Zusammenhänge der Gestalt eines Produkts und den Funktionen, die durch diese Gestaltelemente erfüllt werden.

Der am IPEK entwickelte Contact Channel & Connector-Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A) dient der Analyse von Gestalt-Funktions-Zusammenhängen (GFZ). Somit lassen sich Gestaltelemente Funktionen zuordnen, zu deren Erfüllung diese beitragen sollen. Matthiesen (2021) beschreibt den C&C<sup>2</sup>-A wie folgt:

*„Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz ist ein Denkzeug, also ein Werkzeug zur Unterstützung und Strukturierung des Denkens während der Gestaltung eines Produkts. Er ist das Metamodell, mit dem konkrete C&C<sup>2</sup>-Modelle zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion von existierenden oder zu entwickelnden Produkten gebildet werden können.“*

Der C&C<sup>2</sup>-A eignet sich damit sowohl zur Analyse bereits bestehender Produkte als auch als Werkzeug zur Entwicklung einer neuen Produktgeneration. Der C&C<sup>2</sup>-A

besteht aus drei Grundelementen, mit denen die Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion beschrieben werden können: Wirkflächenpaare (WFP), Leitstützstrukturen (LSS) und Connectoren (C).

WFP entstehen, wenn zwei beliebige Flächen von Festkörpern oder generalisierte Flächen von Flüssigkeiten, Gasen miteinander in Kontakt geraten und an einem Energie-, Stoff- oder Informationsfluss beteiligt sind. Diese WFP können auch nur temporär existieren. Die Wirkfläche (WF) ist eine solcher Flächen, welche dauerhaft oder temporär mit einer weiteren WF ein WFP bildet. (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2002)

LSS definieren Volumina von Festkörpern, Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die exakt zwei Wirkflächen miteinander verbinden und die Leitung von Energie, Material oder Stoff zwischen diesen ermöglichen (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2002).

Connectoren integrieren Effekte, die außerhalb des Gestaltungsraums liegen, das System, das mit dem C&C<sup>2</sup>-A modelliert wurde, jedoch beeinflussen. Connectoren haben eine repräsentative WF und stellen ein parametrisiertes Modell der relevanten Systemumgebung dar und sind somit Teil des Betrachtungsraums, nicht jedoch des Gestaltungsraums. (Albers & Wintergerst, 2014; Alink, 2010)

Die Grundhypothesen und weitere Neben- und Strukturelemente, welche in Abbildung 2.9 angedeutet sind, werden in diesem Abschnitt nicht näher beschrieben, da sie auf der Definition der Grundelemente WF, WFP, LSS und Connectoren basieren.

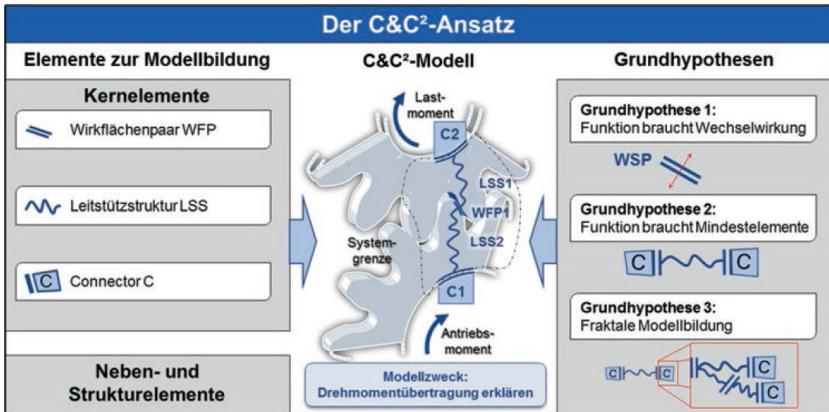


Abbildung 2.9: Übersicht über den C&C<sup>2</sup>-Ansatz mit dessen Elementen, Grundhypothesen und einem beispielhaften C&C<sup>2</sup>-Modell. (Darstellung von Matthiesen et al., 2020 nach Matthiesen et al., 2018)

## 2.2.2 Darstellungsformen von Abhängigkeiten und Auswirkungen (MDM & DSM)

Um die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem identifizieren und analysieren zu können, ist eine geeignete Modellierung notwendig. Zur Visualisierung von Wechselwirkungen werden insbesondere in der Produktentwicklung häufig matrixbasierte Ansätze verwendet (Maurer, 2007, 53f.). Hiermit kann die Komplexität von Systemen handhabbar gemacht und deren Wechselwirkungen übersichtlich dargestellt werden (Browning, 2001). Einige dieser matrixbasierten Ansätze werden im Folgenden vorgestellt.

### 2.2.2.1 Design Structure Matrix (DSM)

Die DSM ist ein Werkzeug zur Darstellung der Abhängigkeiten von Elementen einer Domäne in einem System. Dies unterstützt Entwicklungsteams, komplexe Zusammenhänge besser erkennen und verstehen zu können. (Browning, 2001) In einer quadratischen  $n \times n$ -Matrix werden die Abhängigkeiten von  $n$  Systemelementen dargestellt, indem die entsprechenden Zellen entweder markiert oder mit Gewichten versehen werden. Die Abhängigkeiten werden gerichtet dargestellt, das heißt in einer markierten Zelle wird das Element in der Zeile vom Element in der Spalte beeinflusst, nicht jedoch umgekehrt (Eppinger & Browning, 2012, S. 2ff.).

	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4
Element 1			X	
Element 2				
Element 3		X		X
Element 4	X			

Abbildung 2.10: DSM (nach Browning, 2001). Element 1 beeinflusst Element 4, Element 2 beeinflusst Element 3, Element 3 beeinflusst Element 1 und Element 4 beeinflusst Element 3.

Zur Auswertung der DSM kann der sogenannte Kritikalitätswert herangezogen werden. Dieser errechnet sich aus dem Produkt der Aktiv- und Passivsumme, welche sich aus den Summen der Einträge in den Spalten und den Zeilen ergeben. (Maurer, 2007, S. 125)

### 2.2.2.2 Domain Mapping Matrix (DMM)

In einer DSM werden nur die Abhängigkeiten innerhalb einer Domäne abgebildet. Um die Abhängigkeiten zwischen zweier Domänen abzubilden, müssen deren DSM erstellt und miteinander verknüpft werden. (Eppinger & Browning, 2012, S. 237) Eine Domäne A mit  $i$  Elementen kann mit einer anderen Domäne B mit  $j$  Elementen verknüpft werden. Somit entsteht eine DMM  $(i,j)$ , in der die Wechselwirkungen zwischen den beiden Domänen dargestellt werden.

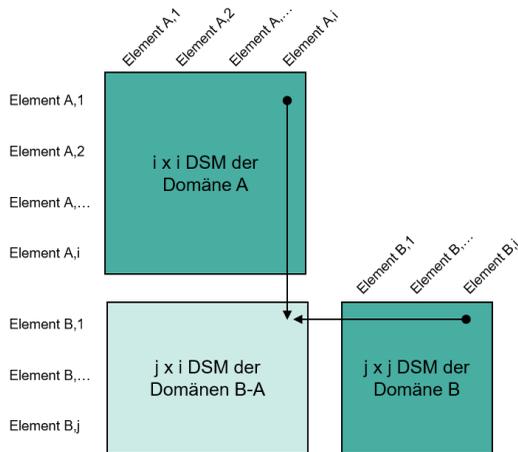


Abbildung 2.11: DMM aus den DSM der Domänen A und B (nach Eppinger & Browning, 2012, S. 237)

### 2.2.2.3 Multi-Domain Matrix (MDM)

Durch eine MDM können DSM und DMM miteinander verknüpft und eine beliebige Anzahl an Domänen betrachtet werden. Somit können Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den einzelnen Domänen modelliert werden. Der Informationsgehalt einer MDM steigt mit jeder zusätzlichen Domäne, was deren Erstellungs- und Verwaltungsaufwand erhöht. (Eppinger & Browning, 2012, S. 240ff.)

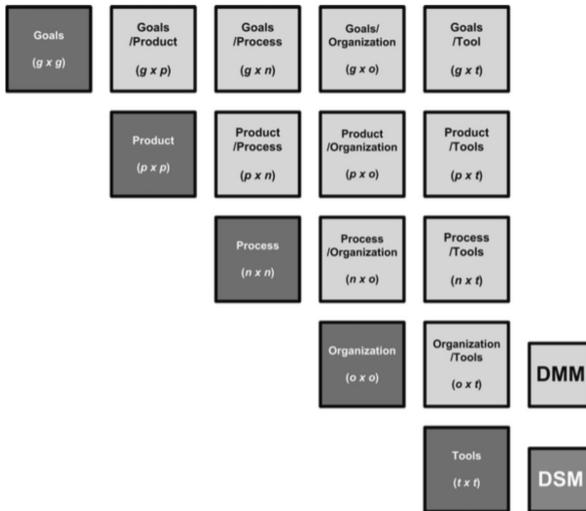
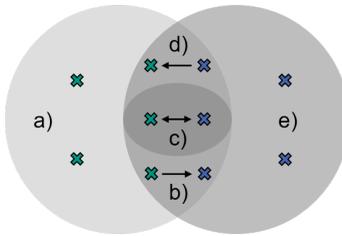


Abbildung 2.12: MDM, bestehend aus den DSM der Domänen Ziele, Produkt, Prozess, Organisation und Werkzeuge, sowie deren DMM (Danilovic & Browning, 2007).

### 2.3 Auswirkungen- und Risikoanalyse in der Entwicklung von Produkt und Produktionssystem

Nach Specht et al. (2002, S. 24 ff) bringt ein hoher Neuheitsgrad eine erhöhte Komplexität mit sich und führt damit zu einem höheren Entwicklungsrisiko. In diesem Abschnitt werden Methoden zur Analyse und Bewertung dieses Risikos beschrieben.

Steimer und Aurich (2016) untersuchen in welchen Phasen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung (PSE) Informationen zwischen den Domänen Produkt und Produktionssystem ausgetauscht werden und damit Wechselwirkungen bestehen. Hierbei entwickeln sie, die in Abbildung 2.13 gezeigten, fünf Kategorien. Diese Kategorien können die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem erleichtern und den Modellierungsaufwand reduzieren.



	Klasse	Beispiel
a)	Prozessinterne Informationen der PE, die nur das Produkt betreffen	PE: Die Hauptfunktionen des Produkts sind kühlen und erhitzen
b)	Informationen über das Produkt, die das PS beeinflussen	PE: Funktionsflächen müssen härter als andere Flächen sein
c)	Informationen über das P & PS, die direkt voneinander abhängen	Produktvarianten führen zu alternat. Fertigungstechnologien
d)	Informationen über das PS, die das Produkt beeinflussen	Massenproduktion, die eine gussgerechte Gestaltung erfordert
e)	Prozessinterne Informationen der PSE, die nur das PS betreffen	Ein Schleifprozess ist dem Drehprozess nachgelagert

Abbildung 2.13: Klassifizierung der Informationsflüsse zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung nach ihrer Nutzung innerhalb der beiden Disziplinen nach Steimer und Aurich (2016)

### 2.3.1 Abhängigkeitsmatrizen von Produkt-Subsystemen zur Risikobewertung

Clarkson et al. (2001) entwickelten eine Methode zur Vorhersage der Ausbreitung von Änderungen in komplexen Produkten. Diese besteht, wie in Abbildung 2.14 zu sehen ist, aus drei Hauptschritten: Der initialen Analyse, der Fallanalyse für eine Änderung des Produkts und der daraus resultierenden Neugestaltung des Produkts. Als Output der Methode steht eine Produktrisikomatrix und ein Fallrisikograph.

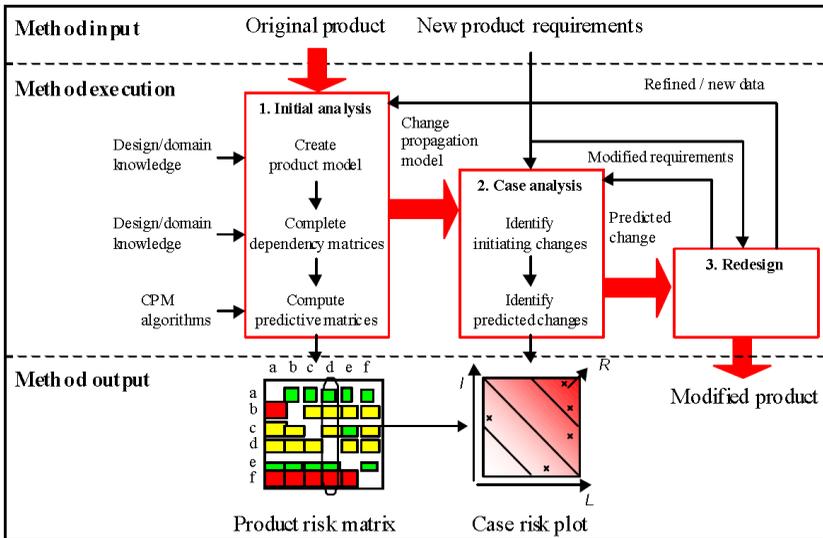


Abbildung 2.14: Methode zur Vorhersage von Änderungen (Clarkson et al., 2001)

Die initiale Analyse besteht aus der Erstellung eines Produktmodells, dem Ausfüllen von Abhängigkeitsmatrizen und der Berechnung von Vorhersagematrizen. Das Produktmodell sollte aus weniger als 50 Elementen bestehen, um die Modellierung nicht zu komplex werden zu lassen. Somit muss eine Balance zwischen Detaillierungsgrad und Modellierungsaufwand gefunden werden. Die Abhängigkeitsmatrix wird in Form einer DSM modelliert, in der Abhängigkeiten zwischen den Produktelementen gerichtet abgelesen werden können. Die Elemente in den Spalten sind auslösende, die in den Spalten betroffene Sub-Systeme. Aus dieser Abhängigkeitsmatrix werden DSM zur Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit und der direkten Auswirkung dieser Abhängigkeiten erstellt (siehe Abbildung 2.15). Die Wahrscheinlichkeits- und Auswirkungsmatrizen werden durch Erfahrungswerte vergangener Gestaltänderungen und durch die Erfahrung der Produkentwickler zwischen 0 und 1 bewertet. Das Risiko einer Änderungsausbreitung wird schließlich nach der Terminologie des Risikomanagements (UK Ministry of Defence, 1996) als das Produkt aus Wahrscheinlichkeit und Auswirkung berechnet. Als finaler Schritt der initialen Analyse folgt die Berechnung der Vorhersagematrizen. Dabei wird zwischen direkten Abhängigkeiten zweier Subsysteme und zwischen indirekten Abhängigkeiten von Subsystemen durch mindestens ein zwischenliegendes Subsystem unterschieden. Aus den Abhängigkeits- und Wahrscheinlichkeitsmatrizen, welche nur direkte Zusammenhänge darstellen, wird ein Baum zur Darstellung der Änderungsausbrei-

ung erstellt und schließlich aus der Kombination direkter und indirekter Auswirkungen und Wahrscheinlichkeiten das Risiko einzelner Subsysteme berechnet. (Clarkson et al., 2001)

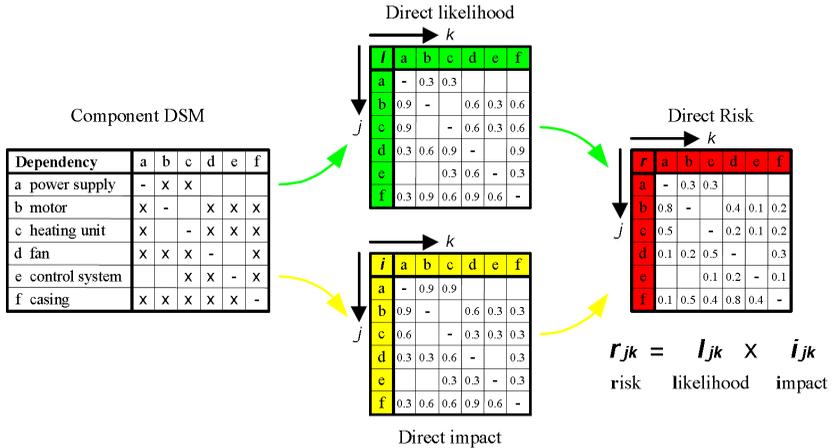


Abbildung 2.15: Direkte Abhängigkeits-, Wahrscheinlichkeits-, Auswirkungs- und Risikomatrizen einzelner Produktkomponenten (Clarkson et al., 2001)

### 2.3.2 Bewertung der Strukturrobustheit von Produktkonzepten

Gausemeier et al. (2012) modellieren nach Clarkson et al. (2001) die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem in den Aspekten Anforderungen, Funktionen und Bauteile. Dies zeigen sie am Beispiel eines Pedelecs, welches nach dem Modell der PGE in der KaSPro eine in Entwicklung befindliche Produktgeneration  $G_n$  darstellt. In dieser Quelle wird es jedoch als komplette Neuentwicklung bezeichnet, weshalb auch keine Referenzsystemelemente in der Modellierung berücksichtigt werden. Dabei werden auf Basis der MDM die Einflüsse der einzelnen Systemelemente, sowie deren Auftretenswahrscheinlichkeit ermittelt. (Gausemeier et al., 2012).

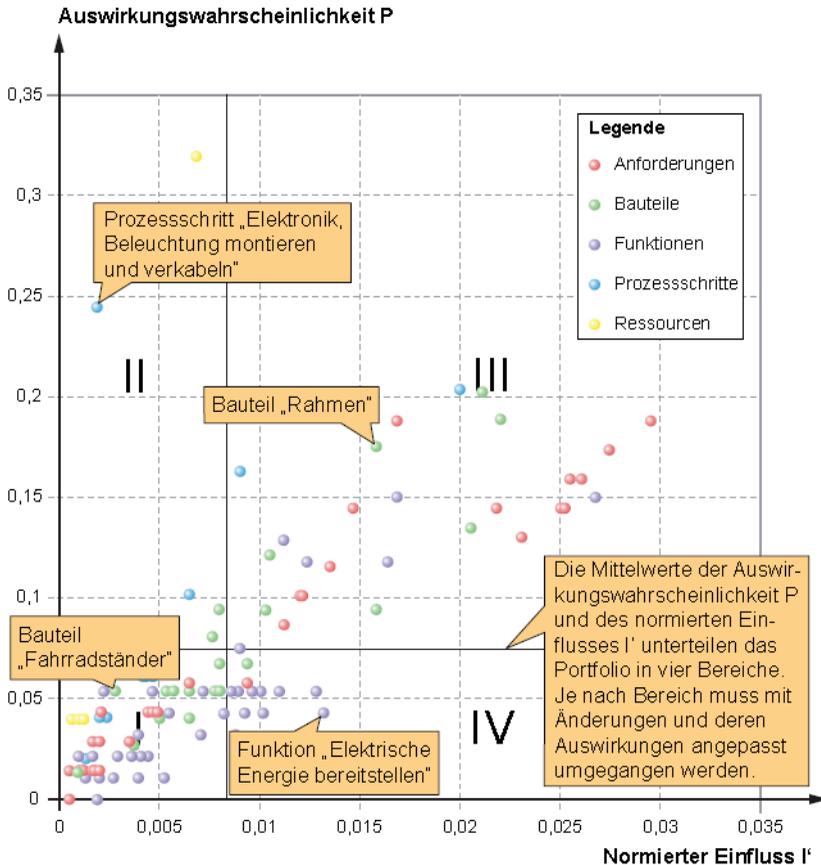


Abbildung 2.16: Kritische Elemente Portfolio zur Kategorisierung der Elemente eines Produktkonzepts basierend auf Auswirkungswahrscheinlichkeit und normiertem Einfluss (Gausemeier et al., 2012)

Ein Element hat hierbei immer  $n$  Eingänge  $E$  (beeinflusst von) und  $m$  Ausgänge  $A$  (Einfluss auf). Mit den Gewichten der Ein- und Ausgänge  $G_{E_i}$  und  $G_{A_i}$  berechnet sich der Einfluss  $I$  eines Elements nach Gleichung 2.6.

$$I(X) = \sum_{i=1}^n G_{E_i} * I(E_i) + \sum_{i=1}^m G_{A_i} * I(A_i) \quad 2.6$$

Aus den Summen der Einflüsse und der Auftretenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Elemente wird schließlich die Strukturrobustheit eines ganzen Produkts berechnet. (Gausemeier et al., 2012)

### 2.3.3 PGE-Risikoportfolio

Nach Albers, Rapp et al. (2017) führt ein höherer Neuentwicklungsanteil einer in Entwicklung befindlichen Produktgeneration  $G_n$  zu einem erhöhten Entwicklungsrisiko. Der Neuentwicklungsanteil  $\delta_{N,n}$  setzt sich aus der Vereinigung des Anteils der Prinzipvariation  $\delta_{PV,n}$  (Gl. 2.5) und des Anteils der Gestaltvariation  $\delta_{GV,n}$  (Gl. 2.4) zusammen.

Neuentwicklungen können nach Albers, Rapp et al. (2017) etwa Auswirkungen auf das Produktionssystem in Form notwendiger Anpassungen und Neuanschaffungen haben und zu einem erhöhten Validierungsaufwand führen. Eine Prinzipvariation geht außerdem immer mit einer Gestaltvariation einher, wodurch zusätzlicher Entwicklungsaufwand entsteht.

Ein zweiter wichtiger Faktor für das Entwicklungsrisiko stellt die Herkunft der Referenzelemente und somit das vorhandene Know-How über eben dieses dar. Stammen Elemente des Referenzsystems aus dem eigenen Unternehmen, so ist das Entwicklungsrisiko geringer als bei unternehmensfremden Referenzelementen. Das niedrigste Entwicklungsrisiko ist zu erwarten, wenn Referenzelemente aus dem eigenen Entwicklungsteam stammen. Bei externen Referenzelementen steigert sich das Entwicklungsrisiko je nach Zugehörigkeit zu eigener Branche, zu fremder Branche oder gar zur Forschung. Die beiden Faktoren Neuentwicklungsanteil und Herkunft des Referenzsystems sind im Risikoportfolio zusammengefasst. (Albers, Rapp et al., 2017)

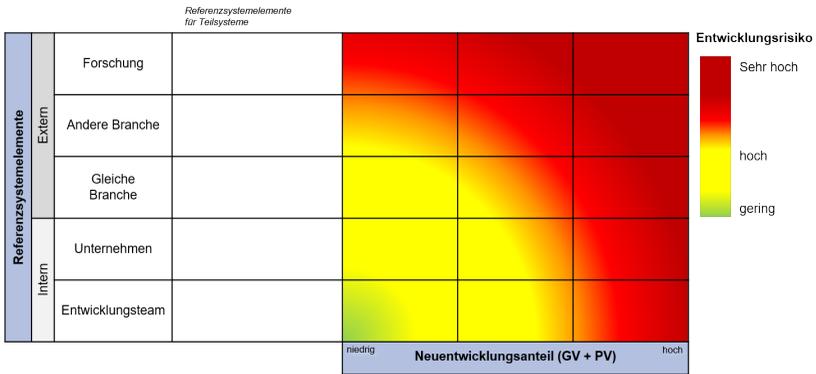


Abbildung 2.17: PGE-Risikoportfolio zur Risikobewertung von Teilsystemen. Das Entwicklungsrisiko einer neuen Produktgeneration steigt mit dem Neuentwicklungsanteil und wenn Referenzsystemelemente aus externen Unternehmen oder Institutionen stammen. (Albers, Rapp et al., 2017)

## 2.4 Industrie 4.0

Die industrielle Entwicklung kann historisch durch das Auftreten verschiedener disruptiver Veränderungen in den Produktionsprozessen charakterisiert werden. Die erste war die Nutzung von wasser- oder dampfbetriebenen Maschinen. Dies ermöglichte den Übergang von der Kleinserienfertigung zur effizienteren Produktion. Die nächste industrielle Revolution wurde durch den Einsatz von Elektrizität und Fließbändern, die zur Massenproduktion führten, realisiert. Die dritte industrielle Revolution wurde durch den Einsatz von Computer- und Automatisierungstechnologien im Produktionsprozess eingeläutet. Alle diese Revolutionen führten zu einer Steigerung der Effizienz in der Produktion. (Hompele et al., 2017, S. 1 ff.)

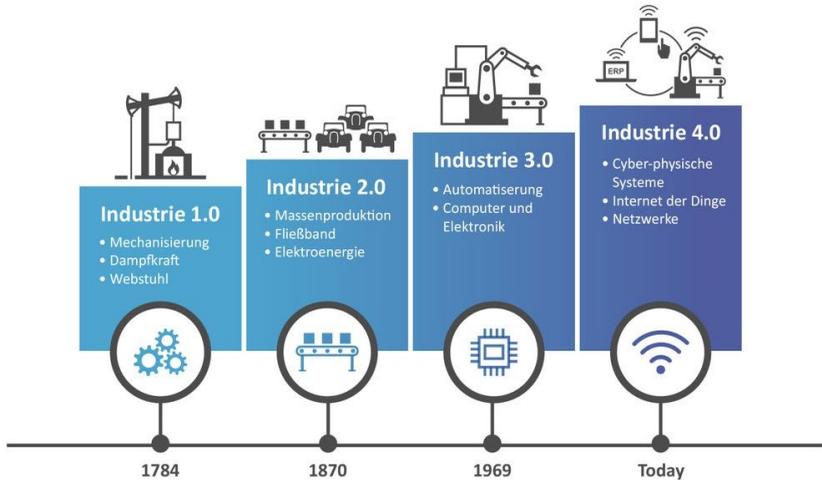


Abbildung 2.18: Überblick über die vier industriellen Revolutionen (btelligent.com)

Die vierte industrielle Revolution zeichnet sich hauptsächlich durch die digitale Vernetzung aller im Wertschöpfungsprozess beteiligten Akteure und Systeme aus. Ziel ist die Steigerung der Produktivität bei gleichzeitiger Flexibilität der Produktionssysteme. Umgesetzt wird dies durch die Erweiterung der klassischen Wertschöpfungs-systeme um Sensoren, Aktoren, und Systemen zur Datenverarbeitung und Kommunikation. (Reinhart & Zühlke, 2017) Die Einführung von Industrie 4.0-Technologien bietet außerdem eine große Chance den drohenden Fachkräftemangel zu bewältigen, da Ressourcen effizienter eingesetzt werden können. Der Schlüssel zur Ausschöpfung des Potentials von Industrie 4.0 liegt in der Kombination und Verknüpfung der zahlreichen Technologien. (Schuh et al., 2021) Die Einführung von Industrie 4.0 stellt viele Unternehmen vor große Herausforderungen. Der Leitfaden Industrie 4.0 (Anderl & Fleischer, 2015) bietet hierfür mit einem methodischen Ansatz inklusive Werkzeugkasten aus Produkt und Produktionssicht Unterstützung.



Abbildung 2.19: Aufbau des Leitfadens Industrie 4.0 (Anderl & Fleischer, 2015)

### 2.4.1 Potentialfindung für Industrie 4.0 Lösungen

Eine große Herausforderung für die Einführung von Industrie 4.0 und die Umsetzung deren Potentiale ist die Identifikation der für den entsprechenden Anwendungsfall richtigen und wertschöpfenden Technologien. Schuh et al. entwickelten ein Framework für „Design for Industrie 4.0“, in welchem Herausforderungen der Produktentwicklung im Kontext von Industrie 4.0 in unterschiedliche Themengebiete eingegliedert werden.

**Challenges in product development in the context of Industrie 4.0**

		Orientation	Data	Interaction	Resources
Levels of Design for X-approaches	Product	1.	2.	3.	4.
	Process	5.	6.	7.	8.

Abbildung 2.20: Framework für Design for Industrie 4.0.(Schuh et al.) Die Herausforderungen sind in die acht Quadranten Orientierung, Daten, Interaktion und Ressourcen in Produkt und (Produktions-) Prozess unterteilt.

Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem werden in diesem Framework nicht ersichtlich, jedoch zeigen sich die Handlungsfelder der Interaktion zwischen den Systemelementen der Domänen Produkt und Produktionsprozesse und die Nutzung der Daten aus dem Produktlebenszyklus inklusive dessen Produktion.

Sensoren, Autoidentifikationssysteme und andere Technologien erhalten im Zeitalter von Industrie 4.0 immer weiteren Einzug in die Produktionssysteme. Für eine möglichst optimale Nutzung dieser Technologien, muss deren Einsatz bereits in der Produktentstehung, die die Produktionssystementwicklung beinhaltet, berücksichtigt werden. Inkermann et al. (2019) beschreiben die Notwendigkeit, Technologien, die Industrie 4.0 Funktionen erfüllen, zu klassifizieren und aus Produkt und Produktionssystemensicht zu beschreiben. Um Industrie 4.0-Technologien zu beschreiben,

bestehen Ansätze, wie beispielsweise ein Clustersteckbrief, den Kohl et al. (2019) aufgestellt haben.

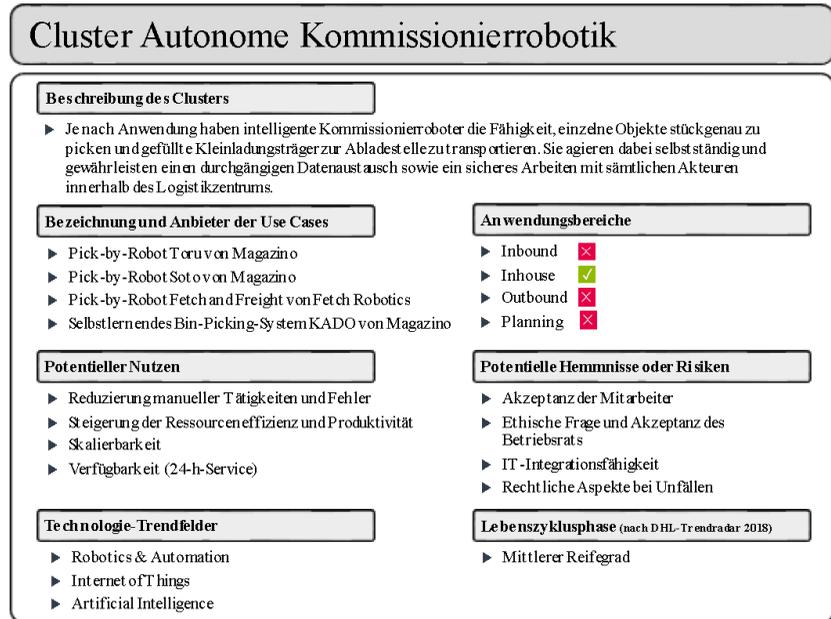


Abbildung 2.21: Beispielhafter Clustersteckbrief zur Beschreibung von Technologien. (Kohl et al., 2019)

In den bekannten Methoden zur Potentialfindung von Industrie 4.0-Technologien werden die systemischen Wechselwirkungen zwischen der Industrie 4.0-Technologie, dem Produkt und dem Produktionssystem und damit der Aufwand und Risiken für deren Umsetzung nicht betrachtet.



## 3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden die Motivation und Zielsetzung der Arbeit dargelegt. Letztere wird durch eine Forschungshypothese, die es durch die Beantwortung von Forschungsfragen zu verifizieren oder zu falsifizieren gilt, spezifiziert.

### 3.1 Motivation und Forschungslücke

Im Stand der Forschung wurde aufgezeigt, dass durch die steigende Komplexität und Vernetzung von Produkt und Produktionssystem, deren integrierte Entwicklung im Sinne des Simultaneous Engineering von großer Bedeutung ist. So ist auch im iPeM dargestellt, dass die Entwicklung von Produktgenerationen mit der Entwicklung derer Produktionssysteme gemeinsam betrachtet werden muss. Bestätigt wird dies durch Aussagen von Maschinenanwendern, Maschinenherstellern und Entwicklern von CAQ-Software<sup>1</sup>, die in Workshops zur Erfassung von Rahmenbedingungen und Anwendungsfeldern von Industrie 4.0 vom Autor dieser Arbeit durchgeführt wurden (Stürmlinger et al., 2016). Demnach überschneiden sich die Betrachtungsweisen von Produkt- und Prozessqualität und können nicht losgelöst voneinander optimiert werden. Für eine effiziente und risikominimierte Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem braucht es eine einheitliche Darstellung der Daten und Abhängigkeiten zwischen Produktmerkmalen und Elementen des Produktionssystems (Fleischer, Albers et al., 2022; Gönzheimer et al., 2019). Die Arbeit entstand zu Teilen unter Bearbeitung des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „I4TP - Sino-German Industry 4.0 Factory Automation Platform“ unter der Leitung des wbk – Institut für Produktionstechnik. Ziel des Projekts war, eine softwaregestützte, modellbasierte Fabrikautomatisierungsplattform für die schnelle Konfiguration und Inbetriebnahme schlüsselfertiger Produktionssysteme mit integrierter Produktberatung und maßgeschneiderten Geschäftsmodellen zu entwickeln (Fleischer, Albers et al., 2022). Die in dieser Arbeit

---

<sup>1</sup> Computer Aided Quality Software bezeichnet Software, die zur Erfassung von Qualitätsdaten im Produktionsprozess dient und durch deren Aufbereitung und Datenanalyse die Produktionsprozesse optimiert werden können.

entwickelte Methode, sollte dabei Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion aufzeigen.

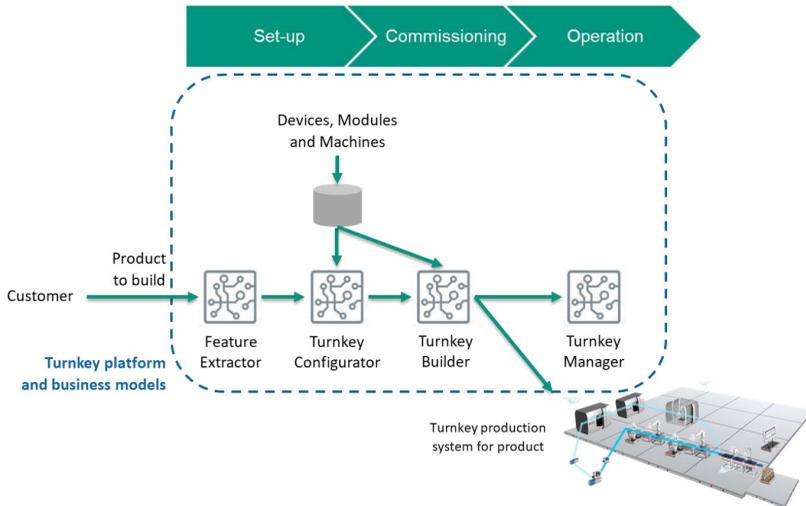


Abbildung 3.1: Überblick über den Konfigurationsprozess schlüsselfertiger Produktionssysteme im Projekt I4TP. (Fleischer, Albers et al., 2022) Die in dieser Arbeit entwickelte Methode gliederte sich im Projekt maßgeblich zwischen den Schritten „Feature Extractor“ und „Turnkey Configurator“ ein.

Ein bekanntes Beispiel, in der die Komplexität zwischen Produkt und Produktionssystem unterschätzt wurde, ist die Produktion des Tesla Model 3. Geplant war dieses komplexe Produkt vollautomatisiert und unter Einsatz möglichst weniger Menschen zu produzieren. Dieses Unterfangen stellte sich während der Produktion des Autos als nicht machbar heraus, weshalb sich die Auslieferung der Fahrzeuge massiv verzögerte und die Fabrik angepasst werden musste. Als Hauptgrund hierfür führte Elon Musk die Unterschätzung des Menschen und die Überschätzung der Maschine, aber auch die zu schnelle Einführung neuartiger Technologien im Produktionssystem an. (Handelsblatt, 2018) Dieser Fall zeigt, dass die Zusammenhänge zwischen immer komplexer werdenden Produkten und Produktionssystemen schon im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden müssen und die Auswirkungen zwischen Systemelementen analysiert werden müssen. Somit kann das Entwicklungsrisiko bewertet und Potentiale für die Einführung von Industrie 4.0 Technologien identifiziert werden.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, existieren Methoden um die Wechselwirkungen zwischen diversen Systemelementen zu beschreiben, jedoch sind diese entweder auf eine Domäne beschränkt, in der Modellierung sehr komplex oder beziehen das Wissen aus Referenzelementen nicht zu genüge mit ein. Ansätze um Potentiale von Industrie 4.0 zu identifizieren und wie diese in der Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen, existieren nicht. Für die Operationalisierung des PPCD-mangelt es also an einem Ansatz, mit dem die Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen des Produkts und des Produktionssystems modelliert und analysiert werden können um Entwicklungsrisiken und -potentiale bewerten zu können.

## 3.2 Zielsetzung

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und der hieraus abgeleiteten Motivation soll im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt werden, die Produktentwickler im PPCD unterstützt. Die Überprüfung der nachfolgenden Forschungshypothese gibt die Antwort darauf, ob sich unter Nutzung und Weiterentwicklung der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) eine Methode entwickeln lässt, die die integrierte Entwicklung von Produkt und Produktionssystem vereinfacht, indem die Wechselwirkungen modelliert werden und Risiken und Auswirkungen von Änderungen oder alternativer Lösungen bewertet werden können. Die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem bildet die Basis für eine Analyse der Auswirkungen von Änderungen bzw. Neuentwicklungen einer in der Entwicklung befindlichen Produktgeneration.

### Forschungshypothese

Auf Grundlage der KaSPro können durch Ergänzung geeigneter Methodenbausteine

- die **Wechselwirkungen** zwischen Produkten und Produktionssystemen **analysiert**
- und **modelliert** werden,
- um damit **Potentiale** und **Risiken** in der **Produktgenerationsentwicklung und Produktionssystemevolution** zu identifizieren.

Zur Untersuchung dieser Forschungshypothese werden drei Forschungsfragen abgeleitet, die im weiteren Verlauf der Arbeit beantwortet werden.

Die erste Forschungsfrage adressiert die Erstellung einer Methode, die verschiedene Aspekte der wechselseitigen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem

adressiert. Die Beantwortung der Frage, wie das Modell der PGE für die Erstellung einer Methode für eine ganzheitliche Betrachtung von Produkt- und Produktionssystementwicklung genutzt werden kann, bildet ein zentrales Element zur Verifizierung oder Falsifizierung der Forschungshypothese.

### Forschungsfrage 1

Wie kann auf Basis des **Modells der PGE** der Produktentwickler in der ganzheitlichen Betrachtung von **Produkt- und Produktionssystementwicklung** unterstützt werden?

Die zweite Forschungsfrage beschäftigt sich im Detail mit der Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Hierbei wird auf den in Kapitel 2.3 beschriebenen Methoden zur Modellierung von Abhängigkeiten und den daraus resultierenden Ansätzen zur Auswirkungs- und Risikoanalyse aufgebaut.

### Forschungsfrage 2

Wie können **Wechselwirkungen** zwischen Produkt und Produktionssystem modelliert und damit **Auswirkungen** und **Risiken** identifiziert und bewertet werden?

Durch Beantwortung der dritten Forschungsfrage soll aufgezeigt werden, wie im PPCD Potentiale in den Domänen Produkt- und Produktionssystementwicklung durch die Nutzung von Industrie 4.0-Technologien identifiziert werden können.

### Forschungsfrage 3

Wie lassen sich **Entwicklungspotentiale für und mit Industrie 4.0** Technologien effizient identifizieren?

Durch die Beantwortung dieser drei Forschungsfragen lässt sich die Forschungshypothese verifizieren oder falsifizieren. Es entsteht somit ein methodischer Beitrag, der insbesondere Produktentwickler im PPCD unterstützt.

### 3.2.1 Forschungsvorgehen

Das Forschungsvorgehen dieser Arbeit basiert auf dem Forschungsdesign von Marxen und Albers (2012) & Marxen (2014), ist jedoch auf die spezifische Problemstellung dieser Arbeit angepasst.

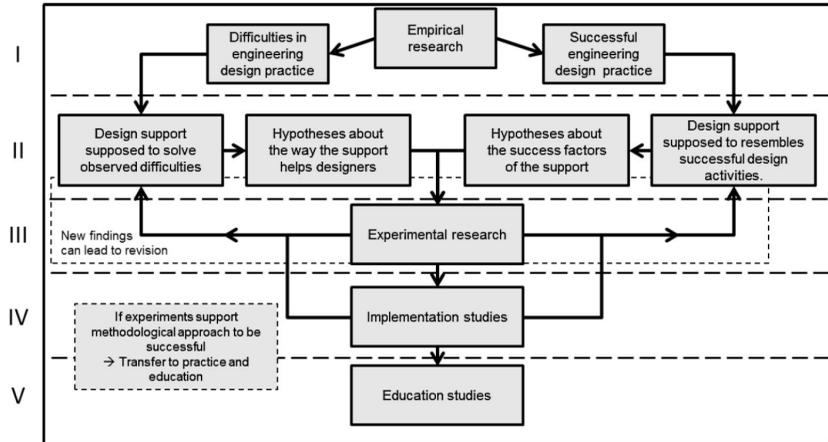


Abbildung 3.2: Vorgehen in der entwicklungsmethodischen Forschung (Marxen, 2014; Marxen & Albers, 2012)

Das in Abbildung 3.2 gezeigte Forschungsvorgehen ist in fünf Phasen unterteilt. In Phase I wird mittels empirischer Forschung der Forschungsbedarf identifiziert, worauf hin in Phase II eine Forschungshypothese aufgestellt und eine Methode zum Schließen der Forschungslücke entwickelt wird. In Phase III wird die Methode experimentell angewendet und anschließend in Phase IV auf Basis der Erkenntnisse weiterentwickelt. Die weiterentwickelte Methode wird in Phase V schließlich nochmals in einem breiteren Feld angewendet. Eine Analyse und Bewertung der Methode und die Verifizierung oder Falsifizierung der Forschungshypothese folgt abschließend. In dieser Arbeit wird das beschriebene Forschungsvorgehen als Grundlage verwendet und auf den Forschungsgegenstand entsprechend angepasst.

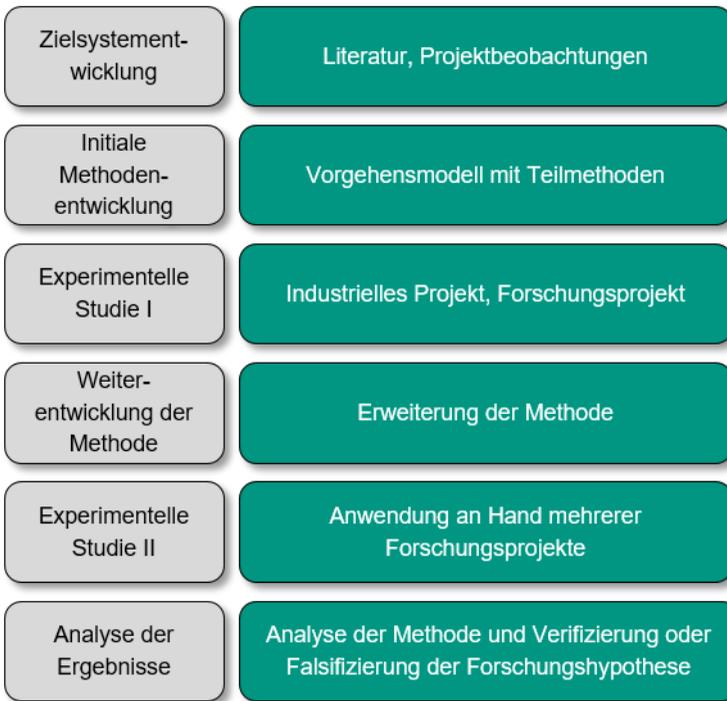


Abbildung 3.3: In dieser Arbeit angewendetes Forschungsvorgehen

In dieser Arbeit werden in Schritt 1 zur Klärung des Forschungsbedarfs eine Literaturrecherche durchgeführt und die bestehenden Methoden analysiert. Daraus wird das Zielsystem für die zu entwickelnden Methodenbausteine abgeleitet. In Schritt 2 wird ein Vorgehensmodell entwickelt, das zur Lösung des Forschungsbedarfes beitragen soll. Zur Operationalisierung der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells werden außerdem initiale Methoden entwickelt. In Schritt 3 finden erste experimentelle Studien statt. Zum einen wird die Einführung einer Industrie 4.0-Technologie in der Kegelradfertigung bei einem Automobilhersteller untersucht. Das entwickelte Vorgehen wird hier samt Methoden im Rahmen der beim Anwender herrschenden Randbedingungen angewendet. Zum anderen wird innerhalb eines Forschungsprojekts untersucht, wie mit Hilfe von Industrie 4.0-Technologien Entwicklungspotentiale gehoben werden können. Mittels der Beobachtungen der Anwendung aus Schritt 3 werden das Vorgehen und die Methoden zur Operationalisierung in Schritt 4 weiterentwickelt und in Schritt 5 schließlich bei weiteren Anwendungsfällen eingesetzt. In einem abschließenden, 6. Schritt wird die Anwendung der Methode schließlich

evaluiert und die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen zusammengefasst und damit die Forschungshypothese verifiziert oder falsifiziert.



## 4 Definitionen

Für viele Begriffe besteht kein einheitliches Verständnis oder es existiert keine anerkannte Definition. In dieser Arbeit werden außerdem Begriffe genutzt, die erst im Rahmen der Entwicklung der KaSPro eingeführt wurden, um eine einheitliche Basis zu schaffen. Zum Verständnis der Arbeit werden in diesem Kapitel daher eigens erarbeitete Definitionen aufgeführt, beziehungsweise die Bedeutung bekannter Definitionen im Kontext des Produkt-Produktions-CoDesigns erläutert.

### 4.1 Produktionssystem

Das Produktionssystem bildet die Summe aller zur (Teile-)Fertigung und Montage eines Produkts notwendigen Produktionsprozesse und der damit verwendeten Anlagen, Maschinen, menschlichen Arbeitsleistung, Informationsverarbeitung und weiteren Ressourcen. In Anlehnung an Eversheim (2012) umfasst das Produktionssystem neben den Elementen zum technischen Herstellungsprozess auch organisatorische Elemente zur Planung, Entwicklung, Steuerung und zum Betrieb der Produktionsprozesse. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Produktionssystem nur als Summe der Produktionsmaschinen inklusive Werkzeuge und Produktionsprozesse verstanden.

### 4.2 Industrie 4.0 Funktionen

*„Industrie 4.0 Funktionen sind mechatronische und/oder unterstützende Funktionen in der bzw. für die Produktion. Beispielsweise sind dies Funktionen, die von Sensoren zur Qualitätserfassung erfüllt werden, Funktionen zur Kommunikation und Vernetzung zwischen Maschinen, zur Automatisierung, Robotik, Entwicklung und Betreibung Cyber-physischer Systeme, Autoidentifikation und künstlicher Intelligenz. Industrie 4.0 Funktionen können jedoch auch durch nicht digitale Systeme und Elemente erfüllt werden, beispielsweise Ösen an einem Produkt, welche zur automatisierten Handhabung durch einen Roboter notwendig sind. Die Identifikation der zu unterstützenden Prozesse, der I40-Funktionen und deren systemische Umsetzung ist stets individuell durchzuführen.“* (Albers, Stürmlinger et al., 2018; Albers, Stürmlinger et al., 2019)

### **4.3 Design for Industrie 4.0**

*„Im Kontext der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) verstehen wir unter dem Begriff Design for Industrie 4.0 das Finden von Produktprofilen, die Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen und die Entwicklung von Dienstleitungen und Geschäftsmodellen im Kontext von Industrie 4.0. Der aktuelle Fokus der Forschung liegt auf der Entwicklung physischer Produkte und Produktionssysteme mit allen assoziierten Entwicklungsaktivitäten, um eine Produktion mit Industrie 4.0 Technologien zu befähigen oder zu unterstützen. Dies betrifft explizit die Integration von Industrie 4.0 Funktionen in das Produkt oder Produktionssystem, aber auch die Integration von Nebenfunktionen, um die Industrie 4.0 Produktion zu ermöglichen.“ (Albers, Stürmlinger et al., 2018; Albers, Stürmlinger et al., 2019)*

### **4.4 Design with Industrie 4.0**

*„Design with Industrie 4.0 beschreibt im Verständnis der KaSPro die Nutzung der Daten aus Industrie 4.0 Produktionsprozessen im Produktentwicklungsprozess zur Unterstützung der Entwicklung der nächsten Generation des Produkts oder des Produktionssystems. Die Daten können in unterschiedlichen Entwicklungsaktivitäten wie Profilverfindung, Gestaltung und Validierung (beispielsweise Definition von Test-Cases) einfließen und werden hierzu in unterschiedlichen Detaillierungsgraden und Umfängen benötigt. (Stürmlinger et al., 2018)“ (Albers, Stürmlinger et al., 2018; Albers, Stürmlinger et al., 2019)*

## **5 Zielsystem der zu entwickelnden Methode**

Im ersten Schritt des vorgestellten Forschungsdesigns wird das Zielsystem für die zu entwickelnde Methode abgeleitet. Dies geschieht anhand der im Stand der Forschung beschriebenen, bereits existierenden Methoden.

### **5.1 Analyse der bestehenden Methoden zur Auswirkungs- und Risikoanalyse zwischen Produkt und Produktionssystem**

Für den besseren Umgang mit der steigenden Komplexität, der Integration unterschiedlicher Disziplinen und dem Darstellen der Vernetzung der einzelnen Teilsysteme, wurden in Kapitel einige Methoden zur Auswirkungs- und Risikoanalyse zwischen Produkt und Produktionssystem beschrieben. Da in dieser Forschungsarbeit der Fokus auf einer Methode zur Unterstützung des PPCD liegt, wird im Folgenden evaluiert, welche Eigenschaften die aufgeführten Methoden in welcher Ausprägung haben. Daraus wird der weitere Forschungsbedarf und in Kapitel 5.2 schließlich das initiale Zielsystem der Methode abgeleitet.

Die in Abbildung 2.13 von Steimer und Aurich (2016) gezeigte Klassifizierung der Informationsflüsse zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung erleichtert die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen diesen Disziplinen. So zeigt sich etwa, dass Produktfunktionen und Produktionsprozessen nicht direkt voneinander abhängen, sondern die Produktgestalt als verknüpfendes Element wirkt. Ebenso werden Maschinen und Anlagen nicht direkt mit der Produktgestalt verknüpft, sondern über die Produktionsprozesse. Diese Klassifizierung nutzen auch Gausemeier et al. (2012) in der Bewertung der Strukturrobustheit von Produkten um den Modellierungsaufwand zu reduzieren.

Clarkson et al. (2001) stellen die Abhängigkeiten von Subsystemen innerhalb eines Produkts auf Ebene der Bauteilgestalt dar. Anforderungen oder Funktionen werden nicht modelliert, ebenso wenig Informationen des Produktionssystems. Die Informationen werden in Workshops von Experten erhoben, hier wird sich auf deren Know-how verlassen und auf unterstützende Methodenbausteine zur Informationserfassung verzichtet. Mit dem Strukturdiagramm und der Beschreibung der einzelnen

Schritte steht jedoch eine geringe Unterstützung im Entwicklungsprozess zur Verfügung. Durch die detaillierte Berechnung der Auswirkungen und Auftretenswahrscheinlichkeiten einzelner Abhängigkeiten wird das Risiko einer Änderung sehr detailliert berechnet. Die Nutzung der Informationen lässt sich dabei prinzipiell für verschiedene Systemebenen skalieren, beispielsweise zwischen Subsystemebene Getriebe – Motor oder Bauteilebene Zahnrad – Welle. Durch die Fokussierung auf die Produktgestalt mit einer sehr detaillierten Ermittlung der Änderungsrisiken stellt sich ein moderater Modellierungsaufwand ein. Durch die fehlende Unterstützung in der Informationserfassung und der damit nötigen Einbindung vieler Experten in Workshops erhöht sich dieser jedoch. Bei der Modellierung wird auf das aktuell am Markt befindliche Produkt aufgebaut, das weiterentwickelt werden soll. Die Nutzung weiterer Referenzelemente, beispielsweise aus unternehmensfernen Quellen wird jedoch nicht adressiert. Die Methode erlaubt die Vorhersage der Risiken von Änderungen aktueller Systemelemente, gibt jedoch keinen Hinweis darauf, wie neue Systemelemente in die bestehende, modellierte Struktur aufgenommen werden können.

In der Methode zur Bewertung der Strukturrobustheit von Produkten von Gausemeier et al. (2012) werden die Abhängigkeiten innerhalb und zwischen der Domänen Produkt und Produktionssystem abgebildet. Innerhalb des Produktionssystems wird zwischen Produktionsprozessen und Ressourcen, beim Produkt zwischen Bauteilgestalt, Funktionen und Anforderungen unterschieden. Der Informationsgehalt ist damit als hoch zu betrachten, damit jedoch auch der Modellierungsaufwand. Dieser wird durch eine detaillierte Berechnung der Einflüsse und Wahrscheinlichkeiten und damit des Risikos von Änderungen ähnlich zur Methode von Clarkson et al. (2001) weiter erhöht. Eine Skalierbarkeit der Systemebene ist auch hier denkbar, jedoch nicht weiter erläutert. Eine methodische Unterstützung zur Herleitung der Informationen aus Produkt und Produktionssystem und deren Wechselwirkungen ist nicht beschrieben, ebenso wenig wie Referenzsysteme für eine erleichterte und sichere Modellierung verwendet werden können. Die Nutzung der Methode wird anhand einer, in dieser Arbeit so genannten, Neuentwicklung eines Pedelec beschrieben, ohne ein Referenzsystem zu nutzen. Der PEP wird durch die Einbettung des V-Modells in ein generisches Vorgehensmodell unterstützt, jedoch existieren keine Methodenbausteine, um Potentiale im Kontext von Design for und Design with Industrie 4.0 zu identifizieren.

In der Methode von Albers, Rapp et al. (2017) wird produktseitig die Bauteilgestalt modelliert, das Produktionssystem wird nicht mit betrachtet. Durch die Verknüpfung mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz ist die Modellierungsebene von Subsystemen bis hin zum Wirkflächenpaar einfach skalierbar. Referenzelemente werden stark betrachtet, indem sogar deren Herkunft und damit das Wissen über diese Elemente in

die Risikobetrachtung mit einfließen. Der Modellierungsaufwand ist somit sehr gering, die Risikobetrachtung ist deutlich einfacher durchzuführen als bei den anderen genannten Methoden, wenn auch weniger detailliert durch das Wegfallen einer ausführlichen Berechnung. Die Informationserfassung wird durch den Vergleich mit Referenzsystemelementen und der Nutzung des C&C<sup>2</sup>-A für die Bestimmung der Anteile der Variationsarten sehr gut unterstützt. Auch lassen sich neue Elemente leicht hinzufügen, jedoch werden die Abhängigkeiten zwischen den Elementen nicht berücksichtigt.

Die genannten Forschungsarbeiten zeigen, dass ein hoher Bedarf an Methoden besteht, die die integrierte Entwicklung von Produkt und Produktionssystem erleichtern. Die verschiedenen Herangehensweisen unterscheiden sich in den Punkten Informationen über für Produkt & Produktionssystem, Unterstützung der Informationserfassung und Unterstützung im Produktentstehungsprozess, Detailgrad der Risikoberechnung, Skalierbarkeit des Detailgrads, Modellierungsaufwand, Nutzung von Referenzsystemelementen und der Möglichkeit neue Produkt- oder Produktionssystemelemente hinzuzufügen. In Tabelle 8.1 sind die vorgestellten Methoden nach diesen Aspekten bewertet, woraus sich schließlich ein Bedarf einer Methode zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem und der Evaluation der Auswirkungen und Risiken von Neu- und Weiterentwicklungen ableiten lässt. Die Bewertungen sind zwischen 0 (wenig/nicht vorhanden) und ++ (sehr viel/sehr hoch) angegeben. Eine Ausnahme bildet der Modellierungsaufwand, hier steht ++ für einen niedrigen und 0 für einen sehr hohen Modellierungsaufwand.

Tabelle 5.1: Bewertung der Methoden zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem und der Evaluation der Auswirkungen und Risiken von Neu- und Weiterentwicklungen

	Clarkson et al., 2001	Gausemeier et al., 2012	Albers, Rapp et al., 2017
<b>Informationen über P</b>	+	++	+
<b>Informationen über PS</b>	0	++	0
<b>Unterstützung im ges. PEP</b>	+	+	0
<b>Unterstütz. Informationserf.</b>	0	0	++
<b>Detailgrad der Risikoberechn.</b>	++	++	+
<b>Skalierbarkeit des Detailgrads</b>	+	+	++

<b>Modellierungsaufwand</b>	+	0	++
<b>Referenzsystemelemente</b>	+	0	++
<b>Hinzufügen neuer Elemente</b>	0	+	+

## 5.2 Ableitung des initialen Zielsystems für die zu entwickelnde Methode

Die in Kapitel 5.1 analysierten Methoden haben jeweils verschiedene Vor- und Nachteile. Keine der Methoden erlaubt etwa eine kombinierte Modellierung der Auswirkungen von Änderungen von Produkt- und Produktionssystemelementen unter Nutzung von Referenzsystemelementen. Eine mögliche Skalierbarkeit des Detaillierungsgrads ist je nach Know-how und Entwicklungsphase umzusetzen, jedoch ist es wichtig den Modellierungsaufwand bei ausreichender Informationsdichte möglichst klein zu halten. Dies hat den Vorteil, dass Experten aus der Produktentwicklung, die jedoch keine Modellierungsexperten sind, die Modelle pflegen können. Aus diesem Grund soll die Bewertung des ganzheitlichen Entwicklungsrisikos oder einzelner Änderungen mit gewissen Vorgaben unterstützt, jedoch nicht detailliert für jedes einzelne Element berechnet werden. Für eine weitere Reduktion des Modellierungsaufwands, sollen die Abhängigkeiten zwischen Elementen zudem nicht gerichtet erfasst werden. Dies verringert den Modellierungsaufwand und stellt dabei nur eine leichte Vereinfachung der Zusammenhänge dar. So wirkt sich beispielsweise eine Änderung einer Funktion immer zwangsläufig auf die Gestaltelemente des Produkts aus, die diese umsetzen. Andersherum muss bei einer Änderung dieser Gestaltelemente immer überprüft werden, ob die gewünschte Funktion unter Vermeidung ungewünschter Funktionen weiterhin erfüllt wird. Die zu entwickelnde Methode soll ein einfaches Hinzufügen neuer Elemente ermöglichen und außerdem unterstützende Methodenbausteine zur Identifikation von Potentialen für Design with und Design for Industrie 4.0 bieten. Des Weiteren bietet keine der existierenden Methoden eine Unterstützung zur Erfassung der Informationen auf unterschiedlichen Systemebenen. Dies soll in der zu entwickelnden Methode anhand einer Vorlage ermöglicht werden.

Für die Entwicklung des Vorgehensmodells und der zugehörigen Methoden wird ein initiales Zielsystem definiert, um die Anforderungen für eine anwendungsorientierte Unterstützung für Ingenieure abzuleiten. Das Vorgehensmodell soll die wechselseitige Betrachtung der Entwicklung von Produkt und Produktionssystem ermöglichen

und dabei als Informationsbasis unter Nutzung des Modells der PGE die relevanten Referenzsystemelemente einbeziehen. Hierbei müssen insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem betrachtet werden, da sich Änderungen in einem der Systeme immer auf die andere Domäne auswirken. Daraus sollen des Weiteren Potentiale für die Produkt- und Produktionssystementwicklung im Kontext von Industrie 4.0 gewonnen werden und der Einfluss und das Risiko möglicher Variationen im Produkt oder Produktionssystem bewerten werden können. Nachfolgend sind stichpunktartig die Anforderungen im initialen Zielsystem aufgeführt:

- Leitfaden zur ganzheitlichen Betrachtung von Produkt und Produktionssystem,
- Nutzung von Referenzsystemelementen als Wissensbasis,
- Unterstützung bei der Erfassung von Informationen aus dem Referenzsystem,
- Wechselwirkungen zwischen P & PS modellieren,
- Nutzen und Weiterentwicklung von Elementen der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung,
- Möglichkeit zur Identifikation von Potentialen im Kontext von Industrie 4.0
- Skalierbarkeit im Detaillierungsgrad,
- Anwendbar für unterschiedliche Anwendungsfälle,
- Möglichst frühe und begleitende Anwendbarkeit der Methode im Entwicklungsprozess,
- Möglichkeit zur Ableitung von Auswirkungen und Risiken alternativer Lösungen oder möglicher Variationen an Produkt oder Produktionssystem auf dieselbe und auf die jeweils andere Domäne.

Die Methode soll begleitend im Entwicklungsprozess bis zur Produktion des Produkts und des Produktionssystems eingesetzt werden können. Es wird also deutlich, dass die Methode sowohl bei einem initialen Zielsystem mit hohen Unsicherheiten im Produktentwicklungsprozess, als auch bei Vorhandensein detaillierteren Wissens anwendbar sein muss.

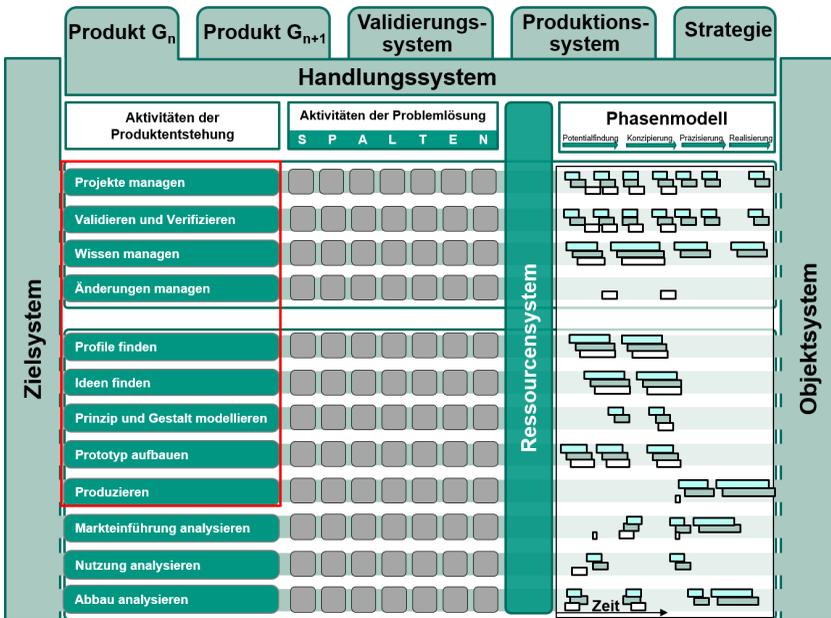


Abbildung 5.1: Anwendungsaktivitäten der zu entwickelnden Methode im iPeM

Abbildung 5.1 zeigt in welchen Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses die Methode eingesetzt werden soll. Beispielhaft ist der Layer des zu entwickelnden Produkts  $G_n$  dargestellt, in gleicher Weise ließe sich auch der Layer eines zu entwickelnden Produktionssystems  $G_n$  darstellen. In Aktivitäten wie Profil- oder Ideenfindung sind noch wenige Details über Produkt und Produktionssystem verfügbar, weshalb die Modellierung der Wechselwirkungen auch auf geringem Detailgrad möglich sein muss. In Aktivitäten wie der Modellierung von Prinzip und Gestalt, sind detailliertere Informationen verfügbar und somit ist auch eine detailliertere Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem möglich. Die Methode hat also die Anforderung, zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit einem unterschiedlichen Grad an Informationen nutzbar sein.

Die vorhandene Informationsbasis im Produktentstehungsprozess ist nicht nur von der zeitlichen Phase abhängig, sondern auch vom vorhandenen Wissen im jeweiligen Unternehmen. Handelt es sich beispielsweise um die Entwicklung eines Produkts der Generation  $G_n$ , dessen Referenzelemente zum Großteil aus dem eigenen Unternehmen stammen, so sind mehr Informationen für eine detaillierte

Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem vorhanden als bei der Entwicklung eines Produkts, dessen Referenzsystem Großteils unternehmensextern ist.

Zusätzlich zum vorhandenen Wissen über das zu entwickelnde Produkt ist außerdem im Unternehmen vorhandene Know-How bezüglich der Produktion entscheidend. Viele Unternehmen kaufen die Produktionssysteme zu und nutzen diese ohne viel Wissen über die Produktion an sich zu haben oder produzieren ihre entwickelten Produkte gar in einem externen Unternehmen oder Land. Die Methode soll also auch bei geringem vorhandenen Produktions-Know-How anwendbar sein und den Entwickler unterstützen, die Zusammenhänge besser zu erkennen und die wechselseitigen Einflüsse zu identifizieren.



## **6      Initiale Methode zur Unterstützung im PPCD**

Das in Kapitel 5 abgeleitete Zielsystem stellt den Bedarf nach einem Vorgehensmodell samt Methoden heraus, das Produkt- und Produktionssystementwickler in der ganzheitlichen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem und der Abschätzung von Auswirkungen von Änderungen und Entwicklungsrisiken unterstützt. In diesem Kapitel wird das initial entwickelte Vorgehensmodell beschrieben, sowie einige Teilmethoden detailliert vorgestellt.

### **6.1    Vorgehensmodell**

Um die im Zielsystem definierten Anforderungen an die Methode umzusetzen, wird ein allgemeines Vorgehensmodell, bestehend aus mehreren Teilschritten bzw. Teilmethoden entwickelt. Einige der Teilmethoden werden detaillierter ausgearbeitet als andere, weshalb der Forschungsschwerpunkt der Methode nachfolgend eingegrenzt wird.

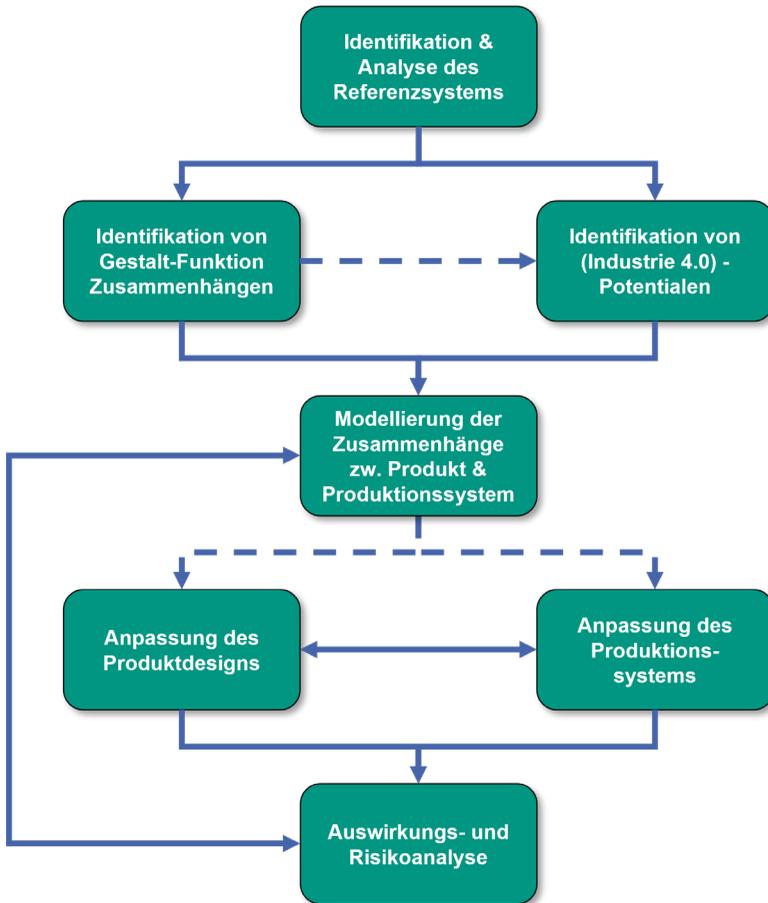


Abbildung 6.1: Vorgehensmodell zur ganzheitlichen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem nach Albers, Stürmlinger et al. (2019). In einem ersten Syntheseschritt wird das Referenzsystem identifiziert und schließlich analysiert. Produktseitig werden Gestalt-Funktions-Zusammenhänge analysiert und anschließend die Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktionssystem modelliert. Zuvor identifizierte (Industrie 4.0) Potentiale können in die Modellierung aufgenommen werden. Etwaige Anpassungen an Produkt und Produktionssystem werden modelliert und einer Auswirkungs- und Risikoanalyse unterzogen, welche auf den modellierten Zusammenhängen basiert.

Im ersten Schritt des gezeigten Vorgehensmodells ist das Ziel, die Wissensbasis des Produktentwicklers zu erweitern. Dies ist über die Identifikation und anschließende Analyse der Referenzsystemelemente zu erreichen. Für die produktseitigen Referenzsystemelemente werden GFZ analysiert, was für die spätere Auswirkungsanalyse relevant ist. Zudem können für die Referenzprodukte und das Referenzproduktionssystem Entwicklungspotentiale identifiziert werden. Da in dieser Arbeit das PPCD im Fokus steht und Industrie 4.0 eine wichtige Rolle in der Produktion spielt, liegt der Fokus der Potentialfindung hier auf Industrie 4.0-Technologien. Dies bedeutet, dass einerseits Entwicklungspotentiale identifiziert werden können, die mit Industrie 4.0-Technologien erreicht werden können (Design with Industrie 4.0) und andererseits identifiziert werden kann, wie ein Produkt für einen möglichst optimalen Einsatz für Industrie 4.0-Technologien entwickelt werden muss (Design for Industrie 4.0). Die Abhängigkeiten der analysierten Referenzsystemelemente werden schließlich modelliert und gegeben falls durch Variationen am Produkt oder Produktionssystem ergänzt. Abschließend findet auf Basis der modellierten Abhängigkeiten eine Auswirkungs- und Risikoanalyse statt.

## **6.2 Teilschritte und -methoden**

Im Folgenden wird auf die einzelnen Teilschritte des Vorgehensmodells eingegangen. In diesen werden jeweils Methoden (weiter-)entwickelt, die auf dem in dieser Arbeit beschriebenen Stand der Forschung beruhen. Dabei werden einige Teilschritte – insbesondere die, mit eigener Methodenentwicklung - im Detail beschrieben, während die übrigen Teilschritte nicht im Fokus der Arbeit stehen und somit nicht erläutert werden. Letzteres betrifft die Schritte „Anpassung des Produktdesigns“ und Anpassung des Produktionssystems“.

### **6.2.1 Identifikation & Analyse des Referenzsystems**

Für eine möglichst große Wissensbasis im PPCD wird im ersten Schritt das Referenzsystem identifiziert und analysiert. Dies befähigt den Produktentwickler, die Abhängigkeiten im Referenzsystem und damit später auch der nächsten Produktgeneration und Produktionssystemevolution möglichst genau zu modellieren. Da es sich um ein Vorgehen zur Unterstützung des PPCD handelt, liegen produkt- und produktionssystemseitige Referenzsystemelemente im Fokus dieser Arbeit. Andere Referenzsystemelemente wie beispielsweise das Validierungssystem sind auch ein integraler Bestandteil im Produktentstehungsprozess, deren Betrachtung ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

In den angesprochenen Referenzprodukten wird die Modellierung auf zwei Ebenen beschränkt: Die Ebene der Produktfunktionen und die Ebene der Produktgestalt. Weitere Informationen wie beispielsweise die Anforderungen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Grund hierfür ist, die Komplexität der Modellierung möglichst gering zu halten bei gleichzeitig guter Aussagekraft über die Abhängigkeiten. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, spielen Funktionen die zentrale Rolle in der Produktentwicklung, weshalb Informationen, die über diese und die Gestalt, die die Funktionen erfüllen hinaus gehen in dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Produktfunktion, -gestalt und dem Produktionssystem ist für die Bewertung der Auswirkungen und Risiken von Variationen in einem dieser drei Bereiche von großer Bedeutung. Um die Informationen aus dem Referenzsystem möglichst vollständig zu erfassen, wird für jede Ebene eine tabellarische Vorlage erstellt. Die Vorlagen für die einzelnen Ebenen werden nachfolgend vorgestellt.

### **6.2.1.1 Erfassung der Informationen von Produktfunktionen**

Die Erfassung der Funktionen eines Produkts, ob durch nachgelagerte Analyse von Referenzprodukten oder der vorgedachten Funktionen eines neu zu entwickelnden Produkts, ist ein elementarer Bestandteil für die erfolgreiche Konstruktion eines Produkts. In der integrierten Entwicklung von Produkt und Produktionssystem ist die Beschreibung der Produktfunktionen somit unabdingbar. Bei der Dokumentation der Funktionen wird sich an den in Kapitel 2.2.1.1 beschriebenen Eigenschaften und Beschreibungsgrößen orientiert. Jeder Funktion wird eine eindeutige ID zugeordnet, sowie eine eindeutige Bezeichnung. Es wird aufgeführt, durch welches Wirkprinzip die Funktion erfüllt wird und ob es sich um eine Haupt- oder Nebenfunktion handelt (HF oder NF). Zudem werden die Ein- und Ausgangsgrößen, unterteilt nach Information, Energie und Stoff, sowie mögliche alternative Wirkprinzipien dokumentiert. Die Informationen können auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen erfasst werden, beispielsweise auf der Ebene von Teilfunktionen, Unterfunktionen oder Elementarfunktionen. Für eine zuvor erfasste Teilfunktion können die Informationen zu deren Unterfunktionen innerhalb einer Tabelle dokumentiert werden. (Albers, Stürmlinger et al., 2019) & (Wang, 2018)<sup>1</sup>. Dies ist in Tabelle 6.1 beispielhaft gezeigt. Für jede Funktionsebene wird eine neue Tabelle erstellt, in der die untergeordneten Funktionen beschrieben sind.

---

<sup>1</sup> Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Tabelle 6.1: Beschreibung einer Teilfunktion eines Produkts, basierend auf Wang (2018) und Albers, Stürmlinger et al. (2019)

Funktionsebene										
Teilfunktion 1										
ID	Unterfunktion	Wirkprinzip	HF/NF	Eingangszustand			Ausgangszustand			Alternative Wirkprinzipien
				Information	Energie	Stoff	Information	Energie	Stoff	
F <sub>1</sub>	Unterfunktion 1									
F <sub>2</sub>	Unterfunktion 2									
F <sub>3</sub>	Unterfunktion 3									
F <sub>n</sub>	Unterfunktion n									

### 6.2.1.2 Erfassung der Informationen der Produktgestalt

Mit Hilfe des in Kapitel 2.2.1.3 beschriebenen C&C<sup>2</sup>-Ansatzes kann die Produktgestalt über die Erzeugnisgliederung (siehe Kapitel 2.2.1.2) hinaus bis auf dessen Wirkflächen unterteilt werden, wodurch eine noch detailliertere Funktionszuordnung ermöglicht wird. Wie detailliert Funktionen zu Komponenten, Merkmalen, oder Wirkflächen zugeordnet werden können, die an der Erfüllung dieser Funktion beteiligt sind, hängt von der verfügbaren Wissensbasis ab. In der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung oder einem Referenzsystem mit hohen externen Anteilen, ist eine Zuordnung der Funktionen beispielsweise nur zu Produktmerkmalen oder gar Komponenten und nicht auf spezifische Wirkflächen möglich. Die finale Form zur Zuordnung der Produktgestalt und deren Beschreibung zu den Unterfunktionen ist in Tabelle 6.2 abgebildet. Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad kann der Anwender etwa die Beschreibung der Wirkflächen entfernen oder Baugruppen ergänzen.

Jede Unterfunktion wird von mehreren Komponenten beziehungsweise Merkmalen mit Wirkflächen und deren Attributen erfüllt, die ein Wirkflächenpaar mit einer anderen WF bilden und mit einem anderen WFP durch eine LSS verbunden und durch jeweils einen Connector an die Umgebung angebunden sind (Matthiesen, 2021, S. 424). Je nach möglichem oder gewünschtem Detaillierungsgrad wird die Produktgestalt, die zur Erfüllung einer Funktion beiträgt, daher bis auf Baugruppe, Merkmal oder Wirkfläche unterteilt. Diesen Gestaltmerkmalen wird das Material zugeordnet, aus denen sie bestehen. Ist das beschriebene Merkmal ein Merkmal, bei dem Material entfernt wurde (bspw. ein Loch, eine Tasche oder eine Fase), wird das umgebende Material dokumentiert. Die Merkmale werden anschließend durch unabhängige Attribute und deren Ausprägung detailliert. Dies sind geometrische Eigenschaften und deren Werte, wie etwa eine Länge von 20 mm oder einer Oberflächenrauheit mit Rz 0,6. Des Weiteren können auch Attribute aufgeführt werden, die abhängig von anderen Attribute sind. Dies trifft beispielsweise auf die Masse

einer Komponente zu. Den einzelnen Gestaltmerkmalen kann zudem eine Kritikalität zugeordnet werden, um zu zeigen, welche Merkmale für die Erfüllung der Unterfunktionen am wichtigsten sind. (Albers, Stürmlinger et al., 2019; Wang, 2018)

Tabelle 6.2: Beschreibung der Gestaltebene eines Produkts nach Wang (2018) und Albers, Stürmlinger et al. (2019)

Gestaltebene										
Unterfunktion	Komponente	Merkmal	WF	Mat.	Unabhängige Attribute	Ausprägung	Krit.	Ab. Att.	A <sub>1</sub>	A <sub>n</sub>
Unterfunktion 1	Komponente 1	Merkmal 1			Attribut 1			A <sub>a1</sub>		
					Attribut 2			A <sub>a2</sub>		
		Merkmal 2			Attribut 3			A <sub>a3</sub>		
					Attribut 4			A <sub>a4</sub>		
	Komponente 2	Merkmal 3			Attribut 5			A <sub>a5</sub>		
					Attribut 6			A <sub>a6</sub>		
		Merkmal 4			Attribut 7			A <sub>a7</sub>		
					Attribut n			A <sub>an</sub>		

### 6.2.1.3 Erfassung der Informationen der Produktionsprozesse

Sind die GFZ erfasst und modelliert, werden die Produktionsprozesse modelliert, mit denen die Produktmerkmale produziert werden (Tabelle 6.3). Der notwendige Detaillierungsgrad der Produktgestalt hängt von den genutzten Produktionsprozessen ab. Auf der Merkmalebene unterscheiden sich die Produktionsprozesse eines Produkts häufig, beispielsweise wenn eine Oberfläche gefräst und ein Loch gebohrt wird. Je nach Fall kann eine Beschreibung der Produktionsprozesse bis auf die jeweiligen Wirkflächen zielführend sein, beispielsweise, wenn nur gewisse Wirkflächen sandgestrahlt werden. Das Verfahrensprinzip umfasst verschiedene Produktionsverfahren wie Fräsen, Bohren oder Gießen, die Prozessbeschreibung beschreibt diese detaillierter (z.B. Gleichlaufräsen vs. Gegenlaufräsen). Die Spalte Maschine enthält Informationen über die verwendete Maschine und die Werkzeuge. Die Parameter mit deren Werten bilden die detailliertesten Prozessinformationen ab. Beispiele hierfür sind Vorschub, Drehzahl oder die Prozesstemperatur. In der letzten Spalte werden alternativ mögliche Produktionsprozesse aufgeführt. (Albers, Stürmlinger et al., 2019; Wang, 2018)

Tabelle 6.3: Beschreibung der Prozesse zur Produktion eines Produkts, nach Wang (2018) und Albers, Stürmlinger et al. (2019)

Prozessebene								
Komponente	Merkmal	Wirkfläche	Verfahrens- prinzip	Prozess- beschreibung	Maschine	Parameter	Wert	Alt.
Komponente 1	Merkmal 1	Wirkfläche 1						
		Wirkfläche 2						
	Merkmal 2	Wirkfläche 3						
		Wirkfläche 4						
Komponente 2	Merkmal 1	Wirkfläche 5						
		Wirkfläche 6						
	Merkmal 2	Wirkfläche 7						
		Wirkfläche n						

#### 6.2.1.4 Zusammenhänge zwischen den Ebenen Produktfunktion, -gestalt und Produktionsprozesse

Bei jeder Änderung innerhalb der Funktions-, Gestalt- oder Produktionsprozess-ebene können weitere Änderungen innerhalb dieser oder in den anderen Ebenen auftreten. Da in der Prozessebene die Prozesse direkt den Gestaltmerkmalen zugeordnet werden und in der Gestaltebene aufgeführt wird, welche Funktionen durch die Gestaltmerkmale erfüllt werden, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen allen drei Ebenen. Somit sind durch die Erfassung der Informationen in allen drei Ebenen Zusammenhänge zwischen Produktfunktionen, Produktgestalt und Produktionsprozessen modelliert. Um dies darzustellen, sind in Abbildung 6.2 die Tabellen der drei Ebenen gemeinsam dargestellt. Die Durchgängigkeit führt im abgebildeten Beispiel von den Teil- und Unterfunktionen über die Gestaltmerkmale bis hin zu den Produktionsprozessen mit ihren Parametern.

Funktionsebene											
Teilfunktion 1											
ID	Unterfunktion	Wirkprinzip	HF/NF	Eingangszustand			Ausgangszustand			Alternative Wirkprinzipien	
				Information	Energie	Stoff	Information	Energie	Stoff		
F <sub>11</sub>	Unterfunktion 1										
F <sub>12</sub>	Unterfunktion 2										

Gestaltebene											
Unterfunktion	Komponente	Merkmal	WF	Mat.	Unabhängige Attribute	Ausprägung	Krit.	Ab. Att.	A <sub>1</sub>	A <sub>n</sub>	
Unterfunktion	Komponente 1	Merkmal 1			Attribut 1			A <sub>a1</sub>			
					Attribut 2			A <sub>a2</sub>			
		Merkmal 2			Attribut 3			A <sub>a3</sub>			
					Attribut 4			A <sub>a4</sub>			

Prozessebene									
Komponente	Merkmal	Wirkfläche	Verfahrensprinzip	Prozessbeschreibung	Maschine	Parameter	Wert	Alt.	
Komponente 1	Merkmal 1	Wirkfläche 1							
		Wirkfläche 2							
	Merkmal 2	Wirkfläche 3							
		Wirkfläche 4							
Komponente 2	Merkmal 1	Wirkfläche 5							
		Wirkfläche 6							
	Merkmal 2	Wirkfläche 7							
		Wirkfläche n							

Abbildung 6.2: Zugeordnete Funktionen, Gestaltmerkmale und Produktionsprozesse

## 6.2.2 Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen an Referenzsystemelementen

Durch das PPCD lassen sich, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, Entwicklungsaufwände in die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung verschieben und damit Kosten sparen. Durch die bereits erwähnten steigenden Individualisierungswünsche der Kunden, wachsende Anforderungen an die Time-to-Market und damit einhergehenden kürzeren Entwicklungszeiten und eine Vielzahl an parallel existierenden Lösungen für die Erfüllung ähnlicher Produktprofile, steigen die Bedarfe an flexible, aber gleichzeitig produktive Produktionssysteme. Ein wichtiger Enabler für solche Produktionssysteme sind Technologien, die Industrie 4.0-Funktionen erfüllen. Diese können in der Entwicklung von Produkt und Produktionssystem auf die beiden in den Kapiteln 4.3 und 4.4 definierten Arten „Design with Industrie 4.0“ und „Design for Industrie 4.0“ berücksichtigt werden.

### 6.2.2.1 Methodik für Design with Industrie 4.0

Durch in die Produktionssysteme integrierte Sensorik stehen in modernen Unternehmen viele Daten aus der Produktion zur Verfügung. Häufig werden bestehende Produktionssysteme durch zusätzliche Sensorik erweitert, um mehr wertvolle Prozessdaten zu erhalten. Stürmlinger et al. (2018) beschreiben, wie Produkt- und Produktionssystementwickler unterstützt werden, die richtigen (Industrie 4.0-) Daten zu identifizieren, die beim Erreichen eines bestimmten Entwicklungsziels von Nutzen sind.

Um die verfügbaren Maschinendaten nach ihrer Bedeutung für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration oder Produktionssystemevolution zu priorisieren und damit die Generierung bzw. Auswahl von Daten zu unterstützen, ist ein Prozessmodell notwendig, das die Entwicklung der Produktgeneration ganzheitlich abbildet und eine präzise Zuordnung der Prozessdaten zu den Entwicklungsaktivitäten ermöglicht. Hierbei wurde sich für das iPeM als Basis entschieden, da das detaillierte Handlungssystem samt der Aktivitäten der Produktentstehung eine exakte Zuordnung von Prozessartefakten, in diesem Fall Sensor- und Maschinendaten, ermöglicht. (Stürmlinger et al., 2018)

Für die Identifikation relevanter Daten für bestimmte Entwicklungsziele wurde das in Abbildung 6.3 dargestellte Vorgehen entwickelt.

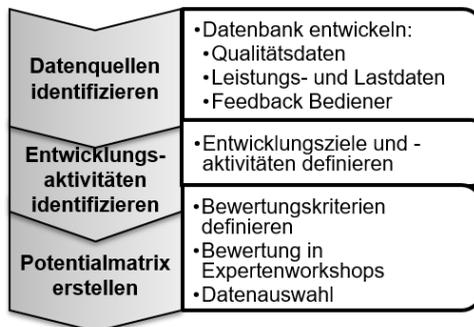


Abbildung 6.3: Vorgehen zur Identifikation relevanter Industrie 4.0 Daten (Stürmlinger et al., 2018)

Im ersten Schritt ist es für den Produktionssystementwickler notwendig, zu analysieren, welche Daten aktuell vorhandenen sind und welche zusätzlich - beispielsweise durch die Integration weiterer Sensoren - erhoben werden können, durch deren Auswertung der Produktentstehungsprozess optimiert werden kann. Diese

Daten können Qualitätsdaten des Produkts, Leistungs- und Betriebsdaten des Produktionssystems oder Daten sowohl der Produktnutzer als auch der Maschinenbediener sein. Diese Daten können in Laborversuchen, in der Serienproduktion oder aus internen oder externen bestehenden Datenbanken erhoben werden. Ingenieure müssen dann die Produktentstehungsaktivitäten identifizieren, in die die Daten eingebracht werden sollen. Innerhalb dieser Produktentstehungsaktivitäten können schließlich Entwicklungsziele definiert werden. Dies kann durch Literaturrecherche, Kreativitätsmethoden oder Workshops mit externen Experten geschehen. Entwicklungsziele können prinzipiell alle Elemente des Objektsystems betreffen, also physische Objekte, aber auch Daten, Softwaretools und ähnliches. In der Aktivität „Prinzip und Gestalt modellieren“ kann ein Entwicklungsziel beispielsweise die verbesserte Auslegung von Werkzeugen und Maschinenteilen durch das Nutzen von Last- und Verschleißdaten aus dem Produktionsprozess sein. Ein anderes Entwicklungsziel in derselben Aktivität wäre die Anpassung des Produktdesigns auf Basis von Sensordaten aus der Maschine. Die Entwicklungsziele in Design with Industrie 4.0 betreffen also sowohl das Produkt, als auch das Produktionssystem. (Stürmlinger et al., 2018)

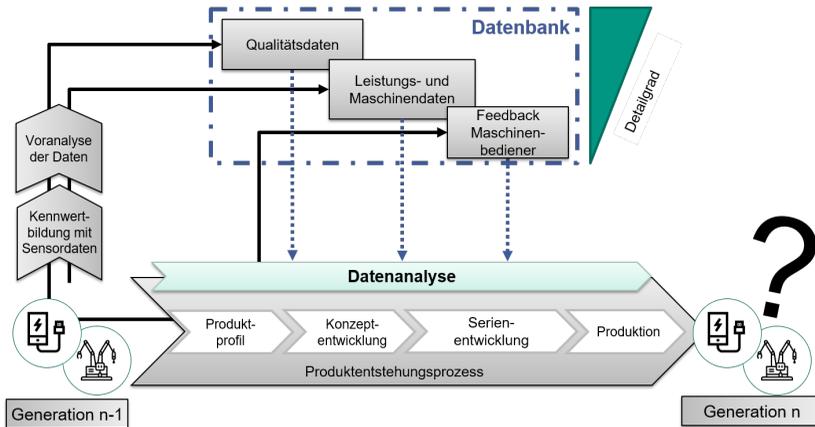


Abbildung 6.4: Framework zu Design with Industrie 4.0. Daten aus dem Referenzsystem werden zu Kennwerten verdichtet und voranalysiert in einer Datenbank, bestehend aus Qualitäts-, Leistungs-, Maschinendaten und Feedbacks des Maschinenbedieners oder Nutzers, abgelegt. Diese fließen je nach Entwicklungsziel in verschiedene Phasen des hier vereinfacht dargestellten PEP und werden zur Entwicklung der nächsten Generation des Produkts oder Produktionssystems genutzt. (nach Stürmlinger et al., 2018)

Nach der Identifizierung der wichtigsten Aktivitäten und Entwicklungsziele werden die Experten der Unternehmen, welches das Produktionssystem entwickeln, identifiziert, die für deren Umsetzung verantwortlich und relevant sind. Mit diesen Experten wird ein Workshop durchgeführt, in dem Bewertungskriterien sowohl für die Entwicklungsziele als auch für die Daten definiert werden. Für die Bewertung der Daten ist ausschlaggebend, wie viele Daten insgesamt und wie viele unterschiedliche Arten von Daten für das jeweilige Entwicklungsziel benötigt werden. Diese Bewertung, auf deren Grundlage die verschiedenen Ideen weiterentwickelt werden, bildet die Grundlage für die in Abbildung 6.5 dargestellte eine Entwicklungs-Potenzial-Matrix. (Stürmlinger et al., 2018)

Entwicklungspotentialmatrix für Industrie 4.0	Entwicklungsziel 1	Entwicklungsziel 2	Entwicklungsziel ...	Entwicklungsziel n
Profile finden				
Ideen finden				
Prinzip und Gestalt modellieren				
Produzieren				
Produktentstehungsaktivität n				
Benötigte Datenmenge				
Sensordaten				
Maschinendaten				
Kunden-/Nutzerdaten				
Potentielle Störgrößen				
Summe Nutzen				
Summe Aufwand				
Finale Bewertung				

Abbildung 6.5: Entwicklungspotentialmatrix für Design with Industrie 4.0 (basierend auf Stürmlinger et al., 2018). Die Wichtigkeit von Entwicklungszielen (blau) wird für jede relevante Produktentstehungsaktivität von 0 bis 3 bewertet, der dafür notwendige Datenaufwand (türkis) von - - (Daten nicht benötigt) bis + + (Rohdaten in vollem Umfang benötigt). Aufwand und Nutzen werden schließlich gegenübergestellt.

Der Übersichtlichkeit wegen sind nur vier Produktentstehungsaktivitäten in der Matrix dargestellt, diese können je nach Bedarf durch weitere Aktivitäten gemäß des iPeM ergänzt werden. Insbesondere die Aktivität „Verifizieren und Validieren“ ist häufig von großer Bedeutung. Zu den zuvor genannten Datenquellen werden noch potenzielle Störgrößen in der Datenerhebung als weiterer Bewertungsfaktor hinzugezogen. Dies können Umwelt- bzw. Umgebungseinflüsse sein, die potenziell Daten verfälschen oder auch unbekannte physikalische Sachverhalte und Abhängigkeiten, die die Nutzung von Daten oder das Erreichen von Entwicklungszielen erschweren.

Die Wichtigkeit der Entwicklungsziele, in Abbildung 6.5 blau dargestellt, kann von den Experten von 0 (unwichtig) bis 3 (sehr wichtig) bewertet werden. Dabei kann

ein Entwicklungsziel in einer Produktentstehungsaktivität eine geringe, in einer anderen Produktentstehungsaktivität jedoch eine hohe Wichtigkeit besitzen. Beispielhaft sei als konkretes Entwicklungsziel in Form eines Elements des Objektsystems bei der Batterieentwicklung die Erstellung eines Simulationsmodells für das Thermomanagement der Batterie genannt. Dieses hat eine sehr hohe Wichtigkeit in den Produktentstehungsaktivitäten „Ideen finden“ und „Prinzip und Gestalt modellieren“, eine etwas geringere Bedeutung in der Aktivität „Profile finden“ und kaum Bedeutung für die Aktivität „Produzieren“. (Stürmlinger et al., 2018)

Die in Abbildung 6.5 türkis dargestellten Datenquellen bzw. datenbezogene Informationen beschreiben, welche Daten in welcher Menge und in welchem Detaillierungsgrad für das Erreichen der Entwicklungsziele vorhanden sein müssen. Nach (Stürmlinger et al., 2018) werden die datenbezogenen Informationen in 5 Schritten von „- -“, bis „+ +“ bewertet. Das Symbol „- -“, bedeutet, dass die bewerteten Daten für die Entwicklung der jeweiligen Methode unwichtig bzw. nicht von Belang sind. „0“ bedeutet, dass die Daten von Bedeutung sind, es reicht jedoch aus, die Daten auf einen charakteristischen Kennwert – wie beispielsweise einen Mittelwert oder Median – zu reduzieren. Im Gegensatz dazu steht „+ +“ für sehr wichtige Daten, die in ihrem vollen Detaillierungsgrad und Umfang (Rohdaten) verfügbar sein müssen.

Auf der Grundlage dieser Methode können die Ingenieure einen Versuchsplan aufstellen und den technischen Aufwand für die Umsetzung der Entwicklungsziele auf der Grundlage von Industrie 4.0-Daten abschätzen (Stürmlinger et al., 2018). Die notwendigen Daten können meist nur in produzierenden Unternehmen gewonnen werden, da oft große Datenmengen bzw. eine hohe Anzahl an Versuchen – die auch während der Serienproduktion stattfinden können – notwendig ist. Sollen Daten sowohl vom Hersteller bzw. Entwickler eines Produktionssystems als auch vom Nutzer dieses Produktionssystems zur Herstellung eines entwickelten Produkts genutzt werden, besteht die Herausforderung darin herauszufinden, welche Daten in welchem Detaillierungsgrad übertragen werden können und dürfen. Beispielsweise können die in einem Produktionsprozess verwendeten Materialien mit der vollständigen und genauen Spezifikation (Durchmesser, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, ...), die eine „+ +“ Bewertung darstellt, kommuniziert werden oder die Informationen können vage sein (Bewertung: -) und nur eine Toleranz der Zugfestigkeit des Materials enthalten, um das Know-How eines der Stakeholder zu schützen. Die Entscheidung, welche Daten übertragen werden dürfen, sind unternehmensspezifisch und hängen von verschiedenen Faktoren wie der Geheimhaltung oder spezifischen Kundenbeziehungen ab. Hierauf wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen.

Nach (Stürmlinger et al., 2018) ist ein weiterer wichtiger Punkt, um die Erreichbarkeit eines Entwicklungsziels zu bewerten, die hierfür erforderliche Vielfalt und Menge an Daten. Der Unterschied zwischen dem Datenaustausch in einem kurzfristigen Projekt oder einer langfristigen Zusammenarbeit muss bei der Diskussion über die Umsetzung bestimmter Entwicklungsziele berücksichtigt werden. Zum Beispiel ist es möglich, einen digitalen Zwilling eines Produktionsprozesses für einen bestimmten Satz von Parametern zu erstellen, indem die Daten dieses einzigartigen Prozesses überwacht und korreliert werden. Die Struktur des einfachen digitalen Zwillings kann die Grundlage für einen erweiterten digitalen Zwilling sein, der den Einfluss verschiedener Parameter vorhersagen kann. Um diesen zu entwickeln, sind mehr Daten aus verschiedenen Produktionsprozessen notwendig, was folglich den Entwicklungsaufwand deutlich erhöht.

Die Umsetzung der Methode anhand eines industriellen Beispiels unter Einbeziehung eines Produktionssystementwicklers und dem Nutzer des Produktionssystems ist in Kapitel 7.2 beschrieben.



## 7 Initiale Anwendung der Methode

Das im vorigen Kapitel entwickelte Vorgehensmodell soll die Basis zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage bilden, indem das Vorgehen sowie Teilmethoden den Produktentwickler im PPCD unterstützen. Die initiale Anwendung der vorgestellten Methoden wird den Nutzen, sowie weitere Bedarfe aufzeigen, wie die Methode weiterentwickelt werden soll.

### 7.1 Methodische Analyse und Auswahl eines Auto-identifikationssystems in der Antriebskegelradproduktion

In der Zahnradfertigung eines Automobilherstellers werden jährlich 2,4 Millionen Getriebesätze produziert. Darüber hinaus gibt es eine hohe Variantenvielfalt mit mehr als 50 verschiedenen Übersetzungen und Größen. Hohe Qualitätsanforderungen und die Erstellung eines Regelkreises in der Produktion erfordern dabei den Einsatz eines Auto-identifikationssystems (Auto-ID System). (Stürmlinger et al., 2019) In diesem Beispiel wird die Analyse des Referenzsystems<sup>1</sup> durchgeführt und die Wechselwirkungen der Referenzelemente betrachtet. Auf Basis der Analyse des Referenzsystems wird schließlich ein geeignetes Auto-ID System ausgewählt. Dabei gilt es beim Automobilhersteller folgende Randbedingungen zu beachten:

- Das auf dem Markt und in der Produktion befindliche Referenzprodukt darf für den Einsatz des Auto-ID Systems nicht verändert werden.
- Auf dem Markt befinden sich zahlreiche Varianten des Referenzprodukts.
- Die Nachverfolgbarkeit des Produkts soll innerhalb der hauseigenen Produktion gewährleistet werden und die Produktionsdaten der jeweiligen Produktinstanz zuordenbar sein.

---

<sup>1</sup> Für die Referenzelemente können auf Grund der Geheimhaltungsvereinbarung des industriellen Anwendungsfalls keine exakten Attribute wie beispielsweise Maße, Toleranzen, Materialien oder Fertigungsparameter angegeben werden.

- Anpassungen am Produktionssystem sind nur durchführbar, wenn dadurch die Qualität bzw. das Ergebnis des Referenzproduktionssystems nicht beeinträchtigt werden.

### 7.1.1 Analyse der Referenzprodukte als Elemente des Referenzsystems

Bei den Referenzprodukten als Teil des Referenzsystems handelt es sich um ein Antriebskegelrad und um das damit zu paarende Tellerrad. Diese werden jeweils in unterschiedlichen Varianten produziert. Im Zuge einer bestehenden Geheimhaltungsvereinbarung und teilweise veröffentlichten Daten wird im Folgenden nur auf das in Abbildung 7.1 abgebildete Antriebskegelrad (AKR) eingegangen.

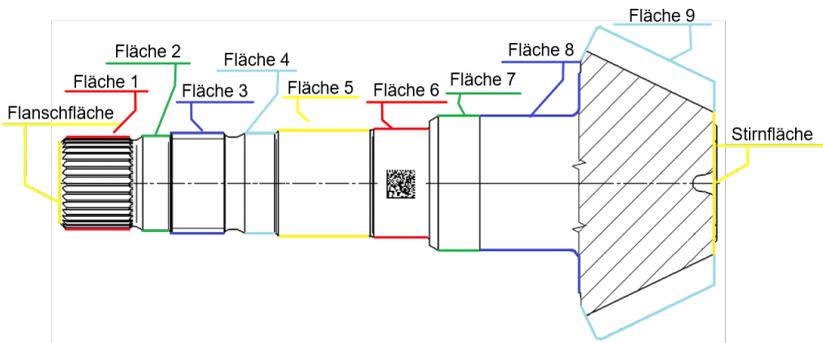


Abbildung 7.1: Produktmerkmale des untersuchten Antriebskegelrads (Comak, 2018)<sup>2</sup> und (Stürmlinger et al., 2019)

Wie in der initialen Methodenbeschreibung beschrieben, werden im ersten Schritt die Produktfunktionen analysiert und modelliert, um diese anschließend den jeweiligen Produktmerkmalen zuzuordnen. Es werden nur ausgewählte Funktionen betrachtet um die Übersichtlichkeit des Anwendungsfalls zu wahren. Der Funktionsbaum des Antriebskegelrads stellt sich wie folgt dar:

---

<sup>2</sup> Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

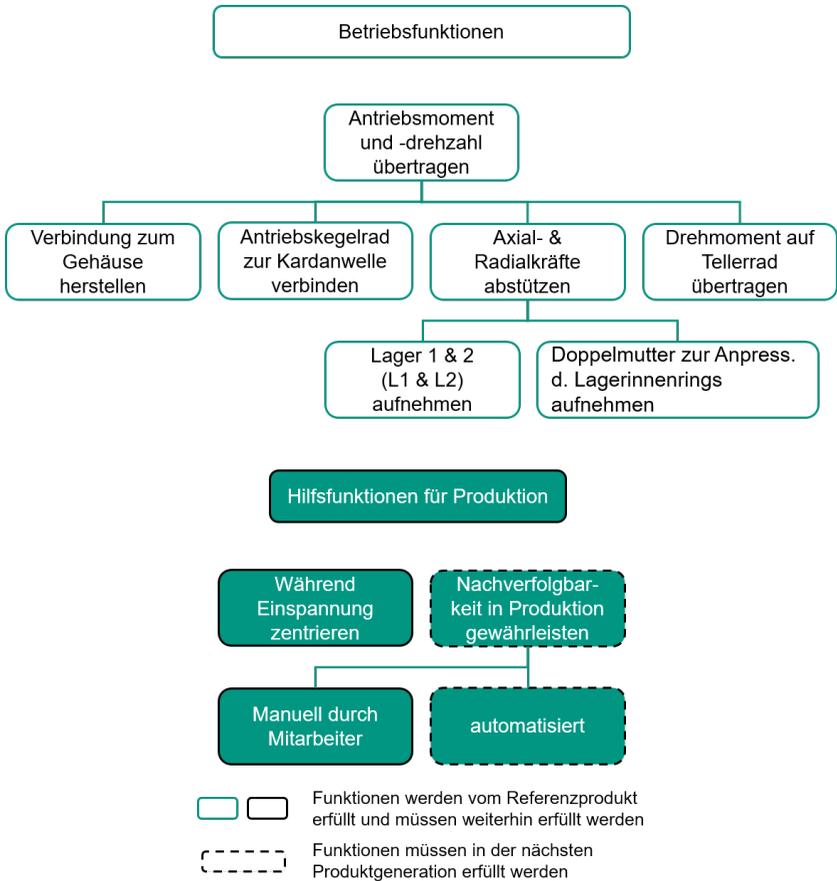


Abbildung 7.2: Funktionsbaum des Antriebskegelrads, aufgeteilt in Betriebsfunktionen (Hauptfunktionen) und Hilfsfunktionen für die Produktion. Gestrichelt umrandete Funktionen, die in der nächsten Produktgeneration erfüllt werden müssen, wurden von den Produkt- und Produktionssystementwicklern des Automobilherstellers definiert.

Diese Funktionen werden nach der in Kapitel 6.2.1.1 entwickelten Vorlage ausdetailliert.

Tabelle 7.1: Detaillierte Informationen über ausgewählte Betriebsfunktionen und deren Unterfunktionen des Antriebskegelrads

Funktionsebene											
Antriebsmoment und -drehzahl übertragen											
ID	Unterfunktion	Wirkprinzip	HF/ NF	Eingangszustand			Ausgangszustand			Alternative Wirkprinzipien	
				Information	Energie	Stoff	Information	Energie	Stoff		
F <sub>H1</sub>	Antriebskegelrad mit Kardanwelle verbinden	Kraft- und Formschluss	HF	Position	M <sub>E</sub> , n <sub>E</sub>	-	Position	M <sub>A</sub> , n <sub>A</sub>	-	-	
F <sub>H2</sub>	Axial- & Radialkräfte abstützen	Kraft- und Formschluss	HF	Position	F <sub>a,E</sub> , F <sub>r,E</sub>	-	Position	F <sub>a,A</sub> , F <sub>r,A</sub>	-	Magnetismus	
F <sub>H3</sub>	Drehmoment auf das Teillrad übertragen	Kraft- und Formschluss	HF	Winkel	M <sub>E</sub> , n <sub>E</sub>	-	Winkel	M <sub>A</sub> , n <sub>A</sub>	-	-	
F <sub>H4</sub>	Verbindung zum Gehäuse herstellen	Kraftschluss	HF	Position	F <sub>a,E</sub> , F <sub>r,E</sub> , M <sub>E</sub>	-	Position	F <sub>a,A</sub> , F <sub>r,A</sub> , M <sub>A</sub>	-	Formschluss, Stoffschluss	
Kräfte und Drehmomente abstützen											
ID	Unterfunktion	Wirkprinzip	HF/ NF	Eingangszustand			Ausgangszustand			Alternative Wirkprinzipien	
				Information	Energie	Stoff	Information	Energie	Stoff		
F <sub>H2.1</sub>	L1 aufnehmen	ZPV	HF	Position	F <sub>a,E</sub> , F <sub>r,E</sub>	-	Position	F <sub>a,A</sub> , F <sub>r,A</sub>	-	Hydrodyn.	
F <sub>H2.2</sub>	L2 aufnehmen	ZPV	HF	Position	F <sub>a,E</sub> , F <sub>r,E</sub>	-	Position	F <sub>a,A</sub> , F <sub>r,A</sub>	-	Hydrodyn.	
F <sub>H2.3</sub>	Doppelmutter aufnehmen	Übergangspassung	HF	Position	F <sub>a,E</sub>	-	Position	F <sub>a,A</sub>	-	Kraftschluss	

Tabelle 7.2: Detaillierte Informationen über ausgewählte Hilfsfunktionen für die Produktion und deren Unterfunktionen des Antriebskegelrads

Funktionsebene											
Hilfsfunktionen für Produktion bereitstellen											
ID	Unterfunktion	Wirkprinzip	HF/ NF	Eingangszustand		Ausgangszustand		Alternative Wirkprinzipien			
				Informa- tion	Energie	Informa- tion	Energie		Stoff	Stoff	
F <sub>N1</sub>	Während Einspannung zentrieren	Formschluss	NF	Position	-	Position	-	-	-	-	Kraftschluss
F <sub>N2</sub>	Nachverfolgbar- keit in der Produktion gewährleisten	AbleSEN, Scan	NF	ID, Informa- tionen	-	ID, Informa- tionen	-	-	-	-	Chip auslesen
Nachverfolgbarkeit in der Produktion gewährleisten											
ID	Unterfunktion	Wirkprinzip	HF/ NF	Eingangszustand		Ausgangszustand		Alternative Wirkprinzipien			
				Informa- tion	Energie	Informa- tion	Energie		Stoff	Stoff	
F <sub>N2.1</sub>	Manuelle Identifikation ermöglichen	Klarschrift (OCR)	NF	ID	-	Position	-	-	-	-	-
F <sub>N2.2</sub>	Automatisiertes scannen ermöglichen	Data Matrix Code	NF	ID, Informa- tionen	-	ID, Informa- tionen	-	-	-	-	RFID Chip, Fingerprint

Die beschriebenen Funktionen werden nun den in Abbildung 7.1 markierten Produktmerkmalen zugeordnet. Es ist zu beachten, dass zur Erfüllung einer Funktion immer zwei durch LSS miteinander verbundene WFP, mit jeweils einem Connector vorhanden sein müssen. Im hier untersuchten Anwendungsfall liegt jedoch nur das

AKR innerhalb der betrachteten Systemgrenze, andere Komponenten wie Lager, Gehäuse oder das Abtriebstellerrad wurden nicht untersucht. In der Beschreibung der Gestalzebene ist den aufgeführten Funktionen somit jeweils nur ein Gestaltmerkmal zugeordnet. Da sich die einzelnen Produktionsschritte auf Gestaltmerkmale beziehen, sind diese nicht noch weiter in Wirkflächen zu unterteilen. Da es sich beim AKR nicht um Multi-Material-Design (MMD) handelt, bestehen alle Gestaltmerkmale aus demselben Material. Es wurden exemplarische Attribute zur Beschreibung der einzelnen Gestaltmerkmale ausgewählt, da eine tiefere Betrachtung dieser für diesen Anwendungsfall nicht notwendig ist. Gleichsam können keine Zahlenwerte für diese Attribute genannt werden.

Tabelle 7.3: Informationen der den aufgeführten Funktionen zugeordneten Gestaltungsmerkmale

Gestaltebene			
Unterfunktion	Komponente	Merkmal	Mat.
F <sub>H1</sub> Antriebskegelrad mit Kardanwelle verbinden	Antriebskegelrad	Fläche 1 - Verzahnung	Stahl
F <sub>H4</sub> Verbindung zum Gehäuse herstellen		Fläche 3 – Gewinde	Stahl
F <sub>H2.3</sub> Doppelmutter zur Anpress. d. Lagerinnenrings aufnehmen		Fläche 4 – zyl. Fläche	Stahl
F <sub>H2.1</sub> Lager 1 aufnehmen		Fläche 5 – zyl. Fläche	Stahl
F <sub>H2.2</sub> Lager 2 aufnehmen		Fläche 8 – zyl. Fläche + Anschlag	Stahl
F <sub>H3</sub> Drehmoment auf das Tellerrad übertragen		Fläche 9 – Verzahnung	Stahl
F <sub>N1</sub> Während Einspannung zentrieren		Flansfläche – Zentrierspitze	Stahl
F <sub>N2.1</sub> Manuelle Identifikation ermöglichen		Fläche 6 – Klarschrift OCR	Stahl
F <sub>N2.2</sub> Automatisiertes Scannen ermöglichen		Fläche 6 – DMC	Stahl
			Unabhängige Attribute
		Teilkreisdurchmesser	
		Zahnbreite	
		Modul	
		Gewindesteigung	
		Durchmesser	
		Planlauf	
		Oberflächenrauheit	
		Durchmesser	
		Oberflächenrauheit	
		Durchmesser	
		Oberflächenrauheit	
		Teilkreisdurchmesser	
		Zahnbreite	
		Modul	
		Tiefe	
		Konizität	
		Kontrast	
		Schriftgröße	
		Kontrast	
		Dekodierbarkeit	

Die Funktionen und die zugehörigen Gestaltelemente des AKR sind mit drei Ausnahmen nun tabellarisch beschrieben. Außen vor gelassen wurden in der Beschreibung die Flächen 2 und 7, sowie die Stirnfläche des AKR. Die Flächen 2 und 7 sind kurze, abgesetzte Wellenabschnitte, die das Aufschieben der Lager vereinfachen.

Die Stirnfläche erfüllt je nach Produktvariante unterschiedliche Funktionen: Teilweise wird durch sie eine Bohrung eingebracht, um das Gewicht des AKR zu reduzieren. Andererseits wird hier ein Montagering angebracht und die Aufspannung und der Antrieb im Drehprozess vorgenommen.

### 7.1.2 Analyse der Elemente des Referenzproduktionssystems

Nach der Analyse der Referenzprodukte als Teil des Referenzsystems werden die produktionsseitigen Referenzsystemelemente analysiert. Der Fokus liegt hier insbesondere auf den Produktionsprozessen. Verwendete Werkzeuge und Maschinen können auf Grund des industriellen Anwendungsfalls nicht erläutert werden. Die Produktion des Antriebskegelrads kann, wie in Abbildung 7.3 dargestellt, in mehrere Schritte unterteilt und wie folgt beschrieben werden:

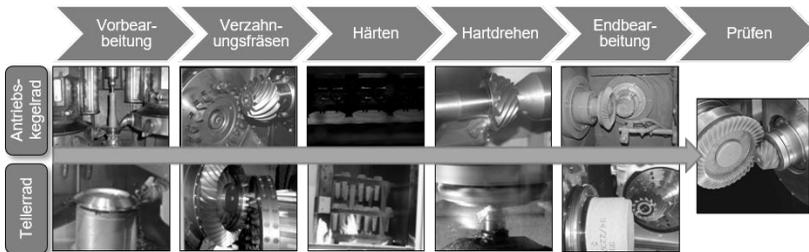


Abbildung 7.3: Vereinfachte Fertigungsschritte in der Antriebskegel- und Tellerradfertigung. Darstellung von Stürmlinger et al. (2019) in Anlehnung an Koller und Hardjosuwito (2015)

Nach der Eingangskontrolle des Rohmaterials werden die Teile vorbearbeitet, was eine genauere Handhabung in den nachfolgenden Bearbeitungsschritten ermöglicht. Am Ende der Vorbereitung wird auf jedes Teil ein Data Matrix Code (DMC) zur Identifikation angebracht. Dieser wird jedoch nur nach dem Weichdrehen und der finalen Qualitätsprüfung ausgelesen. Im nächsten Schritt werden die Zähne der Zahnräder gefertigt. Nun wird der weichbearbeitende Teil der mechanischen Fertigung abgeschlossen. Nach der Wärmebehandlung beginnt der Hartbearbeitungsteil der Zahnradproduktion mit dem Hartdrehen, durch das alle Funktionsflächen wie z.B. Lagersitze bearbeitet werden. Je nach Zahnradkonstruktion werden unterschiedliche Fertigungsverfahren wie Läppen oder Schleifen, oder eine Kombination aus Schleifen und Struktur läppen eingesetzt. Abschließend werden alle Radsätze anhand ihres Übertragungsfehlers und einer optischen Vermessung des Tragbildes bewertet. Aufgrund der akustischen und wirtschaftlichen Vorteile gegenüber ande-

ren Endbearbeitungsverfahren für Zahnradsätze werden mehr als 90% aller Zahnradsätze geläppt. Während des Läppvorgangs stehen Zahnrad und Ritzel mit niedrigem Drehmoment und mittlerer Drehzahl in Kontakt miteinander. Durch eine Zusammensetzung aus Öl und Siliziumkarbid in der Kontaktzone wird ein Materialabtrag zur Optimierung der Mikrostruktur des Zahnradsatzes erreicht. Es bestehen jedoch Herausforderungen für eine Serien-Zahnradproduktion mit Läppen als Endbearbeitungsverfahren. Aufgrund des geringen absoluten Materialabtrags ist der Einfluss auf die Qualität nach dem Läppen begrenzt. Daher ist bereits vor dem Läppen ein qualitativ hochwertiger Zahnradsatz erforderlich. Um die Qualität der Produktion zu optimieren, werden die Läppparameter kontinuierlich angepasst. Diese Anpassungen sind erforderlich, um zum Beispiel Verzüge der Zahnradsätze durch die Einsatzhärtung zu eliminieren, die sich durch unterschiedliches Rohmaterial verändern. (Comak, 2018)<sup>3</sup> und (Stürmlinger et al., 2019)

Die beschriebenen Fertigungsprozesse sind in Tabelle 7.4 aufgeführt und den Gestaltmerkmalen des AKR zugeordnet. Es sind nicht alle Parameter der Fertigungsprozesse aufgeführt, ebenso wenig dürfen die Werte dieser Parameter und die Werkzeuge und Maschinen, mit denen diese gefertigt werden, genannt werden. Die Fertigungsschritte Härten und Strahlen, mit denen das gesamte AKR bearbeitet wird, sind aus Platzgründen nicht in der Tabelle aufgeführt. Da beim Härten hohe Prozesstemperaturen auftreten und beim Strahlen die Oberfläche des AKR verändert wird, haben diese beiden Prozesse einen großen Einfluss auf ein mögliches Auto-ID System.

---

<sup>3</sup> Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Tabelle 7.4: Fertigungsprozesse der jeweiligen Gestaltmerkmale des AKR

Prozessebene			
Komponente	Merkmal	Verfahrensprinzip	Parameter
AKR	Fläche 1 – Verzahnung	Weichdrehen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugform
		Kaltwalzen	Walzkraft, Werkzeugform
	Fläche 3 – Gewinde	Kaltwalzen	Walzkraft, Werkzeugform
		Weich- und Hartdrehen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugform
	Fläche 4 – zyl. Fläche	Weich- und Hartdrehen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugform
		Richten	Richtkraft und -weg
	Fläche 5 – zyl. Fläche	Einspannung im Drehprozess	Spannkraft
		Weich- und Hartdrehen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugform
	Fläche 8 – zyl. Fläche + Anschlag	Werkstückaufnahme (Handhabung)	Greifkraft, Werkzeuggestalt
		Einspannung im Drehprozess	Spannkraft
	Fläche 9 – Verzahnung	Verzahnungsfräsen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugform
		Läppen	Korngröße, Bearbeitungsdauer
	Flanschfläche – Zentrierspitze	Hartdrehen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugart
		Werkstückaufnahme (Handhabung)	Einspannkraft, Form Zentrierwerkzeug
	Fläche 6 – Klarschrift OCR & DMC	Weichdrehen	Zustellung, Vorschub, Werkzeugart
Klarschrift und DMC prägen		Prägetiefe, Prägekraft	
	Klarschrift und DMC auslesen	Belichtung, Orientierung Werkstück	

### 7.1.3 Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen

Eine 100 %-ige Teileverfolgung ermöglicht einen Regelkreis, um einerseits die Eingangsqualität der Zahnradsätze im Läppprozess zu stabilisieren und andererseits das Qualitätsergebnis der gesamten Prozesskette zu erhöhen. In der Produktion der aktuell am Markt befindlichen Produktgeneration gibt es keine Teileverfolgung der Zahnräder im gesamten Produktionsprozess, obwohl bereits ein DMC auf jedem Teil vorhanden ist. (Comak, 2018)<sup>4</sup> und (Stürmlinger et al., 2019)

#### 7.1.3.1 Grobe Auswahl des Auto-ID-Systems

Für einen erfolgreichen Wettbewerber in der Automobilindustrie ist ein effizienter Workflow über die gesamte Wertschöpfungskette unerlässlich. Auto-ID-Systeme ermöglichen die Rückverfolgbarkeit von Komponenten über den gesamten Produktlebenszyklus. Sie ermöglichen nicht nur die schnelle Identifizierung möglicher Fehlerquellen und die Auslösung gezielter Rückrufaktionen, sondern ermöglichen es dem Produktentwickler auch, Prozessdaten einfach und gezielt für Verbesserungen während der Produkt- und Prozessentwicklung zu nutzen. Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche Technologien zur Umsetzung in Betracht. Die Kriterien zur Bewertung der Auto-ID-Systeme im vorliegenden Anwendungsfall lauten nach Comak (2018) und Stürmlinger et al. (2019):

- automatische Lesbarkeit des Auto-ID-Systems,
- hohe Informationsdichte,
- Identifikationsstabilität über den gesamten Produktionsprozess,
- Widerstand gegen externe Interferenzen,
- Integrationsaufwand,
- Antwortzeit beim Lesen im Produktionsprozess,
- keine Beeinflussung der sonstigen Produktfunktionen.

Die große Bandbreite der verfügbaren Auto-ID-Systeme ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

---

<sup>4</sup> Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

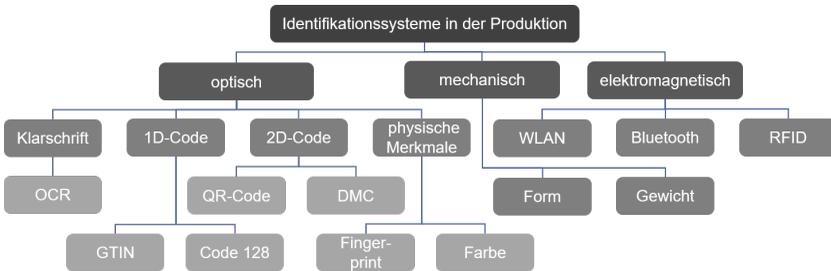


Abbildung 7.4: Übersicht über verfügbare Auto-ID-Systeme. Eigene Darstellung nach Hippenmeyer und Moosmann (2016)

Die automatische Lesbarkeit des Auto-ID-Systems kann durch verschiedene Technologien gewährleistet werden. Unter den optischen Identifikationssystemen eignen sich Klarschrift, 1D- & 2D-Codes und der Fingerprint als physisches Merkmal. Auf Grund der geringen Informationsdichte, die in der Regel nur durch Maßnahmen erhöht werden kann, die die Fehlertoleranz verschlechtern (Hompel et al., 2008, S. 56), werden 1D-Codes und die Klarschrift jedoch nicht weiter betrachtet. Unter den elektromagnetischen Auto-ID-Systemen wird nur der RFID-Chip betrachtet, da sich dieser für die Erfassung von Prozessdaten eignet, WLAN und Bluetooth dagegen allgemein zur Echtzeitortung von Objekten eingesetzt werden. Die mechanischen Verfahren eignen sich in diesem Anwendungsfall ebenfalls nicht, da Form und Gewicht der jeweilig produzierten Antriebskegelräder gleich sind bzw. nur in geringstem Maße voneinander abweichen.

### 7.1.3.2 Integration der Auto-ID-Systeme in das Produkt

Für eine detailliertere Bewertung der Auto-ID-Systeme, muss deren mögliche Integration in das Produkt untersucht werden. Der DMC benötigt für eine prozesssichere Identifikation eine Fläche von 5 x 5 mm bei Einsatz eines DMCs mit 14 Modulen. Durch eine Hohlbohrung in einigen Produktvarianten ist die Anbringung des DMC auf der Flansch- oder Stirnfläche nicht möglich, weshalb nur eine der zylindrischen Flächen als möglicher Ort für den DMC in Frage kommt. Wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben, sind nur die Flächen 2, 6 und 7 keine direkten Funktionsflächen des Antriebskegelrads. Da ein Lager bei der Montage über Fläche 7 geschoben wird und Fläche 2 eine zu kleine Fläche für die Anbringung des DMC aufweist, steht nur die bisher dafür vorgesehene Fläche 6 zur Verfügung. Diese Zusammenhänge treffen so auch für den RFID-Chip zu. Lediglich das Vorsehen einer größeren Flansch- oder Stirnfläche in der nächsten Produktgeneration, könnten ein Aufbringen des DMC oder des RFID-Chips an diesen Flächen ermöglichen. Das Fingerprint-Verfahren ist auf eine Identifikation an der Flansch- oder Stirnfläche beschränkt, da hier

über den gesamten Prozess die Gushaut und damit die Oberfläche des Rohteils nicht verändert wird.

### 7.1.3.3 Detaillierte Auswahl eines geeigneten Auto-ID-Systems

Die verbleibenden, in Frage kommenden Auto-ID-Systeme werden in Tabelle 7.5 in Bezug auf deren Anforderungen verglichen.

Tabelle 7.5: Bewertung verschiedener Auto-ID-Systeme nach vom Automobilhersteller als entscheidend eingestuften Kriterien

	Data-Matrix-Code	RFID	Fingerprint
Identifikationsstabilität im gesamten Produktionsprozess			
Widerstand gegen externe Interferenzen			
Integrationsaufwand			
Antwortzeit beim Lesen im Produktionsprozess			

Durch Tests über die gesamte Produktionsprozesskette und theoretische Betrachtungen wurde in Comak (2018) und Stürmlinger et al. (2019) die Eignung der Auto-ID-Systeme für die unterschiedlichen Anforderungen untersucht:

Die Identifikationsstabilität des Data-Matrix-Codes und des Fingerprints wird als insgesamt gut beziehungsweise sehr gut eingestuft, da diese nicht oder nur sehr wenig durch die verschiedenen Produktionsprozesse beeinflusst werden. Beim RFID-Chip konnte dies nicht gewährleistet werden, da der Chip durch den Härteprozess beschädigt wird und damit nicht mehr zu lesen ist. Als elektromagnetisches System weist der RFID-Chip auch nur einen geringen Widerstand gegen externe Interferenzen auf, währenddessen die Lesegeräte für den DMC und den Fingerprint deutlich robuster gegen diese sind. Der DMC weist einen sehr hohen Integrationsaufwand in die Produktion auf, da der Code nur an einer zylindrischen Fläche aufgeprägt werden kann. Dies bedeutet, dass an jeder Fertigungsmaschine ein zusätzliches Modul zur Orientierung des Bauteils für ein sicheres Scannen integriert werden muss. Für das Fingerprint-System sind hochauflösende, kostspielige Kameras mit dafür zu entwickelnden Algorithmen zur Datenauswertung notwendig. Die aufwendige Datenverarbeitung führt zu einer mittelmäßigen Antwortzeit beim Lesen im Produktionsprozess, wohingegen für den DMC und den RFID-Chip nur einfache Scanvorgänge notwendig sind. Gegen den Fingerprint spricht durch das Einführen

einer neuen Technik ein hoher, initialer Aufwand und dass die Technik bisher nur in einer Machbarkeitsstudie getestet wurde. Somit besteht im Unternehmen noch wenig Know-How für die neue Technologie, was ein hohes Risiko bedeutet.

### **7.1.4 Anpassung des Produktdesigns und des Produktionssystems**

Für den Einsatz des DMC zur Identifikation des AKR über alle Prozessschritte hinweg stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Aufprägung des DMC wie bisher auf Fläche 6
2. Aufprägung des DMC auf Flansch- oder Stirnseite des AKR

Für Ersteres muss wie erwähnt das Produktionssystem des AKR erweitert werden, in dem vor jedem Fertigungsschritt eine zusätzliche Anlage zur Rotation des AKR hinzugefügt wird. Somit wird sichergestellt, dass der DMC in jedem Falle erfasst werden kann.

Für Letzteres sind Gestaltvariationen am Produkt notwendig, in dem die Fläche der Flansch- oder Stirnseite vergrößert wird und somit genügend Platz für den DMC zur Verfügung steht. Eine solche Vergrößerung der Fläche hat durch die Steigerung des Gewichts, die Umstellung der Produktionsprozesse und die Wechselwirkungen mit anderen Komponenten des Antriebsstrangs wie bspw. dem Abtriebstellerrad große Auswirkungen.

## **7.2 Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen am Beispiel einer Federwindmaschine**

Nachdem in Kapitel 7.1 die Modellierung des Referenzsystems in der Antriebskegelradfertigung und darauf basierend die Auswahl eines Auto-ID-Systems gezeigt wurde, wird in diesem Abschnitt näher untersucht, wie Industrie 4.0-Potentiale im Produktentstehungsprozess identifiziert werden können. Dies stellt den nächsten Schritt des in Abschnitt 6.1 beschriebenen Vorgehensmodells dar und wird anhand eines anderen Anwendungsfalls erläutert. In einem industriellen Anwendungsfall wird die in Kapitel 6.2.2.1 entwickelte Methode genutzt, um zu identifizieren, welche Daten aus der Fertigung von Druckfedern genutzt werden können, um das aktuell genutzte Produktionssystem oder das aktuell am Markt befindliche Produkt bzw. dessen Produktentstehungsprozess zu verbessern.



Abbildung 7.5: Links: Im Anwendungsfall untersuchte Federwindmaschine (Wafios AG, 2021); Rechts: beispielhaft dargestellte Bogenfeder (Brand KG, 2020)

Das Windezentrum, das den Teil der Maschine darstellt, in der die Feder umgeformt wird, ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Hier sind mit den Nummern 122 und 124 die beiden Windestifte, sowie mit Nummer 152 das Schneidwerkzeug markiert, die im beschriebenen Anwendungsfall eine entscheidende Rolle spielen.

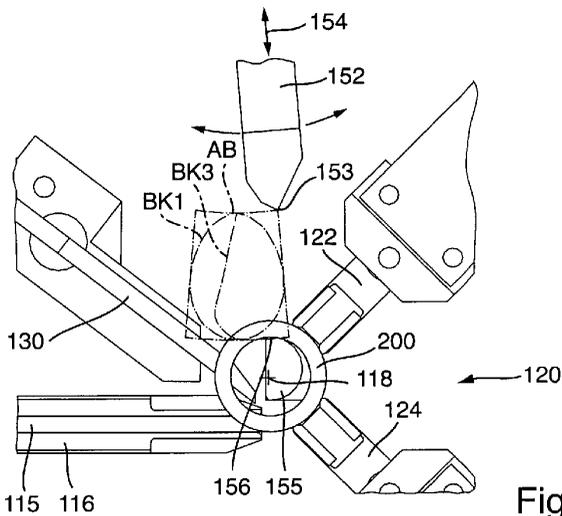


Fig. 2

Abbildung 7.6: Windezentrum einer Federwindemaschine. Der Draht (115) wird durch die Drahtführung (116) auf den ersten (124) und zweiten (122) Windestift geschoben und somit umgeformt. Die Federsteigung wird durch den Steigungskeil (130) realisiert und die Feder durch das Schneidewerkzeug (152) abgetrennt. (Sigg, 2015)

Daten aus dem Serienproduktionsprozess sind eine große Chance, die Ingenieure bei der Auslegung der nächsten Maschinengeneration zu unterstützen, da sie viele Informationen über die Nutzung der Maschine enthalten. Hierfür werden möglichst viele Daten aus der Nutzung des Produktionssystems benötigt. Für das Unternehmen, welches das Produktionssystem entwickelt, ist es nicht möglich diese große Menge an validen Daten zu sammeln, daher werden in diesem Anwendungsfall die Daten des Federn produzierenden Unternehmens verwendet. Nach der Definition der Ziele der industriellen Partner (Albers, Gladysz et al., 2016) und ersten Tests mit zusätzlichen Kraft-, Temperatur- und Körperschallsensoren zur Überwachung des Zustands der Winde- und Schneidwerkzeuge wurden Workshops mit Mitarbeitern des Produktionssystem entwickelnden Unternehmens und dem Unternehmen, das dieses Produktionssystem anwendet, durchgeführt. (Stürmlinger et al., 2018)

In diesen wurden im ersten Schritt die vorhandenen Datenquellen im Fertigungsprozess der Druckfeder identifiziert. Anschließend wurden die produktionssystem- und produktseitige Entwicklungsziele festgelegt und deren Potential in den jeweiligen

Entwicklungsaktivitäten des iPeM bewertet. Anschließend fand eine Bewertung statt, welche Daten in welchem Detaillierungsgrad und in welchen Datenmengen notwendig sind, um unterstützt durch diese Daten die Realisierung der Entwicklungsziele erreichen zu können. Schlussendlich fand eine Gegenüberstellung der Summe der Entwicklungspotentiale in den jeweiligen Entwicklungsaktivitäten mit dem Aufwand aus der notwendigen Datenerhebung statt. Diese Informationen sind in der Entwicklungspotentialmatrix für Industrie 4.0 Potentiale zusammengefasst, die in Abbildung 7.7 dargestellt ist. (Stürmlinger et al., 2018)

Folgende Entwicklungsziele wurden genannt:

- Virtuelles Federmodell im Windeprozess

Dieses stellt einen digitalen Zwilling der Federn zu jedem Zeitpunkt des Umformprozesses des Drahts dar. Damit abbildbare Umformeigenschaften wie Kräfte, Wege und Spannungen lassen in der Aktivität „Prinzip und Gestalt modellieren“ Rückschlüsse auf die Gestaltung der Feder ziehen. In der Aktivität „Produzieren“ besteht ein sehr hohes Potential in der Anpassung der Produktionsparameter. Um ein solches Modell aufzubauen, wird eine hohe Datenmenge benötigt, die insbesondere bei den Maschinendaten auch hoch aufgelöst sein müssen. Das hierfür notwendige physikalische Modell beinhaltet außerdem viele unbekannte Zusammenhänge. Dem hohen Nutzen (Summe 5) steht somit ein sehr hoher Aufwand (Summe 9) gegenüber. Eine Entwicklung des Federmodells ist somit höchstens in einer langfristigen Kooperation des Maschinenanwenders und des Maschinenherstellers umsetzbar. Profitieren können hiervon jedoch beide Partner: Der Hersteller der Federn durch die optimalere Gestaltung dieser und durch die besseren Möglichkeiten zur Einstellung der Produktionsparameter und der Entwickler der Federwindemaschine durch einen zusätzlichen Unique Selling Point in Form des digitalen Services.

- Schadensmodell der Windestifte und des Schneidewerkzeugs

Schadensmodelle der im Fertigungsprozess der Feder beteiligten Werkzeuge sind ein weiteres interessantes Entwicklungsziel für sowohl Federnhersteller als auch Entwickler des Produktionssystems. Der Fokus liegt auf den beiden Windestiften und dem Schneidewerkzeug. Erstere sind besonders relevant für den Umformprozess, weshalb ein Schadensmodell dieser als etwas relevanter eingestuft wird. Die Schadensmodelle nutzen in der Aktivität „Validieren und Verifizieren“, da die Gestalt der Werkzeuge und deren Lebensdauer besser validiert und vorhergesagt werden kann. Zudem wird validiert, ob die definierte Federngestalt langfristig mit den Werkzeugen produziert werden kann. Ein weiterer Nutzen findet sich in der Aktivität „Prinzip und Gestalt modellieren“ des Produktionssystementwicklers. Durch ein Schadensmodell ließe sich die Gestalt der Werkzeuge effizient auslegen und an die

zip und Gestalt modellieren“ des Produktionssystementwicklers. Durch ein Schadensmodell ließe sich die Gestalt der Werkzeuge effizient auslegen und an die jeweiligen Anwendungsfälle anpassen. Zu guter Letzt sind große Potentiale in der Aktivität „Produzieren“ vorhanden. Durch ein Schadensmodell lassen sich Produktionsausfälle durch eine Vorhersage des Versagens bzw. übermäßigen Verschleißes der Werkzeuge vermeiden oder zumindest verringern. Das Schadensmodell mit gekoppelter Zustandsüberwachung kann also für die vorausschauende Wartung (auch Predictive Maintenance) im Betrieb des Federnherstellers genutzt werden. Die benötigte Datenmenge und deren Detailgrad für ein Modell des Schneidewerkzeugs ist gering, da für dessen Verschleiß hauptsächlich die Draht- und Materialeigenschaften relevant sind. Der Verschleiß der Windestifte hängt von deutlich mehr Produktionsparametern ab, wie etwa dem Vorschub, und der zu produzierenden Federgeometrie. In der finalen Bewertung zwischen Nutzen und Aufwand bietet sich somit die priorisierte Entwicklung eines Schadensmodells des Schneidewerkzeugs an.

- Ableitung von Testfällen und Versuchsplänen

Ein weiteres mit den Industriepartnern diskutiertes Entwicklungsziel ist die Ableitung von effizienten Versuchsplänen und der Identifikation von Testfällen. Durch eine damit verbesserte Versuchsplanung und -durchführung entsteht ein Nutzen in der Aktivität „Validieren und Verifizieren“. Damit wird auch in der Aktivität „Prinzip und Gestalt modellieren“ profitiert, da durch die Erkenntnisse sowohl die Feder an sich, als auch die Werkzeuge des Produktionssystems besser ausgelegt werden können. Um dieses Entwicklungsziel zu erreichen, werden hauptsächlich vorhandene Maschinendaten und Anwenderdaten benötigt. Dem Nutzen steht somit ein moderater Aufwand gegenüber.

Entwicklungspotentialmatrix für Industrie 4.0		Virtuelles Federmodell im Windeprozess	Schadensmodell der Windstifte	Schadensmodell des Schneidwerkzeugs	Ableitung von effizienten Testfällen und Versuchsplänen
Validieren und Verifizieren		0	2	1	2
Prinzip und Gestalt modellieren		2	2	1	1
Prototyp aufbauen		0	0	0	0
Produzieren		3	2	2	0
Sensordaten	Benötigte Datenmenge	++	0	0	0
	Windstifttemperatur	-	0	0	--
	Umformkraft	+	0	0	--
	Luftschall	-	0	0	--
	Körperschall	-	0	0	--
Maschennendenaten	Vorschub	-	+	--	++
	Drehmoment	++	0	0	++
	Beruhigungszeit	++	--	--	-
	Korrekturwert	++	+	--	+
Anwendendaten	Werkzeugwechsel (Intervall/ Verschleiß)	++	++	++	++
	Federgeometrie	0	++	--	+
	Federmaterial	0	++	++	++
	unbekannte physik. Zusammenhänge	++		+	+
<b>Summe Nutzen</b>		5	6	4	3
<b>Summe Aufwand</b>		9	7	-3	2
<b>Finale Bewertung</b>		-4	-1	7	1

Abbildung 7.7: In Workshops mit anwendendem und herstellendem Unternehmen einer Federwindmaschine erarbeitete Entwicklungspotentialmatrix für Industrie 4.0. Während Schadensmodelle der Windstifte den größten Nutzen zeigen ist das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand beim Schadensmodell des Schneidwerkzeugs am höchsten. Nach (Stürmlinger et al., 2018)

## 7.3 Zwischenfazit nach Anwendung der Methode

Das in Kapitel 6 entwickelte Vorgehensmodell samt seiner Teilmethoden wurde in zwei industriellen Anwendungsfällen angewendet. Bei der Identifikation eines geeigneten Auto-ID-Systems in der Antriebskegelradfertigung wurden dabei insbesondere das Referenzprodukt AKR als Teil des Referenzsystems und die zugehörigen Elemente des Referenzproduktionssystems – modelliert und darauf basierend die Abhängigkeiten zwischen Produkt, Produktionssystem und der neu hinzuzufügenden Industrie 4.0 Technologie bewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass die tabellarischen Vorlagen der Ebenen Produktfunktion, Produktgestalt und Produktionsprozesse helfen, wichtige Informationen der Referenzsystemelemente zu erfassen und direkte Abhängigkeiten zu erkennen. Es zeigt sich, dass die Modellierung des Referenzsystems bereits einen direkten Beitrag zu **Design for Industrie 4.0** leistet: Sollen Variationen am Produkt oder Produktionssystem durchgeführt werden, etwa durch die Einführung einer neuen Industrie 4.0 Technologie, ist durch die modellierten Zusammenhänge der Referenzsystemelemente ersichtlich, welche Elemente des Referenzsystems variiert werden müssen, um die Einführung dieser Technologie zu ermöglichen. Am Beispiel des AKR wurden durch die Modellierung des Referenzsystems zwei mögliche Alternativen deutlich:

1. Das Hinzufügen von Anlagen vor jedem Produktionsprozess zur richtigen Orientierung des AKR (Prinzipvariation am Produktionssystem), um anschließend den DMC scannen zu können.
2. Eine Gestaltvariation der Flansch- oder Stirnseite des AKR, um ausreichend Platz für die Anbringung des DMC zu ermöglichen.

Am Anwendungsfall des AKR hat sich jedoch auch gezeigt, dass lediglich direkte Abhängigkeiten zwischen Produktfunktion und Produktgestalt oder der Produktgestalt und den damit verbundenen Produktionsprozessen identifiziert werden können. Komplexere und mehrstufige Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Domänen können somit noch nicht identifiziert werden. Somit ist eine Risikobetrachtung unterschiedlicher alternativer Lösungen an Produkt und Produktionssystem noch nicht umsetzbar.

Im zweiten Anwendungsfall wurde untersucht, wie Entwicklungspotentiale durch die Nutzung von Industrie 4.0 Daten des Produktionsprozesses identifiziert werden können. Dies geschah am Beispiel des Windeprozesses einer Druckfeder unter Durchführung von Workshops mit dem Hersteller der Federwindemaschine und dem Anwender dieser. Hier konnten in einer Entwicklungspotentialmatrix Entwicklungsziele und die notwendige Menge und der geforderte Detailgrad der Daten zur Erreichung

dieser Ziele bewertet und gegenübergestellt werden. Diese Gegenüberstellung zeigt, mit welchen Daten welche Entwicklungsziele erreicht werden können und stellt damit eine Methode zu **Design with Industrie 4.0** dar. Zu beachten ist, dass die erfassten Informationen nur eine Entscheidungsunterstützung für die Produkt- bzw. Produktionssystementwickler bietet. Beispielsweise können Entwicklungspotentiale, zu deren Realisierung ein hoher (Daten-)Aufwand ermittelt wird, deutlich einfacher realisiert werden, wenn die benötigten Daten im Unternehmen bereits ausgewertet oder diese durch Partner (Kunden oder Lieferanten) bereitgestellt werden.

Anhand der vorgestellten Anwendungsfälle lassen sich die drei Forschungsfragen bereits teilweise beantworten:

### Forschungsfrage 1

Wie kann auf Basis des **Modells der PGE** der Produktentwickler in der ganzheitlichen Betrachtung von **Produkt- und Produktionssystementwicklung** unterstützt werden?

- Das entwickelte Vorgehensmodell eignet sich als Unterstützung im Produkt-Produktions-CoDesign, auch wenn einzelne Teilmethoden bisher noch nicht detailliert ausgearbeitet sind und ausgearbeitet wurden.

### Forschungsfrage 2

Wie können **Wechselwirkungen** zwischen Produkt und Produktionssystem modelliert und damit **Auswirkungen** und **Risiken** identifiziert und bewertet werden?

- Durch tabellarische Vorlagen zur Erfassung der Informationen von produkt- und produktionsseitigen Referenzsystemelementen können einfache Zusammenhänge analysiert werden.
- Die Bewertung komplexer Zusammenhänge und der Risiken von Änderungen konnte noch nicht nachgewiesen werden.

### Forschungsfrage 3

Wie lassen sich **Entwicklungspotentiale für und mit Industrie 4.0** Technologien effizient identifizieren?

- Mit der Methode zum Design with Industrie 4.0 konnte in einem industriellen Anwendungsfall gezeigt werden, wie Entwicklungspotentiale mittels der Daten aus Industrie 4.0 Produktionsprozessen identifiziert werden können.
- Durch die Modellierung der Referenzsystemelemente lassen sich im Sinne von Design for Industrie 4.0 notwendige Variationen am Produkt oder Produktionssystem zur Einführung von Industrie 4.0 Technologien identifizieren.

Die folgenden, im Zielsystem in Kapitel 5.2 definierten Anforderungen an die Methode konnten somit erfüllt werden:

- Leitfaden zur ganzheitlichen Betrachtung von Produkt und Produktionssystem,
- Nutzung der Referenzsystemelemente als Wissensbasis,
- Unterstützung bei der Erfassung von Informationen aus dem Referenzsystem,
- Wechselwirkungen zwischen P & PS modellieren,
- Nutzen und Weiterentwicklung von Elementen der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung,
- Möglichkeit zur Identifikation von Potentialen im Kontext von Industrie 4.0
- Möglichst frühe und begleitende Anwendbarkeit der Methode im Entwicklungsprozess.

Die Erfüllung folgender Anforderungen aus dem Zielsystem der Methode konnten noch nicht oder noch nicht vollständig gezeigt werden:

- Anwendbar für unterschiedliche Anwendungsfälle,
- Skalierbarkeit im Detaillierungsgrad,
- Möglichkeit zur Ableitung von Auswirkungen und Risiken alternativer Lösungen oder möglicher Variationen an Produkt oder Produktionssystem auf dieselbe und auf die jeweils andere Domäne.

## **8 Weiterentwicklung der Methode**

Die Anwendung des Vorgehensmodells samt Teilmethoden haben gezeigt, dass diese die Produkt- und Produktionssystementwickler im PPCD unterstützen. Die noch offenen Punkte zur Beantwortung der Forschungsfragen und damit zur Verifizierung oder Falsifizierung der Forschungshypothese sollen durch eine Weiterentwicklung der Teilmethoden adressiert werden. Im Fokus steht dabei die Analyse der Auswirkung von Änderungen über mehrere Stufen und Domänen und die methodische Unterstützung zur Ableitung des Entwicklungsrisikos.

### **8.1 Modellierung der relevanten Elemente des Referenzsystems zur Auswirkungs- und Risikoanalyse**

Für eine effiziente Entscheidungsfindung benötigen Produktentwickler einerseits detaillierte Informationen und andererseits einen guten Überblick über die vorhandenen Informationen und Wechselwirkungen (Keller et al., 2005). Diese Anforderungen werden im letzten Schritt des beschriebenen Vorgehensmodells durch die Auswirkungs- und Risikoanalyse adressiert. Diese bringt die zuvor tabellarisch erfassten Informationen, beschrieben in Kapitel 6.2.1, über Produktfunktion, Produktgestalt und Produktionsprozesse des Referenzsystems in kondensierter Form in eine übersichtliche Matrixdarstellung. Somit können die Zusammenhänge zwischen den Domänen erkannt und bewertet werden. Die somit entstandene Matrix des Referenzsystems hat die in Abbildung 8.1 dargestellte Form. Die Methode zur Auswirkungs- und Risikoanalyse wurde im Rahmen des Projekts I4TP entwickelt und schließlich in unterschiedlichen Anwendungsfällen angewandt.



### 8.1.1 Beschreibung des Modells

Produktfunktionen, Gestaltmerkmale, Produktionsprozesse und Produktionsanlagen können jeweils innerhalb und zwischen ihrer Domänen Wechselwirkungen besitzen. Wechselwirkungen zwischen Elementen werden mit „X“ gekennzeichnet, bestehen keine bekannten Wechselwirkungen mit „0“. Zwischen den unterschiedlichen Domänen werden nur direkt zuordenbare Wechselwirkungen modelliert, da nur diese Informationen auch direkt identifizierbar und aus den Tabellen zur Erfassung der Informationen des Referenzsystems ablesbar sind. So werden Produktfunktionen durch Gestaltmerkmale erfüllt, es besteht also eine direkte Wechselwirkung. Die Wechselwirkungen zwischen Produktfunktionen und Produktionsprozessen oder –maschinen sind nicht direkt ableitbar und damit ausgegraut, sondern ergeben sich kaskadenhaft über die Zusammenhänge Funktion – Gestalt – Prozess – Maschine. Selbiges gilt für die Wechselwirkungen zwischen Produktgestalt und Produktionsmaschinen. In die Auswirkungsmatrix können zudem weitere Domänen, wie beispielsweise strategische Faktoren (Kosten, Technology-Readiness-Level<sup>2</sup>, Produktions-KPIs, ...), aufgenommen und anschließend bewertet werden. (Jost, 2019; Stürmlinger et al., 2020)

Die in das Modell zu integrierenden Informationen können im Detaillierungsgrad je nach Kenntnisstand, Entwicklungsaufgabe und Zweck des Modells variieren. Die Produktmerkmale lassen sich angelehnt an das IPEK X-in-the-Loop Framework<sup>3</sup> von Systemen, Sub-Systemen, über Komponenten und Gestaltmerkmalen bis hin zu Wirkflächenpaaren beschreiben. Handelt es sich um ein Modell einer Produktgeneration, deren Referenzsystemelemente zum Großteil aus dem eigenen Unternehmen stammen, können die Produktmerkmale bis hin zu einzelnen Wirkflächen beschrieben werden. Bei einem hohen Neuentwicklungsanteil mit einem gleichzeitig hohen Anteil an externen Referenzsystemelementen, müssen die Produktmerkmale gegebenenfalls allgemeiner beschrieben werden. Des Weiteren ist vor der Modellierung des Referenzsystems die Systemgrenze zu definieren, um nur die relevan-

---

<sup>1</sup> Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

<sup>2</sup> Das Technology-Readiness-Level (TRL) beschreibt die Fähigkeit eines Unternehmens, eine bestimmte Technologie einzusetzen. Es wird von Mankins (1995) in neun Schritten beschrieben. Erweiterungen des TRL werden in der Arbeit von Revfi, Wilwer et al. (2020) erläutert und angewendet.

<sup>3</sup> Nach Albers und Düser (2010) stellt das IPEK X-in-the-Loop-Framework ein ganzheitliches und integriertes Entwicklungs- und Validierungsframework für Antriebsstrangsysteme dar.

ten Informationen zu modellieren und damit den Modellierungsaufwand zu reduzieren. Dabei besteht jedoch die Gefahr, relevante Informationen nicht zu modellieren, wenn Einflüsse auf Referenzsystemelemente vorliegen, die außerhalb der gewählten Systemgrenze liegen. (Jost, 2019; Stürmlinger et al., 2020)

### 8.1.2 Bestimmung der Änderungsausbreitung

Wie im Stand der Forschung (siehe Kapitel 2.1) dargelegt, ist die Reduktion von Unsicherheiten für die erfolgreiche Umsetzung eines Entwicklungsprojekts von großer Bedeutung. Durch das Erkennen der Auswirkungen einer Variation auf andere Elemente innerhalb der betrachteten Systemgrenzen lassen sich die Unsicherheiten im Entwicklungsprozess minimieren. Die Auswirkungen bestehen aus den Variationen und den damit verbundenen Aufwänden an sich und durch die sich daraus ergebenden notwendigen Anpassungen (Klingler, 2017, S. 70).

Die in der Matrix modellierten Referenzsystemelemente können bei der Entwicklung einer neuen Produktgeneration oder Produktionssystemevolution genutzt und angepasst werden. Ändert sich beispielsweise durch neue Kundenwünsche oder Anforderungen eine Produktfunktion, kann diese markiert werden und durch die modellierten Abhängigkeiten nachvollzogen werden, welche Gestaltmerkmale, Produktionsprozesse und -maschinen betroffen sind. Je nach Entwicklungssituation können die Änderungen ihren Ursprung in jeder der aufgeführten Domänen haben. Die von Änderungen betroffenen Zellen werden in der Matrix mit den in der Legende in Abbildung 8.2 beschriebenen Farben markiert. Somit wird deutlich, ob es sich um direkte Auswirkungen einer Änderung oder um eine Änderungsausbreitung ersten, zweiten oder noch höheren Grades handelt. Die Fortpflanzung von Änderungen und deren Auswirkungen wird somit nicht übersehen und damit im Entwicklungsprozess betrachtet, was einen großen Vorteil der Methode darstellt. Werden in der Entwicklung der nächsten Produktgeneration oder Produktionssystemevolution Prinzipvariationen vorgenommen, so werden bestehende Elemente aus der Matrix entfernt oder neue Elemente hinzugefügt. Basierend auf dem Referenzsystem entsteht somit eine Matrix mit neuen Elementen, deren Einflüsse neu modelliert werden müssen. Hier ist erneut das Wissen der Entwickler gefragt, um die Abhängigkeiten zu erkennen. Zu beachten ist, dass markierte Abhängigkeiten von Elementen nur eine potentielle und keine gewisse Änderungsausbreitung darstellen. Beispielhaft besteht bei der Verlängerung eines Wellenabschnitts trotz direkter Abhängigkeit der Welle mit einem zugehörigen Härteprozess, keine Auswirkung auf diesen. Die markierten Abhängigkeiten dienen damit nur als Unterstützung für die Produkt- und Produktionssystementwickler. (Jost, 2019; Stürmlinger et al., 2020)

### **8.1.2.1 Änderungsausbreitung ohne Prinzipvariationen**

Die beschriebene Vorgehensweise wird im Folgenden angelehnt an Jost (2019) und Stürmlinger et al. (2020) in Abbildung 8.2 für eine Gestalt- oder Übernahmevariation an einem Produktmerkmal erläutert:

Anlagen	Maschine 1	X	0	X	0									
	Maschine n	0	0	0	X									
Produktions- prozesse	Prozess 1		0	X	0	X	0	X	0					
	Prozess 2		0	0	0	X	0	0	0					
	Prozess 3		0	X	0	X	0	X	0					
			Prozess n			0	X	0	X					
X	Auswirkung vorhanden		Produkt- gestalt	Kompo- nente 1	Merkmal 1	0	0	X	0	X	0	0	X	
	keine Auswirkung vorhanden													Kompo- nente n
0	Vorgenommene Änderung													
	Änderungsausbreitung ersten Grades													
	Änderungsausbreitung zweiten Grades													

Abbildung 8.2: Auswirkungsmatrix zur Auswirkungsanalyse mit dargestellter Änderungsausbreitung. Von Gestaltmerkmal 1 der Komponente 1 geht eine Änderung (rot) aus. Merkmal n der Komponente n, sowie Funktion 1 und die Produktionsprozesse 1 und 3 sind direkt von den Änderungen betroffen (orange). Ändern sich diese, breiten sich die Änderungen wiederum auf Maschine 1, Prozess n Funktion n und Merkmal 1 der Komponente n aus (gelb). Weitere Änderungsausbreitungen sind nicht dargestellt. Nach Jost (2019) und Stürmlinger et al. (2020)

Im Beispiel wird das rot markierte Merkmal 1 der Komponente 1 geändert. Zellen, die eine Auswirkung dieses Elements auf andere Elemente darstellen und die betroffenen Elemente werden orange hervorgehoben. In diesem Beispiel hat die Änderung von Merkmal 1 vier Auswirkungen auf andere Elemente. Diese Auswirkungen werden als Änderungsfortpflanzung ersten Grades bezeichnet werden. Anschließend werden die Änderungen zweiten Grades gelb hervorgehoben. Das Ergebnis ist, dass es möglicherweise vier weitere Auswirkungen gibt. Je nachdem, wie detailliert die Änderungsausbreitung untersucht werden soll, können auch weitere Grade der Änderungsausbreitung in gleicher Weise betrachtet werden. Dieses einfache Beispiel zeigt deutlich, dass eine Änderung eines Elements viele Auswirkungen auf andere Elemente innerhalb und außerhalb seiner Domäne haben kann und damit zu notwendigen Anpassungen in verschiedenen Bereichen führen kann. (Jost, 2019; Stürmlinger et al., 2020)

### **8.1.2.2 Änderungsausbreitung bei Prinzipvariationen**

Die Modellierung der Änderungsausbreitung bei einer Prinzipvariation der in Entwicklung befindlichen Produktgeneration oder auch der Produktionsprozesse und -maschinen basiert auf der Matrix der modellierten Referenzsystemelemente. Die Vorgehensweise basiert auf (Eppinger & Browning, 2012, S. 43 ff.), die anhand des Beispiels einer DSM zur Bewertung von potenziellen Leistungsvorteilen die Einführung neuer wertsteigernder Technologien in eine vorhandene Produktarchitektur zeigen. In Anlehnung daran erläutern (Jost, 2019), wie bei einer Prinzipvariation, die durch das Entfernen oder Hinzufügen von Elementen in der Matrix charakterisiert ist, die Änderungsausbreitung modelliert werden kann. Entfällt durch die Prinzipvariation ein Element aus der Referenzmatrix, kann direkt identifiziert werden, auf welche Elemente sich dies auswirkt. Werden neue Elemente hinzugefügt, müssen deren Abhängigkeiten vom Produktentwickler bewertet und zur Matrix der neuen Produktgeneration und Produktionssystemevolution hinzugefügt werden.

Anlagen	Maschine 1	X	0	X	0														
	Maschine n	0	0	0	X														
Produktionsprozesse	Prozess 1	0	0	X	0	X	0	0	X	0									
	Prozess 2	0	0	0	0	0	0	X	0	0									
	Prozess 3	0	X	X	0	X	0	0	X	0									
	Prozess n	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X								
Produktgestalt	Auswirkung vorhanden	Merkmal 1	0	0	0	0	0	0	0	0	X								
		Merkmal 1b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X							
Keine Auswirkung vorhanden	Komponente 1	Merkmal n	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X							
		Merkmal 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X						
Vorgenommene Änderung	Komponente n	Merkmal n	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X						
		Merkmal 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X					
Änderungsausbreitung ersten Grades	Änderungsausbreitung zweiten Grades	Merkmal n	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X					
		Merkmal 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X				
Funktions	Funktions	Funktion 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X			
		Funktion n	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X		

Abbildung 8.3: Auswirkungsmatrix der neuen Produktgeneration mit Prinzipvariation unter dem Einfügen des Merkmals 1b und Entfernen von Merkmal 1 der Komponente 1

Abbildung 8.3 zeigt, wie aus der in Abbildung 8.1 dargestellten Matrix des Referenzsystems, eine Matrix für eine Prinzipvariation des Produkts gebildet wird. Durch die Prinzipvariation entfällt in der Produktgeneration  $G_n$  Merkmal 1, wohingegen Merkmal 1b neu entsteht und zur Matrix hinzugefügt wird. Dies bedeutet, dass beispielsweise einzelne Wirkflächen verschwinden und andere durch eine geänderte Produktgestalt neu entstehen. Die Auswirkungen, die durch das Entfernen von Merkmal 1 entstehen, sind auch zwingend zu beachten. Beispielhaft sei hier das Entfernen einer Versteifungsrippe genannt, die sich sowohl auf andere Gestaltmerkmale, die Funktion des Produkts und auf die zu Grunde liegenden Fertigungsprozesse auswirken kann. Für das hinzugefügte Merkmal 1b müssen die Abhängigkeiten vom Produkt- und Produktionssystementwickler bewertet und in die Matrix aufgenommen werden. Durch das Hinzufügen eines neuen Elements müssen außerdem gegebenenfalls weitere Elemente, wie ein neuer Fertigungsprozess, hinzugefügt und deren Wechselwirkungen evaluiert werden. (Jost, 2019; Stürmlinger et al., 2020)

### 8.1.3 Bestimmung des Grads der Änderungsausbreitung

Die Auswirkungsmatrix unterstützt Produkt- und Produktionssystementwickler dabei, Abhängigkeiten zu erkennen und damit im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen. Um alternative Lösungen einfacher vergleichen und deren Komplexität bewerten zu können, wird der Grad der Änderungsausbreitung  $D_c$ <sup>1</sup> eingeführt. Dieser ergänzt die qualitative Darstellung in der Matrix um einen quantitativen Kennwert, der dem Produktentwickler als Bewertungsgröße für eine neue Produktgeneration bzw. Produktionssystemevolution dient. Er berechnet sich nach Gleichung 8.1 nach Jost (2019) und Albers et al. (2021) aus dem Quotienten der Anzahl der vorhandenen Änderungsausbreitungen  $C_r$ <sup>2</sup> und der Summe der insgesamt potentiellen Änderungsausbreitungen  $C_p$ <sup>3</sup>, die der Summe aller Zellen in der Matrix entspricht.

$$D_c = \frac{\sum C_r}{\sum C_p} \quad 8.1$$

---

<sup>1</sup> aus dem englischen: **D**egree of **C**hange propagation

<sup>2</sup> aus dem englischen: **r**elevant **C**hange propagation

<sup>3</sup> aus dem englischen: **p**otential **C**hange propagation

$C_r$  enthält alle Wechselwirkungen, die im betrachteten Anwendungsfall relevant sind. Dies bedeutet, dass mit einem X markierte Wechselwirkungen, die jedoch keine Bedeutung haben<sup>4</sup>, nicht mitgezählt werden.  $C_p$  ist die Summe aller in der Auswirkungsmatrix vorhandenen Zellen, die mit 0 und X markiert sind. Ausgegraute, indirekte Zusammenhänge, fließen nicht in die Berechnung mit ein.

Im Falle der Auswirkungsmatrix in Abbildung 8.2 hat  $C_p$  den Wert 45,  $C_r$  den Wert 13. Der Grad der Änderungsausbreitung  $D_C$  berechnet sich somit zu 29 %. In diesem Beispiel wurden nur Änderungsausbreitungen bis hin zum zweiten Grad betrachtet. Die Änderung eines Gestaltmerkmals des Produkts wirkt sich also auf insgesamt 29 % aller Elemente aus den Domänen Funktion, Gestalt, Prozess und Maschine des betrachteten Systems innerhalb des zweiten Grades der Änderungsausbreitung aus.

#### Bestimmung der Neuentwicklungsanteile

Ein Aspekt zur Bestimmung des Entwicklungsrisikos einer neuen Produktgeneration  $G_n$  ist nach Albers, Rapp et al. (2017) dessen Neuentwicklungsanteil  $\delta_{N,n}$ . Dieser wird entsprechend der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Gleichungen aus der Vereinigung der Anteile an Prinzipvariationen und der Anteile an Gestaltvariationen berechnet.

$$\delta_{N,n} = \frac{|PS_n| \cup |GS_n|}{|G_n|} = \frac{|PS_n \cup GS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 8.2$$

---

<sup>4</sup> Ein Beispiel hierfür ist der in Kapitel 7.1 erwähnte Härteprozess des AKR. Dieser steht zwar mit den Durchmessern der einzelnen Wellenabschnitte in Wechselwirkung, ist aber in der Betrachtung der Änderungsausbreitung einer Durchmesseränderung nicht relevant, wenn hiervon keine Prozessparameter wie Härtezeiten oder -temperaturen betroffen sind.

### 8.1.4 Bestimmung des Entwicklungsrisikos durch Kombination des Grads der Änderungsausbreitung mit dem Neuentwicklungsanteil

Die entwickelte Methode unterstützt den Produktentwickler nicht nur durch eine übersichtliche Darstellung der Auswirkungen von Änderungen innerhalb der definierten Systemgrenze, sondern liefert auch Kennzahlen für das damit einhergehende Entwicklungsrisiko. Hierfür werden zwei Ansätze mit einander kombiniert: Der aus der Matrix zu berechnende Grad der Änderungsausbreitung inklusive des Produktionssystems und der Neuentwicklungsanteil einer in Entwicklung befindlichen Produktgeneration. Hierfür wird das in Kapitel 2.3.3 beschriebene PGE-Risikoportfolio nach Albers, Rapp et al. (2017) als Grundlage verwendet. Die Herkunft der Referenzsystemelemente, die ursprünglich auf der Ordinate aufgetragen ist, wird nun durch den Grad der Änderungsausbreitung  $D_C$  ersetzt.

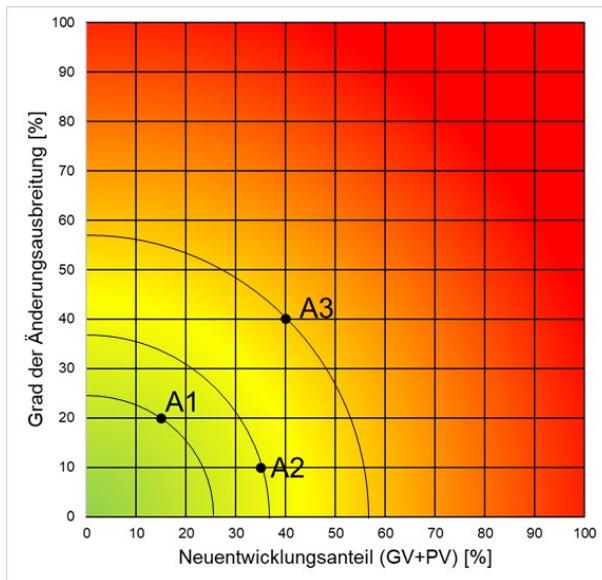


Abbildung 8.4: Risikodiagramm dreier generischer, alternativer Produktalternativen unter Einbezug des Grads der Änderungsausbreitung und des Neuentwicklungsanteils (Albers et al., 2021; Jost, 2019).

Abbildung 8.4 zeigt das Risikodiagramm für drei generische, alternative Lösungen einer in Entwicklung befindlichen Produktgeneration  $G_n$ . Die Alternativen A1, A2 und A3 weisen die folgenden Eigenschaften auf:

Tabelle 8.1: Neuentwicklungsanteil und Grad der Änderungsausbreitung von A1, A2 & A3

Alternative Lösung	Neuentwicklungsanteil	Grad der Änderungsausbreitung
A1	15 %	20 %
A2	35 %	10 %
A3	40 %	40 %

Die in Abbildung 8.4 zu sehenden Radien der Viertelkreise der einzelnen Alternativen verdeutlichen das Entwicklungsrisiko unter Einbezug der berücksichtigten Parameter Neuentwicklungsanteil und Grad der Änderungsausbreitung, welche hier gleich gewichtet wurden. Das Entwicklungsrisiko  $R_{D,n}$ <sup>5</sup> berechnet sich wie folgt (Albers et al., 2021):

$$R_{D,n} = \sqrt{(k_1 \delta_{N,n})^2 + (k_2 D_{C,n})^2} \quad 8.3$$

Mit

$$k_1 = \frac{\sum k_{1,i}}{\text{Anzahl variiertes Teilsysteme}} \quad 8.4$$

$$k_2 = \frac{\sum k_{2,j}}{\text{Anzahl relev. Auswirkungen im Produktionssystem}} \quad 8.5$$

Die Faktoren  $k_1$  und  $k_2$  stellen Gewichtungsfaktoren von  $\delta_{N,n}$  und  $D_C$  dar und liegen im Bereich zwischen 0 und 1. Beide Faktoren werden nach der Summe der Gewichtungsfaktoren der einzelnen Elemente  $i$  bzw.  $j$  berechnet und durch die Anzahl der betroffenen Teilsysteme geteilt. Der Wert eines Faktors  $k_{1,i}$  hängt von der Kritikalität der Variation des jeweilig betrachteten Produkts bzw. des einzelnen Produktmerkmals  $i$  ab. Im Allgemeinen haben Prinzipvariationen eine höhere Kritikalität und damit ein höheres Risiko als Gestalt- oder gar Übernahmevariationen. Dennoch können auch diese kritisch sein, insbesondere dann, wenn sie über die dem

---

<sup>5</sup> aus dem englischen: **Development Risk**

Unternehmen bekannten Grenzen hinausführen oder kritische Produktfunktionen davon betroffen sind. Im Gegensatz dazu können andere GV und ÜV ein sehr geringes Risiko aufweisen, z. B. wenn nur kleine Variationen vorgenommen werden, mit denen das Unternehmen vertraut ist. (Albers et al., 2021)

Im Gegensatz zur in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Risikobewertung von Clarkson et al. (2001) wird die Kritikalität des Grades der Änderungsausbreitung mit dem Faktor  $k_2$  nicht durch die Durchführung von Workshops für die Wahrscheinlichkeit und das Risiko einer Änderungsausbreitung bewertet. Der Wert des Faktors  $k_2$  aus der Summe der Einzelfaktoren  $k_{2,j}$  hängt von der Kritikalität der Variationen der einzelnen Produktionssystemelemente  $j$  ab. Liegt eine Prinzipvariation in den Produktionsprozessen, Werkzeugen oder Maschinen vor, wird  $k_{2,j}$  im Allgemeinen höher bewertet als bei einer Ausprägungsvariation, die oft nur eine Änderung von Produktionsprozessparametern oder den Wechsel auf ein kleineres oder größeres Werkzeug bedeutet. Allerdings können auch AVs des Produktionssystems sehr kritisch sein, z. B. wenn Produktionsprozesse an ihre Prozessgrenzen stoßen. (Albers et al., 2021)

Die beiden Faktoren  $k_1$  und  $k_2$  können mit geringem Aufwand definiert werden, sind aber weniger genau als der erwähnte Ansatz von Clarkson et al. (2001). Dies ist durch die Anforderung der Methode motiviert, Abhängigkeiten und Auswirkungen in komplexen Systemen, bestehend aus Produkt und Produktionssystem, mit geringem Aufwand modellieren zu können, um die Anwendung der Methode für einzelne Ingenieure oder kleine Teams zu ermöglichen. Um die Produkt- und Produktionssystementwickler bei der Bewertung der Faktoren  $k_{1,i}$  und  $k_{2,j}$  zu unterstützen, sind in Tabelle 8.2 deren Bewertungen in Abhängigkeit der Kritikalität der Produkt- und Produktionssystemvariationen der einzelnen Elemente dargestellt. (Albers et al., 2021)

Tabelle 8.2: Unterstützung zur Bewertung der Gewichtungsfaktoren  $k_{1,i}$  und  $k_{2,j}$  für die Berechnung des Entwicklungsrisikos im PPCD

Kritikalität des variierten Produktgestaltungsmerkmals	Faktor $k_{1,i}$ zur Gewichtung von $\delta_{N,n}$
Hohe Kritikalität	0,7 – 1,0
Mittlere Kritikalität	0,3 – 0,7
Niedrige Kritikalität	0,0 – 0,3
Kritikalität der betroffenen Produktionsprozesse und Maschinen	Faktor $k_{2,i}$ zur Gewichtung von $D_c$
Hohe Kritikalität	0,7 – 1,0
Mittlere Kritikalität	0,3 – 0,7
Niedrige Kritikalität	0,0 – 0,3



## 9 Anwendung der weiterentwickelten Teilmethoden

Die in Kapitel 8 entwickelte Teilmethode soll den Produkt- und Produktionssystementwicklern einen besseren Überblick über Abhängigkeiten innerhalb und zwischen der Domänen Produkt und Produktionssystem geben und eine Unterstützung zur Ableitung des Entwicklungsrisikos bilden. Um diesen Nutzen zu zeigen, wurde die Methode auf zwei Anwendungsfälle aus unterschiedlichen Fachbereichen angewendet. Diese werden im Folgenden beschrieben und im Anschluss wird überprüft, ob die Anforderungen

- Anwendbar für unterschiedliche Anwendungsfälle,
- Möglichkeit zur Ableitung von Auswirkungen und Risiken alternativer Lösungen oder möglicher Variationen an Produkt oder Produktionssystem auf dieselbe und auf die jeweils andere Domäne,
- Skalierbarkeit im Detaillierungsgrad,

von der entwickelten Methode erfüllt werden können. Der Fokus der folgenden Anwendungsfälle liegt dabei ausschließlich auf der Teilmethode zur Auswirkungs- und Risikoanalyse. Die anderen Teilschritte wie die Tabellen zur Erfassung der Informationen aus dem Referenzsystem (siehe Kapitel 6.2.1) und die Methode zur Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen (siehe Kapitel 6.2.2) werden nicht betrachtet, da der Detailgrad der Anwendungsfälle und der Untersuchungsfokus dies nicht notwendig machen.

### 9.1 Bewertung des Entwicklungsrisikos einer neuen Produktgeneration eines Leichtbaugesetriebegehäuses

Als Leichtbau-Entwicklungsprojekt hat ein Unternehmen die Aufgabe erhalten, die Masse des in Abbildung 9.1 dargestellten Roller-Leichtbaugesetriebegehäuses (LGG) zu reduzieren. Die aktuell am Markt befindliche Produktgeneration  $G_{n-1}$  besteht aus vier Komponenten, die miteinander verschweißt sind. Sie sind mit den Nummern 1-4 gekennzeichnet.

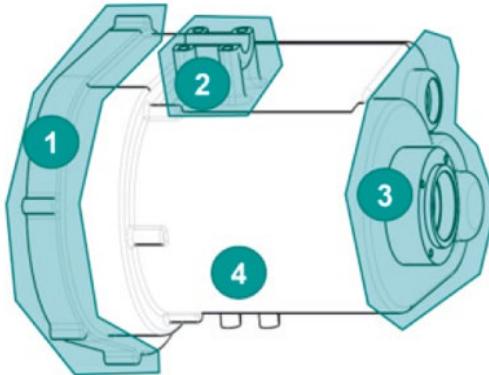


Abbildung 9.1: Am Markt befindliches Roller-Getriebegehäuse  $G_{n-1}$  als Referenzprodukt zur Weiterentwicklung für die nächste Produktgeneration  $G_n$  mit den Komponenten (1) Flansch, (2) Aufhängung, (3) Deckel und (4) Mittelteil. Diese Komponenten gehören alle zum Bauteil Gehäuse. (Albers, Revfi & Spadinger, 2017)

Im vorliegenden Entwicklungsprojekt soll ein Leichtbaukonzept in Hinsicht auf dessen Auswirkungen auf die Referenzsystemelemente und damit einhergehend dessen abgeschätztes Entwicklungsrisiko bewertet werden. Da man sich in einer frühen Konzeptphase befindet, wird das Referenzprodukt auf Komponentenebene ohne detaillierte Produktmerkmale oder gar Wirkflächen mit Parametern beschrieben. Auch die Produktionsprozesse und -maschinen werden nur grob beschrieben.

Mittels des **Extended Target Weighing Approach (ETWA)**<sup>1</sup> wurden Funktionen identifiziert, die besonderes Leichtbaupotential besitzen, wenn die für ihre Erfüllung zuständigen Bauteile angepasst werden.

- (a) Wärme ableiten,
- (b) Abdichten gegen eindringendes Medium,
- (c) Axialkräfte aufnehmen,

---

<sup>1</sup> Am IPEK entwickeltes, semiquantitatives Bewertungsmodell für Herstellkosten neuer Konzeptideen nach Revfi, Gladysz et al. (2020)

(d) Biegemomente aufnehmen.

Das Teilsystem, das zu allen vier Funktionen beiträgt und zudem eine hohe Masse aufweist, ist das Mittelteil (4). Zur besseren Übersicht und zur besseren Nachvollziehbarkeit der Methode für dieses vereinfachte Beispiel wird im Folgenden nur auf zwei Funktionen eingegangen, nämlich "Abdichten gegen Medieneintritt" (kurz: "Medien abdichten") und "Axialkräfte aufnehmen" (kurz: "Kräfte aufnehmen"). Das Unternehmen, das das Getriebe entwickelt und produziert, ist ein mittelständisches Unternehmen. Das vereinfachten Elemente des Referenzproduktionssystems besteht aus einer CNC-Maschine zum Fräsen, Drehen und Bohren. Das Rohteil des Gehäuses wird gegossen. (Albers et al., 2021)

### **9.1.1 Modellierung der relevanten Referenzsystemelemente**

Wie im Vorgehensmodell in Kapitel 6.1 aufgezeigt, werden zur Auswirkungs- und Risikoanalyse einer alternativen Lösung für das Produkt- und Produktionssystem erst die relevanten Referenzsystemelemente identifiziert und modelliert. Da nur ein grobes Konzept ohne detaillierte Produkt- oder Prozessparameter bewertet werden soll, wird in diesem Beispiel von dem Ausfüllen der in Kapitel 6.2.1 aufgeführten Tabellen abgesehen. Stattdessen wird direkt die Auswirkungsmatrix erstellt, in der die Zusammenhänge zwischen Referenzprodukt und Referenzproduktionssystem als Teil des Referenzsystems sichtbar sind.

Anlagen	Gussmaschine	X	0	0	0														
	CNC-Maschine	0	X	X	X														
Produktionsprozesse	Gießen		0	0	0	X	X	X	X										
	Fräsen		0	0	0	X	X	X	0	X									
	Drehen		0	0	0	0	0	0	X	0									
	Bohren					X	X	X	0	0									
X Auswirkung vorhanden	keine Auswirkung vorhanden	Produktgestalt	Gehäuse	1 Flansch	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3 Deckel	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
																		4 Mittelteil	X
Funktionen	Medien abdichten	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen	0	Kräfte aufnehmen		

Abbildung 9.2: Auswirkungsmatrix der relevanten Referenzsystemelemente bestehend aus dem am Markt befindlichen Roller-Getriebegehäuse und dessen Produktionssystem

## 9.1.2 Modellierung alternativer Produktkonzepte

Ausgehend von den identifizierten Funktionen, die auf Leichtbaupotenziale hinweisen, entschieden sich die Produktentwickler, mit Hilfe von Kreativitätsmethoden neue Konzepte für das Mittelteil zu generieren.

### 9.1.2.1 Alternative 1: Aussparungen und Polymereinsatz

Eines der Produktkonzepte ist ein Multi-Material-Design (MMD) Konzept durch Hinzufügen eines Polymereinsatzes. Damit wird die Funktion "Medien abdichten" zusätzlich zum Mittelteil vom Polymereinsatz realisiert. (Albers et al., 2021) Das MMD-Konzept ist in Abbildung 9.3 dargestellt.

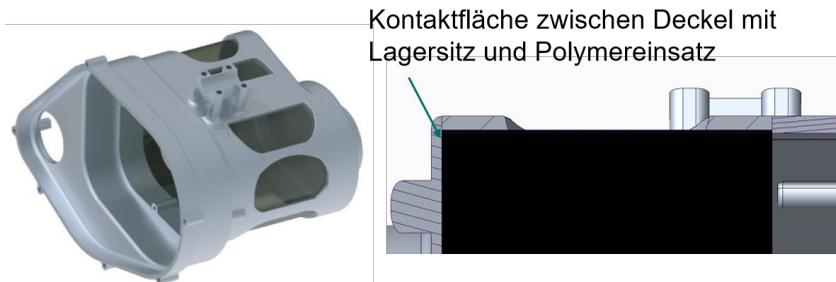


Abbildung 9.3: Konzept einer möglichen Leichtbaulösung mit Aussparungen im Mittelteil und Polymereinsatz (Albers, Moeser & Revfi, 2018). Damit wird eine Trennung der Funktion „Medien abdichten“ realisiert. Rechts: Schnitt durch das Gehäuse (grau) und Polymereinsatz (schwarz) (Albers et al., 2021). Es entsteht ein neues Wirkflächenpaar zwischen Polymereinsatz und Deckel samt Lagersitz.

Die initial geänderte Gestalt des Mittelteils hat, wie in der Modellierung der relevanten Referenzsystemelemente ersichtlich, potentiell Auswirkungen auf alle anderen Elemente der Produktgestalt, sowie auf die beiden modellierten Funktionen und auf die Fertigungsprozesse Fräsen und Gießen. Da die Aussparungen im Mittelteil für das gegossene Rohteil irrelevant sind, wirken sich diese tatsächlich aber nur auf den Fräsprozess und nicht auf den vorgelagerten Gießprozess aus. Gleiches gilt für die anderen möglichen Auswirkungen: In diesem Fall sind die Auswirkungen auf die Funktion „Kräfte aufnehmen“ nicht von Belang, da das Mittelteil als Leitstützstruktur zum Leiten der Kräfte von den Lagersitzen hin zur Aufhängung noch stabil genug ist. Auch wirken sich die eingebrachten Aussparungen nicht auf die anderen Komponenten des Gehäuses aus. Einzige die Funktion „Medien abdichten“ ist neben den

beiden genannten Produktionsprozessen von der durchgeführten Änderung tatsächlich betroffen. Das geänderte Konzept des Mittelteils führt zu einer ersten Änderung des zugehörigen Fräsprozesses durch einen höheren Fertigungsaufwand im Vergleich zum Referenzprodukt und hat zur Folge, dass die Funktion „Medien abdichten“ aufgrund der Löcher nicht mehr erfüllt werden kann. In einer ersten Änderungsausbreitung bedeutet dies, dass die Funktion durch ein anderes Element, den neu integrierten Polymereinsatz, erfüllt werden muss, der durch den neuen Produktionsprozess Spritzgießen in einer Spritzgussanlage hergestellt wird. Diese Maschine ist kein Element des bereits intern vorhandenen Referenzsystems und führt somit zu hohen Investitionskosten. Bedingt durch die Konstruktion des Polymereinsatzes muss die Montage von der Rückseite erfolgen und die Kontaktfläche des Deckels samt Lagersitzen muss mit höheren Anforderungen an die Oberflächenqualität hergestellt werden (siehe Abbildung 9.3), was eine sekundäre Änderungsausbreitung aus der Prinzipvariation des Mittelteils bedeutet. Durch die Gestaltvariation des Deckels muss auch der Drehprozess angepasst werden. (Albers et al., 2021)



In diesem Beispiel können die Produkt- und Produktionssystementwickler also feststellen, dass die initiale Prinzipvariation des "Mittelteils" über die Funktion „Medien abdichten“, den Polymereinsatz erforderlich macht. Dieser erfordert wiederum die Anpassung des Deckels samt Lagersitzen und des zur Herstellung notwendigen Drehprozesses. Diese Abhängigkeit ist kein offensichtlicher Zusammenhang, so dass die Ingenieure bei der Bewertung der Auswirkungen von Änderungen durch eine mehrstufige Analyse der Änderungsausbreitung unterstützt werden. Dies gibt einen klaren Hinweis, welche Produkt- und Produktionssystemelemente im Entwicklungsprozess der Produktgeneration  $G_n$  berücksichtigt werden müssen und kann helfen, das Entwicklungsrisiko abzuschätzen. (Albers et al., 2021) Der Pfad der Änderungsausbreitung ist in Abbildung 9.5 dargestellt.

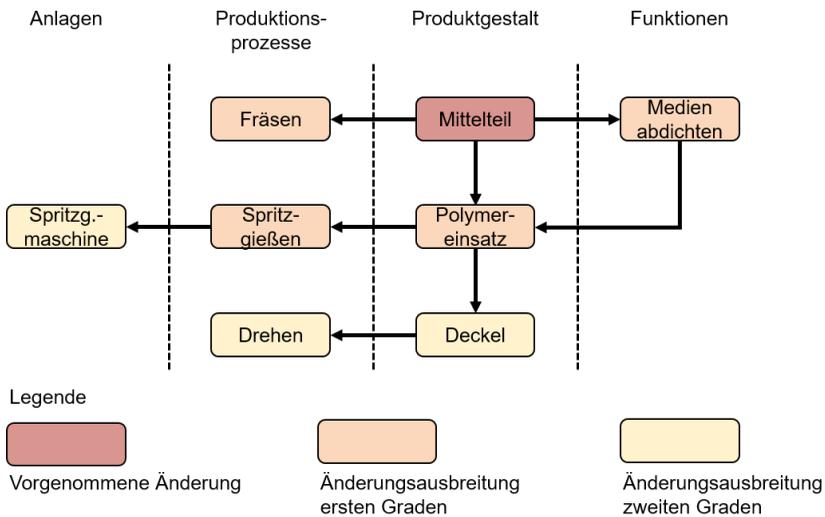


Abbildung 9.5: Pfad der Änderungsausbreitung über die initiale Prinzipvariation des Mittelteils

### 9.1.2.2 Alternative 2: Wabenstruktur

Ein weiteres alternatives Leichtbaukonzept ist die Realisierung einer Wabenstruktur im Mittelteil des Gehäuses. Die entspricht einer Gestaltvariation. Bis auf einen deutlich umfangreicheren und damit zeit- und kostenintensiveren Fräsprozess zur Erreichung der finalen Gestalt, sind keine weiteren Produktionsprozesse notwendig.

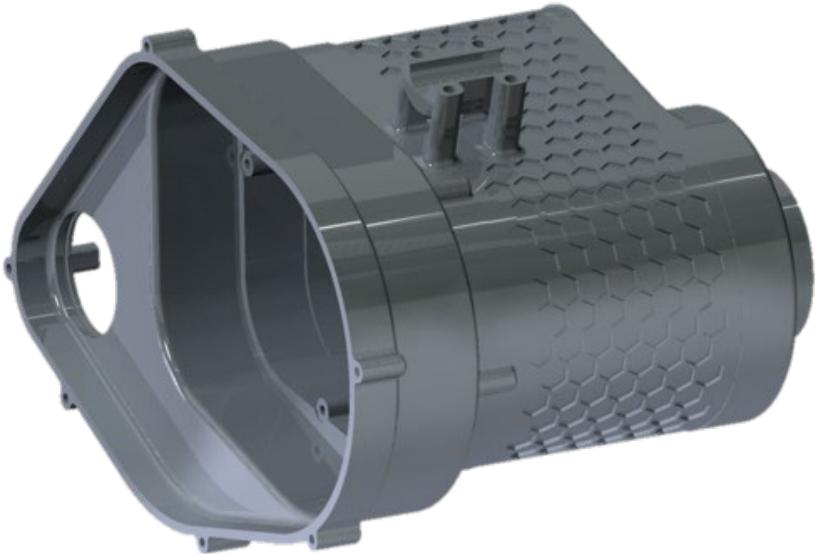


Abbildung 9.6: Alternatives Leichtbaukonzept mit Wabenstruktur im Mittelteil des Gehäuses (Albers, Moeser & Revfi, 2018).

Dieses Konzept bietet weiterhin eine ausreichende Steifigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung des Gewichts. Die beiden betrachteten Funktionen „Kräfte aufnehmen“ und „Medien abdichten“ sind nicht von der Gestaltvariation betroffen. Es gibt zudem keine Auswirkungen auf die anderen Gestaltelemente des Gehäuses.



## 9.1.3 Bestimmung des Entwicklungsrisikos

Um das Entwicklungsrisiko der beschriebenen Beispiele zu bewerten, werden gemäß Kapitel 8.1.4 die Neuentwicklungsanteile berechnet und mit dem Grad der Änderungsausbreitung (siehe Kapitel 8.1.3) kombiniert.

### 9.1.3.1 Entwicklungsrisiko des Produktkonzepts Polymereinsatz

In Abbildung 9.4 ist die Anzahl der relevanten, farbig markierten Änderungsausbreitungen  $\sum C_r = 7$ , die Anzahl der prinzipiell möglichen Änderungsausbreitung  $\sum C_p = 71$ . Nach Gleichung 8.1 beträgt der Grad der Änderungsförderung  $D_C = 0,0985 = 9,85\%$ . In der Gewichtung der Änderungsausbreitung werden die produktionsseitigen Kritikalitäten berücksichtigt. Die Änderungen der Fertigungsprozesse "Fräsen" und "Drehen" sind unkritisch, da es sich nur um eine AV mit einer Änderung der Prozessparameter handelt. Daher gilt nach Tabelle 8.2:

$$k_{2,Fräsen} = k_{2,Drehen} = 0,1 \quad 9.1$$

Im Gegensatz dazu weist der neu erforderliche Produktionsprozess Spritzgießen mit der neuen Spritzgussmaschine eine hohe Kritikalität auf, da das Unternehmen kein Know-How in diesem Produktionsprozess vorzuweisen hat.

$$k_{2,Spritzgießen} = k_{2,Spritzgussmaschine} = 1,0 \quad 9.2$$

Damit ergibt sich:

$$k_2 = \frac{\sum k_{2,j}}{\text{Anzahl relev. Auswirkungen im Produktionssystem}} \quad 9.3$$

$$= \frac{0,1 + 0,1 + 1,0 + 1,0}{4} = 0,55$$

Von den fünf Gestaltelementen des Produkts wird der Flansch und die Aufhängung in die neue Produktgeneration übernommen. Das Mittelteil ist eine Prinzipvariation, da in Form der Aussparungen neue Produktmerkmale entstehen. Der neu benötigte Polymereinsatz ist eine weitere PV, während die Variation des Deckels eine GV darstellt. Nach Gleichung 8.2 ergibt sich damit ein Neuentwicklungsanteil  $\delta_{N,n} = 60\%$ . Da der Polymereinsatz ein neu entwickeltes Teil ist, weist dieser eine hohe Kritikalität auf. Die PV des Mittelteils mit seinen neuen Aussparungen wird als mittlere

Da der Polymereinsatz ein neu entwickeltes Teil ist, weist dieser eine hohe Kritikalität auf. Die PV des Mittelteils mit seinen neuen Aussparungen wird als mittlere Kritikalität betrachtet, da die strukturmechanischen Auswirkungen einfach zu berechnen ist. Somit gilt:

$$k_{1,\text{Polymereinsatz}} = 1,0 \quad 9.4$$

$$k_{1,\text{Mittelteil}} = 0,5 \quad 9.5$$

Und damit

$$k_1 = \frac{\sum k_{1,i}}{\text{Anzahl variiertes Teilsysteme}} = \frac{1,0 + 0,5}{2} \quad 9.6$$
$$= 0,75$$

Das Gesamtentwicklungsrisiko  $R_D$  für dieses Leichtbaukonzept samt dessen Produktionssystem berechnet sich zu

$$R_{D,n} = \sqrt{(0,75 * 60 \%)^2 + (0,55 * 9,85 \%)^2} = 45,32 \% \quad 9.7$$

### 9.1.3.2 Entwicklungsrisiko des Produktkonzepts Wabenstruktur

Von den  $\sum C_p = 45$  prinzipiell möglichen Änderungen, ist nur die markierte Auswirkung auf den Fräsprozess in diesem Anwendungsbeispiel relevant. Mit  $\sum C_r = 1$  ergibt sich somit  $D_c = 0,022 = 2,2 \%$ . Die technische Kritikalität der Ausprägungsvariation des Fräsprozesses ist als gering bis mittel einzustufen, da keine besonderen Anforderungen an die Oberflächenqualität und Toleranzen erreicht werden müssen. Unklar ist jedoch noch, wie stark sich der Fräsprozess auf das notwendige Werkzeugwechselintervall auswirkt. Damit wird angenommen:

$$k_{2,\text{Fräsen}} = k_2 = 0,3 \quad 9.8$$

Von den vier Gestaltelementen wird lediglich das Mittelteil variiert, dementsprechend ergibt sich ein Neuentwicklungsanteil  $\delta_{N,n} = 25\%$ . Diese Gestaltvariation weist durch die notwendige Auslegung des Bauteils eine mittlere Kritikalität auf.

$$k_{1,Mittelteil} = k_1 = 0,5 \quad 9.9$$

Das Gesamtentwicklungsrisiko  $R_D$  für das Konzept mit Wabenstruktur samt dessen Produktionssystem berechnet sich zu

$$R_{D,n} = \sqrt{(0,5 * 25 \%)^2 + (0,3 * 2,22 \%)^2} = 12,5 \% \quad 9.10$$

### 9.1.3.3 Vergleich der Entwicklungsrisiken der beiden alternativen Leichtbaukonzepte

Der Risikowert unterstützt die Produkt- und Produktionssystementwickler bei der Entscheidungsfindung zwischen verschiedenen Lösungsalternativen. Der Risikowert dient zur Entscheidungshilfe, wenn zwei oder mehrere Lösungsalternativen miteinander verglichen und damit auf das geringste Risiko hin bewertet werden. Zu beachten ist jedoch, dass nur das technische Risiko betrachtet wird. (Albers et al., 2021) Je nach Randbedingungen kann auch das technische Entwicklungsrisiko stark schwanken. Wird der Polymereinsatz in-House gefertigt, wozu erst eine neue Anlage angeschafft und das Know-How zur Fertigung erarbeitet werden muss? Oder wird das Bauteil an einen Lieferanten vergeben, dessen Kernkompetenz in der Produktion von Spritzgussbauteilen besteht? Für diese Alternativen müssen die Kritikalitäten der Auswirkungen unterschiedlich bewertet werden. Dementsprechend können auch für ein und das selbe Konzept, mehrere Berechnungen unter Betrachtung unterschiedlicher Randbedingungen und Strategien durchgeführt werden.

Zum Vergleich der beiden Konzepte werden die in den Kapiteln 9.1.3.1 und 9.1.3.2 berechneten Faktoren  $D_C$  und  $\delta_{N,n}$  und der daraus folgenden Entwicklungsrisiken genutzt. Trägt man  $D_C$  und  $\delta_{N,n}$  der beiden Konzepte in das Risikodiagramm (siehe Kapitel 8.1.4) ein, so erhält man folgende Abbildung:

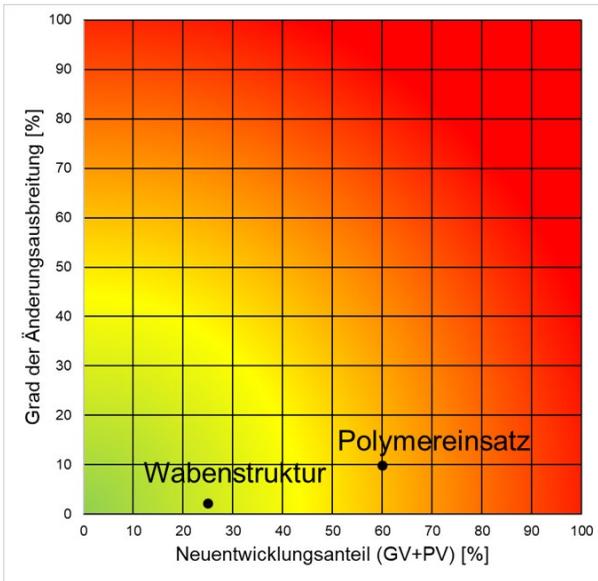


Abbildung 9.8: Risikodiagramm der beiden alternativen Leichtbaukonzepte unter Einbezug des Grads der Änderungsausbreitung und des Neuentwicklungsanteils ohne Berücksichtigung derer Kritikalitäten.

Die in dieser Darstellung nicht berücksichtigten Kritikalitäten der Variationen in Produkt und Produktionssystem zeigen sich in den berechneten Entwicklungsrisiken

$$R_{D,Polymereinsatz} = 45,32 \% \quad 9.11$$

$$R_{D,Wabenstruktur} = 12,52 \% \quad 9.12$$

Das technische Entwicklungsrisiko spricht also für die Umsetzung des Konzepts Wabenstruktur. Eine exakte Berechnung der Durchlaufzeit in der Produktion, der notwendigen Investitionskosten und der davon abhängigen Kosten je Stück oder möglicher externer Beziehung von Komponenten wird in der Risikobewertung nicht betrachtet. Damit eignen sich die hier berechneten Faktoren nur zu einer technischen Abschätzung des Entwicklungsrisikos und unterstützen die Produkt- und Produktionssystementwickler damit in der Entscheidungsfindung.

## **9.2 Bewertung des Entwicklungsrisikos für ein Autoidentifikationssystem eines Antriebskegelrads**

Die in Kapitel 8 weiterentwickelte Methode wird nachfolgend für das bereits in Kapitel 7.1 analysierte Antriebskegelrad angewendet. Somit wird gezeigt, wie die Methode für die Bewertung alternativer Lösungen für die Umsetzung einer Industrie 4.0-Technologie angewandt wird.

### **9.2.1 Modellierung der relevanten Referenzsystemelemente**

Basierend auf dem in Kapitel 7.1 mittels der Funktions-, Gestalt- und Prozessebene analysierten Referenzprodukts, ist in Abbildung 9.9 eine reduzierte Auswirkungsmatrix dargestellt. In dieser sind nur die Elemente dargestellt, die direkt mit dem Autoidentifikationssystem direkt in Verbindung stehen oder eine Wechselwirkung mit solchen Elementen haben. Der DMC zur Identifikation des AKR ist im Referenzprodukt auf Fläche 6 geprägt, kann vor und nach den verschiedenen Produktionsprozessen jedoch nicht ausgelesen werden, da entsprechende Rotationsmaschinen fehlen, die einen automatisierten Scan des DMC ermöglichen.



## 9.2.2 Modellierung alternativer Produktkonzepte

Wie in Kapitel 7.1 erwähnt, ist in alternativen Lösungen der nächsten Produktgeneration das Prägen des DMC auf Fläche 6 unter Nutzung von Rotationsmaschinen oder das Prägen auf die Stirnseite möglich, was eine GV dieser nach sich zieht. Diese beiden Alternativen werden nachfolgend modelliert und analysiert.

### 9.2.2.1 Alternative 1: AV des Prägeprozesses des DMC mit GV der Stirnseite des AKR

Eine mögliche, alternative Lösung für die in Entwicklung befindliche Produktgeneration  $G_n$  ist das Prägen des DMC auf die Stirnseite des AKR. Dies stellt eine AV des Produktionsprozesses dar. Zum Auslesen des DMC sind somit keine Rotationsmaschinen notwendig, da er vor und nach den Bearbeitungsschritten jederzeit offen zugänglich ist. Auf der Stirnseite des Referenzprodukts  $G_{n-1}$  ist jedoch nicht ausreichend Platz für das Aufbringen des DMC vorhanden, sodass hier eine GV in Form einer Vergrößerung des Durchmessers notwendig ist. Eine direkte Folge hiervon ist, dass auch der Durchmesser von Fläche 9 samt deren Verzahnung variiert werden muss. Dies führt einerseits zu Anpassungen derer Produktionsprozesse aber insbesondere auch dazu, dass die Funktion „Drehmoment übertragen“, die in Wechselwirkung mit dem Abtriebskegelrad erfüllt wird, beeinflusst wird. Es sind somit auch Wechselwirkungen über die betrachtete Systemgrenze hinaus vorhanden.



Sowohl in der Produktgestalt und den zugehörigen Produktionsprozessen gibt es ausgehend von der Änderung der Prägestelle des DMC also eine Vielzahl an notwendigen Änderungen. Der Pfad der Änderungsausbreitung ist in Abbildung 9.11 dargestellt.

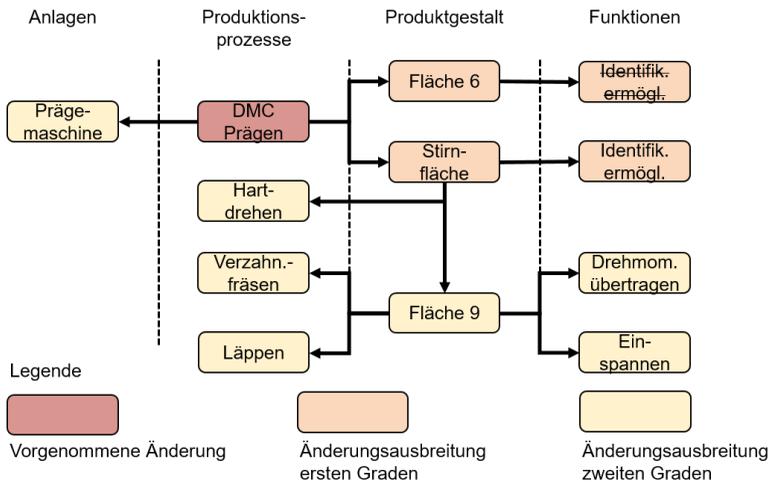


Abbildung 9.11: Pfad der Änderungsausbreitung über die initiale Ausprägungsvariation des Produktionsprozesses „DMC Prägen“.

### 9.2.2.2 Alternative 2: ÜV des Prägeprozesses und AKR

Die zweite in Kapitel 7.1 aufgeführte alternative Lösung zur Identifikation des AKR ist eine ÜV des Prägeprozesses und des AKR. Um den DMC über den gesamten Produktionsprozess auslesen zu können, sind vor und nach den einzelnen Bearbeitungsschritten Rotationsmaschinen notwendig. Daraus leitet sich die folgende Auswirkungsmatrix ab:



Durch die ÜV des AKR und der ÜV der Produktionsprozesse stellen sich bis auf die – durch die Randbedingungen erforderliche – neue Rotationsmaschine keinerlei Wechselwirkungen dar.

### 9.2.3 Bestimmung des Entwicklungsrisikos

Um das Entwicklungsrisiko der beschriebenen Beispiele zu bewerten, werden auch in diesem Beispiel gemäß Kapitel 8.1.4 die Neuentwicklungsanteile berechnet und mit dem Grad der Änderungsausbreitung (siehe Kapitel 8.1.3) kombiniert.

#### 9.2.3.1 Entwicklungsrisiko der Alternative 1: AV des Prägeprozesses des DMC mit GV der Stirnseite des AKR

Aus Abbildung 9.10 lässt sich die Anzahl der prinzipiell möglichen Änderungsausbreitung  $\sum C_p = 79$  und die Summe der relevanten, farbig markierten Änderungsausbreitungen  $\sum C_r = 11$  ablesen. Daraus ergibt sich nach Gleichung 8.1 der Grad der Änderungsförderung  $D_C = 0,1392 = 13,92\%$ . Der Faktor  $k_2$  zur Gewichtung der Änderungsausbreitung in der Berechnung des Entwicklungsrisikos berücksichtigt die produktionsseitigen Kritikalitäten. Bei der Variation des Produktionsprozesses „DMC Prägen“ handelt es sich um eine AV, die Prozessparameter des Prozesses müssen angepasst werden, sind jedoch beherrschbar. Somit wird festgelegt:

$$k_{2,DMC\ Prägen} = 0,3 \qquad 9.13$$

Die Prägemaschine selbst stellt eine ÜV des Produktionssystems dar, durch die Ausprägung auf die planare Stirnseite stellen sich lediglich andere, einfache Anforderungen dar. Daher gilt:

$$k_{2,Prägemaschine} = 0,1 \qquad 9.14$$

Die GV der Stirnfläche bzw. die Position des DMC wirkt sich auf den Prozess „Einspannen“ aus, jedoch findet hier eine ÜV statt, bei der lediglich die vorhandenen Einflüsse berücksichtigt werden müssen. Für den Prozess „Hartdrehen“ ist durch die Vergrößerung des Durchmessers der Stirnfläche eine AV notwendig, jedoch handelt es sich um einen bekannten Prozess mit gleichen Materialien, sodass diese mit einer geringen Kritikalität zu bewerten ist. Damit ergibt sich:

$$k_{2,Einspannen} = k_{2,Hartdrehen} = 0,2 \quad 9.15$$

Die Ausprägung der Produktionsprozesse „Verzahnungsfräsen“ und „Läppen“ der Fläche 9 variieren, da sich der Durchmesser von Fläche 9 ändert. Zwar handelt es sich um eine AV, jedoch sind diese Prozesse sehr komplex, benötigen spezielles Werkzeug und deren Qualität ist äußerst kritisch für die Funktionserfüllung und Lebensdauer des Produkts. Daher wird festgelegt:

$$k_{2,Verzahnungsfräsen} = k_{2,Läppen} = 0,8 \quad 9.16$$

Unter Berücksichtigung aller Teilkritikalitäten des Produktionssystems ergibt sich:

$$k_2 = \frac{\sum k_{2,j}}{\text{Anzahl relev. Auswirkungen im Produktionssystem}} \quad 9.17$$

$$= \frac{0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,3 + 0,8 + 0,8}{6} = 0,40$$

Für die Berechnung der Gewichtung  $k_1$  des Neuentwicklungsanteils werden die Teilkritikalitäten der betroffenen Elemente der Produktgestalt festgelegt. Bei Fläche 6 handelt es sich durch die Wegnahme des DMC um eine PV, jedoch wird die Gestalt dadurch weniger komplex. Bei der Stirnfläche handelt es sich um eine PV samt GV, da der DMC neu hinzu kommt und der Durchmesser der Fläche vergrößert werden muss. Dies zieht direkt eine GV der Fläche 9 samt deren Verzahnung nach sich, was sich auf die Hauptfunktion „Drehmoment übertragen“ und damit auf das ganze Getriebe auswirkt. Die Teilkritikalitäten werden daher wie folgt definiert:

$$k_{1,Fläche\ 6} = 0,1 \quad 9.18$$

$$k_{1,Stirnfläche} = 0,8 \quad 9.19$$

$$k_{1,Fläche\ 9} = 1,0 \quad 9.20$$

Und damit

$$k_1 = \frac{\sum k_{1,i}}{\text{Anzahl an Teilsystemen}} = \frac{0,1 + 0,8 + 1,0}{3} = 0,63 \quad 9.21$$

Da insgesamt drei der elf Elemente der Produktgestalt durch AV oder PV variiert werden, ergibt sich nach Gleichung 8.2 sich damit ein Neuentwicklungsanteil  $\delta_{N,n} = 27,27\%$ .

Das Gesamtentwicklungsrisiko  $R_D$  für diese Alternative samt dessen Produktionssystem berechnet sich zu

$$R_{D,n} = \sqrt{(0,63 * 27,27 \%)^2 + (0,40 * 13,92 \%)^2} = 18,15 \% \quad 9.22$$

### 9.2.3.2 Entwicklungsrisiko der der Alternative 2: ÜV des Prägeprozesses und AKR

Da in Alternative 2 lediglich der neue Produktionsprozess „Rotieren“ samt der Rotationsmaschine hinzukommt, sonstige Prozesse und das Produkt an sich jedoch unberührt bleiben, ergibt sich die Anzahl der prinzipiell möglichen Änderungsausbreitung nach Abbildung 9.12 zu  $\sum C_p = 98$  und die Summe der relevanten, farbig markierten Änderungsausbreitungen zu  $\sum C_r = 2$ . Der Grad der Änderungsausbreitung berechnet sich somit nach Gl. 8.1 zu  $D_C = 2,04 \%$ . Der Neuentwicklungsanteil des Produkts  $\delta_{N,n} = 0\%$ .

Somit ist lediglich der Gewichtungsfaktor  $k_2$  für den Grad der Änderungsausbreitung zu bestimmen, welcher sich aus  $k_{2, \text{Rotieren}}$  und  $k_{2, \text{Rotationsmaschine}}$  zusammensetzt. Die Rotationsmaschine stellt eine PV des Produktionssystem dar und muss an jedem Produktionsprozess zur Prozesskette hinzugefügt werden und an die individuellen Randbedingungen angepasst werden. Dies stellt einen hohen Aufwand in der Produktionssystementwicklung dar. Somit wird  $k_{2, \text{Rotationsmaschine}}$  festgelegt:

$$k_{2, \text{Rotationsmaschine}} = 1,0 \quad 9.23$$

Für den Rotationsprozess können die vorhandenen Zentrierbohrungen und Flächen zur Werkstückaufnahme genutzt werden, jedoch sind diese in den verschiedenen Produktionsprozessen unterschiedlich. Da es sich um einen neuen Prozessschritt

handelt, der sich jedoch nicht auf die Qualität des Produkts an sich auswirkt, wird ein mittleres, technisches Risiko festgelegt.

$$k_{2, \text{Rotieren}} = 0,6 \quad 9.24$$

Somit ergibt sich

$$k_2 = \frac{\sum k_{2,j}}{\text{Anzahl relev. Auswirkungen im Produktionssystem}} \quad 9.25$$
$$= \frac{1,0 + 0,6}{2} = 0,80$$

Und das gesamte, technische Entwicklungsrisiko zu

$$R_{D,n} = \sqrt{(0,80 * 2,04 \%)^2} = 1,63 \% \quad 9.26$$

### 9.2.3.3 Vergleich der Entwicklungsrisiken der beiden Alternativen

An diesem Anwendungsfall lässt sich gut erkennen, dass sich ein hoher Neuentwicklungsanteil und ein hoher Grad der Änderungsausbreitung zu einem hohen, technischen Entwicklungsrisiko führen. Dies ist in Alternative 1 der Fall. Die beiden technischen Entwicklungsrisiken ergeben sich unter Einbezug der Gewichtungsfaktoren  $k_1$  und  $k_2$  zu:

$$R_{D, \text{Stirnfläche}} = 18,15 \% \quad 27$$

$$R_{D, \text{Fläche6}} = 1,63 \% \quad 28$$

Das Risikodiagramm der beiden Alternativen unter Berücksichtigung von  $D_C$  und  $\delta_{N,n}$  ohne deren Gewichtungsfaktoren ist in Abbildung 9.13 dargestellt.

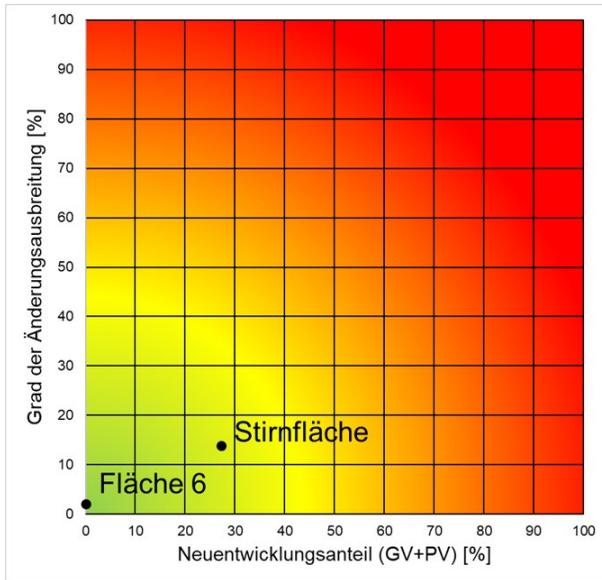


Abbildung 9.13: Risikodiagramm der beiden Alternativen unter Einbezug des Grads der Änderungsausbreitung und des Neuentwicklungsanteils ohne Berücksichtigung derer Kritikalitäten.

Das technische Entwicklungsrisiko spricht also klar für eine Umsetzung des bestehenden Konzepts mit dem DMC auf Fläche 6 und der Ergänzung von Rotationsmaschinen im Produktionssystem. Dies wird auch so vom Automobilhersteller umgesetzt, auch wenn hierdurch hohe Investitionskosten entstehen und die Durchlaufzeit in der Produktion erhöht wird. Das Prägen des DMC auf die Stirnfläche bringt eine Vielzahl kritischer Wechselwirkungen mit sich, weshalb dies nur für eine neue Baureihe in Betracht bezogen werden kann, in der ein neues Getriebe entwickelt wird.



## 10 Diskussion der Ergebnisse und Fazit

Die Methode zur Analyse der Änderungsausbreitung und Risikoanalyse von Variationen an Produkt und Produktionssystem bietet eine Unterstützung zur Entwicklung komplexer Produkte, wobei der Modellierungsaufwand überschaubar bleibt. Das Beispiel in Kapitel 9.1.2.1 zeigt, dass die Änderung eines Elements zu vielen weiteren Änderungen führen kann, die in den verschiedenen Domänen auftreten. Aufgrund der komplexen Vernetzung ist es dem Produktentwickler kaum möglich, die Auswirkungen seiner Entscheidungen im Auge zu behalten und angemessen zu berücksichtigen. Die hier beschriebene matrixbasierte Lösung soll helfen, die Änderungsausbreitung systematisch zu ermitteln und die Auswirkungs- und Risikoanalyse bei der Produktentwicklung und bei Produktvariationen praktisch zu unterstützen. Die Methode unterstützt die Auswirkungs- und Risikoanalyse, indem sie die Elemente hervorhebt, die stark mit anderen Elementen vernetzt sind. Eine Änderung an einem dieser Elemente kann zu umfangreichen Auswirkungen und damit notwendigen Anpassungen anderer Elemente führen, die nicht unbedingt direkt mit dem Element verbunden sind. Die Matrixdarstellung ermöglicht es den Entwicklern, den Aufwand geplanter Variationen abzuschätzen und zu bewerten, ob diese zu einer unkontrollierbaren Änderungsausbreitung mit hohen zu erwartenden Entwicklungszeiten und -kosten führen.

Mit Hilfe der Matrix können auch strategische Faktoren wie Kosten, Produktions-KPI oder vorhandenes Know-How berücksichtigt werden. Beispielsweise kann gezeigt werden, dass eine Änderung aus technologischer Sicht leicht zu implementieren sein kann, aber bei der Betrachtung der strategischen Faktoren wird deutlich, dass die Änderung einen großen Einfluss auf die Kosten haben wird und daher alternative Lösungen in Betracht gezogen werden sollten.

Je nach vom Entwickler festgelegter Systemgrenze kann das gesamte System oder nur einzelne Subsysteme untersucht werden. Es ist möglich, sich auf eine bestimmte Funktion zu konzentrieren, wenn der Produktentwickler daran interessiert ist, problematische Änderungsausbreitungen im System zu ermitteln, die sich aus der Funktionsänderung ergeben, oder Elemente auszuwählen, die Einschränkungen für das System verursachen, weil sie z.B. nicht variiert werden können.

Die Methode bietet auch die Möglichkeit, alternative Lösungen durch die Modellierung unterschiedlicher Matrizen samt der Änderungsausbreitung und der Neuentwicklungsanteile der alternativen Lösungen zu bewerten. Durch die Bewertung und Analyse der Auswirkungen und des damit verbundenen Entwicklungsrisikos und der

Bewertung der strategischen Faktoren der Alternativen kann die beste Lösung ausgewählt werden. Die Methode unterstützt den Produktentwickler bei der Entwicklung der nächsten Produktgeneration und der Durchführung von Variationen am Produkt durch Abschätzung des erforderlichen Änderungsumfangs.

Zur Anwendung der Methode wird viel Know-How der Entwickler über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Systemelementen vorausgesetzt. Häufig bestehen prinzipiell Wechselwirkungen zwischen einzelnen Elementen, je nach Art der Änderung sind diese jedoch nicht relevant, wodurch hierüber keine Änderungsausbreitung stattfindet. Die Methode bietet also nur eine Unterstützung zur Identifikation möglicher Abhängigkeiten, die finale Bewertung obliegt weiterhin den Produkt- und Produktionssystementwicklern.

In die Berechnung des Entwicklungsrisikos  $R_{D,n}$  fließen in dieser Arbeit die Faktoren  $D_C$  und  $\delta_{N,n}$  zu gleichen Anteilen unter Berücksichtigung derer Gewichtungsfaktoren ein. Da ein variiertes Produktmerkmal häufig durch mehrere Produktionsprozesse hergestellt wird, fällt in der Berechnung des technischen Entwicklungsrisikos der Neuentwicklungsanteil relativ stärker ins Gewicht. Außerdem hat sowohl die definierte Systemgrenze, als auch der Detaillierungsgrad der Modellierung von Produktionsprozessen und Produktgestalt einen großen Einfluss auf das letztendlich berechnete technische Entwicklungsrisiko. Um Alternativen vergleichen zu können, ist es daher wichtig, sowohl die Systemgrenze als auch den Detaillierungsgrad der Modellierung gleich zu halten. Der absolute Wert des technischen Entwicklungsrisikos bietet außerdem keine Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung einer Alternative für die in Entwicklung befindliche Produktgeneration  $G_n$  und deren Produktionssystem, sondern bietet lediglich einen Mehrwert im Vergleich mehrerer Alternativen, um deren relatives Risiko bewerten zu können.

Ergänzt wird die Methode zur Bewertung der Änderungsausbreitung und des Entwicklungsrisikos durch die in Kapitel 6 entwickelten und in Kapitel 1.1 bereits diskutierten Teilmethoden zur Erfassung der Informationen auf Basis der relevanten Referenzsystemelemente und zur Ableitung von Industrie 4.0 Potentialen, die in einem Vorgehensmodell eingegliedert sind.

Somit erfüllt die Methode das in Kapitel 5.2 formulierte Zielsystem in allen nachstehenden Punkten:

- Leitfaden zur ganzheitlichen Betrachtung von Produkt und Produktionssystem,
- Nutzung von Referenzsystemelementen als Wissensbasis,
- Unterstützung bei der Erfassung von Informationen aus dem Referenzsystem,

- Wechselwirkungen zwischen P & PS modellieren,
- Nutzen und Weiterentwicklung von Elementen der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung,
- Möglichkeit zur Identifikation von Potentialen im Kontext von Industrie 4.0,
- Möglichst frühe und begleitende Anwendbarkeit der Methode im Entwicklungsprozess,
- Anwendbar für unterschiedliche Anwendungsfälle,
- Skalierbarkeit im Detaillierungsgrad,
- Möglichkeit zur Ableitung von Auswirkungen und Risiken alternativer Lösungen oder möglicher Variationen an Produkt oder Produktionssystem auf dieselbe und auf die jeweils andere Domäne.

## 10.1 Beantwortung der Forschungsfragen und -hypothese

Nachfolgend wird auf die Beantwortung der Forschungsfragen eingegangen:

### Forschungsfrage 1

Wie kann auf Basis des **Modells der PGE** der Produktentwickler in der ganzheitlichen Betrachtung von **Produkt- und Produktionssystementwicklung** unterstützt werden?

- Das entwickelte Vorgehensmodell eignet sich als Unterstützung im PPCD, da es Methoden zur Analyse des Referenzsystems, zur Identifikation von Industrie 4.0-Potentialen bis hin zur Bewertung alternativer Lösungen beinhaltet.
- Das Vorgehensmodell bzw. die einzelnen Teilmethoden können künftig noch erweitert werden um beispielsweise Aspekte des Design for Manufacturing oder Design for Cost zu berücksichtigen.

## Forschungsfrage 2

Wie können **Wechselwirkungen** zwischen Produkt und Produktionssystem modelliert und damit **Auswirkungen** und **Risiken** identifiziert und bewertet werden?

- Durch tabellarische Vorlagen zur Erfassung der Informationen von Elementen des Referenzprodukts und Referenzproduktionssystems können einfache Zusammenhänge analysiert werden.
- Die Tabellen können als Informationsbasis für eine Auswirkungs- und Risikoanalyse alternativer Lösungen genutzt werden.
- Die Auswirkungsmatrix ermöglicht auf unterschiedlichen Systemebenen eine Analyse der Änderungsfortpflanzung innerhalb und zwischen der Domänen Produkt und Produktionssystem.
- Die Kombination des Grads der Änderungsausbreitung mit dem Neuentwicklungsanteil einer neuen Produktgeneration ermöglicht die Bewertung des Entwicklungsrisikos bei geringem Aufwand. Ist eine detailliertere Risikobetrachtung gewünscht, müssen zusätzliche Elemente in die Betrachtung mit einfließen, beispielsweise eine tiefgehende Untersuchung des Technology Readiness Levels, von Produktions-KPI oder Faktoren aus Politik und Umwelt.

### Forschungsfrage 3

Wie lassen sich **Entwicklungspotentiale für und mit Industrie 4.0** Technologien effizient identifizieren?

- Mit der Methode zum Design with Industrie 4.0 konnte in einem industriellen Anwendungsfall gezeigt werden, wie Entwicklungspotentiale mittels der Daten aus Industrie 4.0 Produktionsprozessen identifiziert werden können.
- Durch die Modellierung relevanter Referenzsystemelemente lassen sich im Sinne von Design for Industrie 4.0 notwendige Variationen am Produkt oder Produktionssystem zur Einführung von Industrie 4.0-Technologien identifizieren.
- Das Entwicklungsrisiko von Industrie 4.0-Technologien bzw. durch diese ausgelöste Variationen an Produkt und Produktionssystem können bewertet werden.
- Die Identifikation geeigneter Sensoren, Aktoren etc. und wie das Produkt und Produktionssystem für deren Einsatz angepasst werden müssen, ist höchst individuell, weshalb in dieser Arbeit hierfür keine allgemeingültige Methode entwickelt wurde. Im Stand der Forschung existieren diverse Methoden, um Sensoren und Technologien im Allgemeinen zu bewerten bzw. deren Vor- und Nachteile zu identifizieren.

Die aufgestellten Forschungsfragen konnten also allesamt durch die Entwicklung und Anwendung geeigneter Methoden beantwortet werden. In Kapitel 11 werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Methoden weiterentwickelt werden können, um deren Anwendung zu vereinfachen oder deren Potential zur Risikoanalyse weiter zu steigern. Auf Basis der beantworteten Forschungsfragen ist die Forschungshypothese verifiziert:

## Forschungshypothese

Auf Grundlage der KaSPro können durch Ergänzung geeigneter Methodenbausteine

- die **Wechselwirkungen** zwischen Produkten und Produktionssystemen **analysiert**,
- und **modelliert** werden,
- um damit **Potentiale** und **Risiken** in der **Produktgenerationsentwicklung und Produktionssystemevolution** zu identifizieren.

# 11 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst und abschließend ein Ausblick auf mögliche, nachfolgende Forschungsarbeiten gegeben.

## 11.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Vorgehensmodell samt Teilmethoden entwickelt, das Produkt- und Produktionssystementwickler im PPCD unterstützt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Teilmethoden zur Erfassung von Informationen aus dem Referenzsystem, zur Modellierung der Abhängigkeiten von Elementen aus Produkt- und Produktionssystem, der Bewertung von Entwicklungsrisiken und der Identifikation von Industrie 4.0-Potentialen.

Im Stand der Forschung wurde die Komplexität des Produktentstehungsprozesses, sowie Methoden und Modelle des PEP, insbesondere zur Auswirkungs- und Risikoanalyse dargestellt. Daraus wurde die Zielsetzung der Forschungsarbeit abgeleitet, da noch keine durchgängige methodische Unterstützung im PPCD existiert, die zugleich bei der Identifikation von Potentialen und Risiken unterstützt und dabei eine niederschwellige Modellierung unter Nutzung von Referenzsystemelementen ermöglicht.

Nach Aufstellung von für diese Arbeit relevanten Definitionen wurde das Zielsystem für die zu entwickelnde Methode definiert, welche anschließend initial entwickelt wurde. Dabei lag der Fokus auf der Erstellung des Vorgehensmodells, sowie der Erfassung von Informationen für das Produkt und Produktionssystem auf Basis des Referenzsystems, sowie einer Methode zur Identifikation von Entwicklungspotentialen von Daten aus Produktionsprozessen im Sinne von Design with Industrie 4.0.

Die initial entwickelten Teilmethoden wurden anhand industrieller Beispiele angewendet. Um mögliche Industrie 4.0-Technologien zur Auto-Identifikation im Produktionsprozess auszuwählen, wurde in der Fertigung eines Antriebskegelrads untersucht, wie Produktfunktionen, Produktgestalt und Produktionsprozesse zusammenhängen. Auf dieser Basis konnten mögliche, einsetzbare Technologien und die hiervon betroffenen Gestaltmerkmale und ggf. vorzunehmende Anpassun-

gen an Produkt und Produktionssystem abgeleitet werden. In einem zweiten Beispiel konnten an einem Windeprozess von Federn mit einer Entwicklungspotentialmatrix Entwicklungspotentiale den dafür notwendigen Aufwänden in Form der Datenmengen und deren Detaillierungsgrad gegenübergestellt werden. Dies zeigt den Aufwand der Datenverarbeitung und notwendigen Versuchen oder gar der dauerhaften Auswertung von Daten aus der Serienproduktion und welche Entwicklungsziele hiermit erreicht werden können.

Nach der Anwendung der initialen Teilmethoden wurde im Rahmen des Projekts I4TP eine weitere Methode entwickelt, um die Auswirkungen von Änderungen in Form einer Änderungsmatrix analysieren und auf dieser Basis in Kombination mit dem Neuentwicklungsanteil das Entwicklungsrisiko bestimmen zu können. Diese Methode wurde am Beispiel eines Getriebegehäuses eines Rollers angewendet, das hinsichtlich seines Leichtbaupotentials optimiert werden sollte und anhand eines AKR aus der Automobilindustrie, welches mittels eines DMC in dessen Produktion identifiziert werden soll. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Änderungsausbreitung initialer Variationen an einem Gestaltelement des Produkts auf weitere Elemente des Produkts und des Produktionssystems übersichtlich evaluiert werden konnte und unter Berücksichtigung des Neuentwicklungsanteils und des Grads der Änderungsausbreitung das Entwicklungsrisiko bestimmt werden konnte. Mit Hilfe der Methode kann das technische Entwicklungsrisiko bewertet werden, der Einfluss weiterer Faktoren wie Produktions- und Entwicklungskosten können zwar in die Matrix aufgenommen werden, müssen in zukünftigen Arbeiten jedoch gesondert in der Risikobetrachtung untersucht werden.

Abschließend wurden die durchgeführten Arbeiten diskutiert und gezeigt, dass die Forschungshypothese durch die Beantwortung der Forschungsfragen verifiziert werden konnte.

## 11.2 Ausblick

Während der Entstehung der vorliegenden Arbeit konnten einige Aspekte identifiziert werden, die in weiteren Arbeiten erforscht werden können.

Dass die Planung bzw. Entwicklung eines Produktionssystems Bestandteil des Produktentstehungsprozesses ist, wurde im Stand der Forschung dargelegt. In welchen Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses des iPeM, welche Informationen aus den Domänen Produkt und Produktionssystem vorliegen, wie diese in Entwicklungsteams ausgetauscht werden können und wann der richtige Zeitpunkt hierfür ist,

konnte in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht werden. Erkenntnisse hierüber würden den Entwicklern ermöglichen, Modellierungsaufwände zu reduzieren und den richtigen Detaillierungsgrad hierfür auszuwählen.

Des Weiteren kann die entwickelte Methode zur Auswirkungs- und Risikoanalyse erweitert werden, indem weitere Domänen wie das Validierungssystem mit modelliert werden. Da der Modellierungsaufwand und auch die Anzahl der dazu notwendigen Personen steigen, ist spätestens hier die Umsetzung der Methode in einem Softwaretool ratsam. Hierzu wurden bereits mit dem Cameo Systems Modeler die Zusammenhänge zwischen Produktfunktion, -gestalt und Produktionsprozessen in SysML<sup>1</sup> modelliert, was eine automatisierte Hervorhebung und Evaluation von Abhängigkeiten und eine detaillierte Verknüpfung aller Informationen ermöglicht (Mandel et al., 2020). Aufbauend hierauf, kann durch die Gewichtung von Abhängigkeiten eine automatisierte Bewertung der Entwicklungsrisiken entwickelt werden.

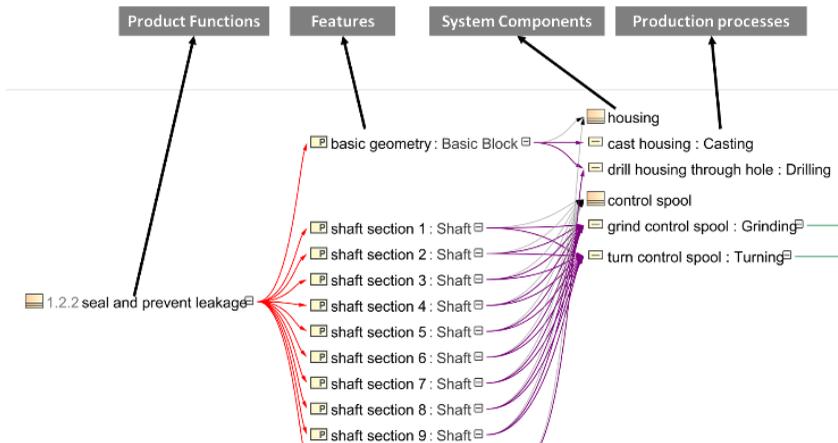


Abbildung 11.1: Darstellung der Verknüpfung von Elementen eines Mehrwegeventils in den Domänen Produkt und Produktionssystem (Mandel et al., 2020).

Ein weiterer, möglicher Anknüpfungspunkt an diese Arbeit stellt die Untersuchung der Abhängigkeiten von Variationsarten zwischen Produkt und Produktionssystem dar. Anhand eines einfachen Beispiels eines Quaders samt Bohrung, die variiert

<sup>1</sup> Systems Modeling Language



---

der Produktgeneration  $G_{n-1}$  besteht aus einem Quader samt Bohrung in der Mitte einer der Flächen, welche durch einen Bohrprozess gefertigt wird. In der Produktgeneration  $G_n$  findet am Produkt eine Gestaltvariation statt, indem der Durchmesser der Bohrung auf 1 mm verkleinert und die Bohrung außerhalb der Mitte platziert wird. Für das Produktionssystem bedeutet dies eine notwendige Ausprägungsvariation. Es wird ein Bohrer mit kleinerem Durchmesser genutzt und die Prozessparameter der Bohrmaschine ändern sich. In der Produktgeneration  $G_{n+1}$  wird eine weitere Gestaltvariation am Produkt vorgenommen, indem der Durchmesser des Lochs auf 0,05 mm verringert wird. Dies führt am Produktionssystem zu einer notwendigen Prinzipvariation, da der Durchmesser nicht mehr mit einem Bohrprozess gefertigt werden kann. Stattdessen wird die Bohrung erodiert. Dieses einfache Beispiel zeigt deutlich, dass Variationen an Produkt und Produktionssystem unterschiedliche Auswirkungen auf die Variationsarten in anderen Domänen haben können. Eine tiefergehende Untersuchung dieser Zusammenhänge ermöglicht eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsrisiken, insbesondere in der frühen Phase der PGE.



# Literaturverzeichnis

- Albers, A. (1994). Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung, Artikel VDI Berichte 1120, S. 73–105.
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2010* (Bd. 1, S. 343–356).
- Albers, A., Basedow, G., Spadinger, M., Raab, F., Chen, J. & Stürmlinger, T. Herausforderungen bei der Entwicklung von smarten Produktionsmaschinen im Kontext des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2019* (S. 103-111).
- Albers, A. & Braun, A. (2011). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 5-30). Carl Hanser Verlag München.
- Albers, A., Braun, A. & Muschik, S. (2010). Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung. In M. Maurer & S.-O. Schulze (Hrsg.), *Tag des Systems-Engineering* (S. 87-96). Carl Hanser Verlag München.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81(1), S. 13–31. <https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. Produktgenerationsentwicklung-Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015* (S. 1-10).
- Albers, A. & Düser, T. (2010). A New Process for Configuration and Application of Complex Validation Environments Using the Example of Vehicle-in-the-Loop at the Roller Test Bench. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - 2010: Presented at ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 12 - 18, 2010, Vancouver, BC, Canada* (S. 807–816). ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2010-39959>

- Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinerorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl & M. Eigner (Hrsg.), *Smart Engineering* (S. 17–29). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6_3)
- Albers, A., Gladysz, B., Pinner, T., Butenko, V. & Stürmlinger, T. (2016). Procedure for Defining the System of Objectives in the Initial Phase of an Industry 4.0 Project Focusing on Intelligent Quality Control Systems. *Procedia CIRP*, 52, S. 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.067>
- Albers, A., Kürten, C., Rapp, S., Birk, C., Hünemeyer, S. & Kempf, C. *SGE – Systemgenerationsentwicklung : Analyse und Zusammenhänge von Entwicklungspfaden in der Produktentstehung*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000151151>
- Albers, A., Lanza, G., Klippert, M., Schäfer, L., Frey, A., Hellweg, F., Müller-Welt, P., Schöck, M., Krahe, C., Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022). Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles. *Procedia CIRP*, 109, S. 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.231>
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme: Konstruktion. In *Konstruktion Zeitschrift für Produktentwicklung* (7-8/2002, S. 55–60).
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. *ICED 07; 16th International Conference on Engineering Design*, S. 611-619.
- Albers, A., Moeser, G. & Revfi, S. (2018). Synergy Effects by using SysML Models for the Lightweight Design Method “Extended Target Weighing Approach”. *Procedia CIRP*, 70, S. 434–439.
- Albers, A. & Rapp, S. (2021). Model of SGE: System Generation Engineering as Basis for Structured Planning and Management of Development. In D. Krause & E. Heyden (Hrsg.), *Springer eBook Collection. Design Methodology for Future Products: Data Driven, Agile and Flexible* (S. 27–46). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6_2)
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017: Stuttgart, 29. Juni 2017, Wissenschaftliche Konferenz* (S. 345-354). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M., Stürmlinger, T. & Spadinger, M. (2020). Proposing a generalized description of variations

- in different types of systems by the model of PGE - Product Generation Engineering. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, S. 2235–2244. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.315>
- Albers, A., Rapp, S., Klippert, M., Lanza, G. & Schäfer, L. (2022). Produkt-Produktions-CoDesign: Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg. In Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung e.V (Hrsg.), *WiGeP News* (S. 3).
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, S. 1693–1702.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. *Procedia CIRP*, 50, S. 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.168>
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Urbanec, J. & Lüdcke, R. (2014). Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application: Empirical study of method application. In *Proceedings of the 2014 NordDesign Conference* (S. 550–559). <https://doi.org/10.13140/2.1.3924.8164>
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2017). Extended Target Weighing Approach – Identification of Lightweight Design Potential for New Product Generations. In *Design Society 2017 – Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)* (Vol. 4: Design Methods and Tools, S. 367–376).
- Albers, A., Stürmlinger, T., Bause, K., Behrendt, M. & Mandel, C. (2018). Die Bedeutung von Industrie 4.0 in der Produktentwicklung: Design for und Design with Industrie 4.0 im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung e.V (Hrsg.), *WiGeP News* (S. 21–22).
- Albers, A., Stürmlinger, T., Mandel, C., Wang, J [Jiaying], Baneres, M. & Behrendt, M. (2019). Identification of potentials in the context of Design for Industry 4.0 and modelling of interdependencies between product and production processes. *Procedia CIRP*, 84, S. 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.298>
- Albers, A., Stürmlinger, T., Revfi, S. & Behdinan, K. (2021). Extended Target Weighing Approach (ETWA): Impact and risk analysis of lightweight concepts in the product-production system-co-design. *Proceedings of the 23rd International Conference on Engineering Design (ICED21)*, 1, S. 1537–1546. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.415>

- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). Springer.
- Alink, T. (2010). Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Meaning and notation of function for solving design problems with the C&C-Approach. (Dissertation). In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 48), Karlsruhe, <https://doi.org/10.5445/IR/1000023234>.
- Anderl, R. & Fleischer, J. (2015). *Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. VDMA-Verl. Frankfurt am Main.
- Beihoff, B., Oster, C., Friedenthal, S., Paredis, C., Kemp, D., Stoewer, H., Nichols, D. & Wade, J. (2014). *A World in Motion – Systems Engineering Vision 2025*. [https://www.researchgate.net/publication/277019221\\_A\\_World\\_in\\_Motion\\_-\\_Systems\\_Engineering\\_Vision\\_2025](https://www.researchgate.net/publication/277019221_A_World_in_Motion_-_Systems_Engineering_Vision_2025), Zugriffsdatum: 12.03.2023
- Brand KG. (2020). *Bogenfeder, persönliche Mitteilung am 07.05.2020*.
- Browning, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), S. 292–306. <https://doi.org/10.1109/17.946528>
- btelligent.com. *Industrie 4.0*. <https://www.btelligent.com/themen/industrie-40/>, Zugriffsdatum: 12.03.2023
- Clarkson, P., Simons, C. & Eckert, C. (2001). Predicting Change Propagation in Complex Design. *Proceedings ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 126(5), S. 788–797. <https://doi.org/10.1115/1.1765117>
- Danilovic, M. & Browning, T. R. (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management*, 25(3), S. 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>
- Eckert, C., Clarkson, P. & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 15(1), S. 1–21.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (6. Aufl.). Carl Hanser Verlag München.
- Eppinger, S. D. & Browning, T. R. (2012). *Design structure matrix methods and applications. Engineering systems*. MIT Press, Massachusetts.

- Eversheim, W. (2012). *Organisation in der Produktionstechnik Band 4*. Springer-Verlag Berlin.
- Fleischer, J., Albers, A., Ovtcharova, J., Becker, J., Lanza, G., Zhang, W., Zhang, T., Qiao, F., Ma, Y., Wang, J [Jiahai], Wu, Z., Ehrmann, C., Gönnheimer, P., Behrendt, M., Mandel, C., Stürmlinger, T., Klippert, M., Kimmig, A., Schade, F., . . . Rossol, A.-S. (2022). *Final Report Sino-German Industry 4.0 Factory Automation Platform*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000143693>
- Fleischer, J., Doppelbauer, M., Albers, A., Fraider, F., Halwas, M., Wirth, F., Schmitt, M., Breining, P., Braumandl, A., Kübler, M., Bause, K. & Ott, S. (2022). Product-Production-Co-Design for Agile Production of Electric Traction Motors. *35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS35)*, Oslo, in press.
- Fleischer, J., Hausmann, L. & Wirth, F. (2021). Production-oriented design of electric traction drives with hairpin winding. *Procedia CIRP*, 100, S. 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.080>
- Frankenberger, E., Badke-Schaub, P. & Birkhofer, H. (1998). *Designers: The Key to Successful Product Development*. Springer London.
- Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T. & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0*. Fraunhofer Verl. Stuttgart.
- Gausemeier, J., Lanza, G. & Lindemann, U. (2012). *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren: Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung* (1. Aufl.). Carl Hanser Verlag München.
- Gausemeier, J., Plass, C. & Wenzelmann, C. (2007). *Strategisches Produktionsmanagement* (1. Aufl.). Carl Hanser Verlag München.
- Gönnheimer, P., Kimmig, A., Mandel, C., Stürmlinger, T., Yang, S., Schade, F., Ehrmann, C., Klee, B., Behrendt, M., Schlechtendahl, J., Fischer, M., Trautmann, K., Fleischer, J., Lanza, G., Ovtcharova, J., Becker, J. & Albers, A. (2019). Methodical approach for the development of a platform for the configuration and operation of turnkey production systems. *Procedia CIRP*, 84, S. 880–885. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.260>
- Handelsblatt. (2018). *Tesla-Chef Musk erklärt die Produktionsprobleme beim Model 3*. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/automatisierte-produktion-tesla-chef-musk-erklaert-die-produktionsprobleme-beim-model-3/21178290.html?ticket=ST-512567-t65x1F3w9JdMauV6y1kp-ap1>, Zugriffsdatum: 21.04.2021
- Hippenmeyer, H. & Moosmann, T. (2016). *Automatische Identifikation für Industrie 4.0. Springer Vieweg*. Springer Berlin Heidelberg.
- Hompel, M., Büchter, H. & Franzke, U. (2008). *Identifikationssysteme und Automatisierung. VDI*. Springer Berlin Heidelberg.

- Hompel, M., Vogel-Heuser, B. & Bauernhansl, T. (Hrsg.). (2017). *Springer Reference Technik. Handbuch Industrie 4.0* (2. Aufl.). Springer Vieweg Berlin.
- Inkermann, D., Schneider, D., Martin, N. L., Lembeck, H., Zhang, J. & Thiede, S. (2019). A framework to classify Industry 4.0 technologies across production and product development. *Procedia CIRP*, 84, S. 973–978.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.218>
- Keller, R., Eger, T., Eckert, C. & Clarkson, P. (2005). Visualising change propagation. *Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design*, Paper Nr. DS35\_504.44.
- Kinkel, S. & Som, O. (2007). *Strukturen und Treiber des Innovationserfolgs im deutschen Maschinenbau: Verbreitung und Effekte von innovationsunterstützenden Technik-, Organisations- und Kooperationskonzepten*.  
<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/modernisierungsproduktion/erhebung2006/pi41.pdf>, Zugriffsdatum: 09.03.2021
- Klingler, S. (2017). Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung. A Method for an Efficient and Effective Support of Continuous Validation in the Context of PGE - Product Generation Engineering. (Dissertation). In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 101), Karlsruhe, <https://doi.org/10.5445/IR/1000073864>.
- Kohl, M., Malik, B., Lopitzsch, J. & Fottner, J. (2019). Auswahl- und Priorisierungsmodell für Industrie 4.0-Use Cases in der Logistik. In *Logistics Journal: Proceedings 2019* (Paper Nr. 34).  
[https://doi.org/10.2195/lj\\_Proc\\_kohl\\_de\\_201912\\_01](https://doi.org/10.2195/lj_Proc_kohl_de_201912_01)
- Koller, P. & Hardjosuwito, A. (2015). Lapping of hypoid gear sets for automotive purposes – benefits and challenges. *International Conference On Gear Production. VDI-Berichte 2255.2*, S. 1347–1356.
- Krause, D., Kipp, T. & Bles, C. (2012). Modulare Produktstrukturierung. In F. Rieg & R. Steinhilper (Hrsg.), *Handbuch Konstruktion* (2. Aufl., S. 657–678). Carl Hanser Verlag München.
- Mandel, C., Stürmlinger, T., Yue, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). Model-Based Systems Engineering Approaches for the integrated development of product and production systems in the context of Industry 4.0. In IEEE (Hrsg.), *SysCon 2020: 14th Annual IEEE International Systems Conference* (S. 1-7).
- Mankins, J. C. (1995). *Technology Readiness Levels*.  
[https://aiaa.kavi.com/apps/group\\_public/download.php/2212/TRLs\\_MankinsPaper\\_1995.pdf](https://aiaa.kavi.com/apps/group_public/download.php/2212/TRLs_MankinsPaper_1995.pdf), Zugriffsdatum: 20.04.2021

- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Ein Ansatz zur Entwicklung von Konstruktionsunterstützung auf Basis des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM. (Dissertation). In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 74), Karlsruhe, <https://doi.org/10.5445/IR/1000045823>.
- Marxen, L. & Albers, A. (2012). Supporting validation in the development of design methods. *International Design Conference - Design 2012*, S. 1009-1018.
- Matthiesen, S. (2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. A contribution to the basis definition of the element model "Working Surface Pairs & Channel and Support Structures" about the correlation between layout and function of technical systems (Dissertation). In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 6), Karlsruhe, <https://doi.org/10.5445/IR/12092002>.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., Bd. 22, S. 397–465). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13)
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation – Using the C&C2-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. *Procedia CIRP*, 70, S. 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.039>
- Matthiesen, S., Grauberger, P. & Windisch, E. (2020). Erkenntnisgewinn in der Gestaltung mit Rapid Prototyping Ersatzsystemen durch Modellbildung und Parametertransformation. In R. Lachmayer, R. B. Lippert & S. Kaieler (Hrsg.), *Konstruktion für die Additive Fertigung 2018* (S. 145–164). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-59058-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59058-4_9)
- Maurer, M. (2007). *Structural Awareness in Complex Product Design. Dissertation*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung (Dr. Hut).
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). *Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung* (7. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer Berlin Heidelberg.
- Rapp, S., Barg, M., Klotz, T., Birk, C. & Albers, A. (2020). Influencing factors on the retrospective analysis of variation shares with C&C<sup>2</sup>A-based criteria in Product Generation Engineering. *Procedia CIRP*, 91, S. 781–788. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.235>

- Reinhart, G., Lindemann, U. & Heinzl, J. (1996). *Qualitätsmanagement: Ein Kurs für Studium und Praxis*. Springer Berlin Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-80210-2>
- Reinhart, G. & Zühlke, D. (2017). Von CIM zu Industrie 4.0. In G. Reinhart (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0* (S. 28–35). Carl Hanser Verlag München.
- Reiß, N. (2018). Ansätze zur Steigerung der Methodenakzeptanz in agilen Prozessen der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Approaches to increase the acceptance of methods in agile processes of PGE – Product Generation Engineering. (Dissertation). In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 112), Karlsruhe,  
<https://doi.org/10.5445/IR/1000084762>.
- Revfi, S., Gladysz, B., Spadinger, M., Albers, A. & Staeves, J. (2020). Erweiterter Target Weighing Ansatz (ETWA): Semiquantitatives Bewertungsmodell für Herstellkosten neuer Konzeptideen. *Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, 72(01-02), S. 72–77.
- Revfi, S., Wilwer, J., Behdinan, K. & Albers, A. (2020). Design Readiness of Multi-Material Concepts: Manufacturing and Joining Technology Integrated Evaluation of Concept Maturity Levels Using Cardinal Coefficients. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, S. 1067–1076.  
<https://doi.org/10.1017/dsd.2020.274>
- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In G. Ropohl (Hrsg.), *Systemtechnik, Grundlagen und Anwendung* (S. 1–77). Carl Hanser Verlag München.
- Schuh, G., Rudolf, S. & Riesener, M. Design for industrie 4.0. *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*, 84(84), S. 1387–1396.
- Schuh, G., Scholz, P., Scheuer, T. & Latz, T. (2021). Industrie 4.0 als Chance gegen den Fachkräftemangel. *Industrie4.0 Management*, 37, S. 12 ff.  
[https://shop.gito.de/media/products/Leseprobe\\_5386.pdf](https://shop.gito.de/media/products/Leseprobe_5386.pdf)
- Sigg, A. (2015). Federwindmaschine mit einstellbarer Schnitteinrichtung. Europäische Union. <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20150121/patents/EP2826572NWA1/document.html>, Zugriffsdatum: 12.03.2023
- Specht, G., Beckmann, C. & Amelingmeyer, J. (2002). *F&E-Management – Kompetenz im Innovationsmanagement* (2., überarb. und erw. Aufl.). Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart.
- Steimer, C. & Aurich, J. C. (2016). Analysis of Information Interdependencies Between Product Development and Manufacturing System Planning in Early Design Phases. *Procedia CIRP*, 50, S. 460–465.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.134>

- Stürmlinger, T., Comak, A., Gerdhenrichs, S., Albers, A. & Schmitt, R. H. (2019). Methodical analysis and selection of auto identification systems in the gear box manufacturing. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *VDI-Berichte 2355 // International Conference on Gears 2019: Garching/Munich, Germany September 18-20, 2019* (Bd. 2019, S. 1509–1520). VDI Verlag GmbH.
- Stürmlinger, T., Gladysz, B., Pinner, T. & Butenko, V. (2016). *Workshops zur Identifikation von Rahmenbedingungen und Anwendungsfällen zur Einführung von Industrie 4.0 Technologien für die Qualitätsregelung: Teilnehmende Firmen: Brand KG; Wafios AG; Dreher Präzisionsdrehteile GmbH; cirp GmbH; GEWATEC GmbH & Co.KG; ASI DATAMYTE GmbH.*
- Stürmlinger, T., Gladysz, B., Strauch, M. & Albers, A. (2018). Design with Industry 4.0 – Priorization of sensor data for a smart data driven product development process. *Proceedings of TMCE 2018*, S. 439–450.
- Stürmlinger, T., Jost, D., Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). Impact and risk analysis in the integrated development of product and production system. *Procedia CIRP*, 91, S. 627–633.
- UK Ministry of Defence. (1996). *Defence Standard 00-56 (PART 1)/Issue 2: Safety Management Requirements for Defence Systems.*
- Vajna, S., Bley, H., Hehenberger, P., Weber, C. & Zeman, K. (2009). *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung: SpringerLink : Bücher.* Springer Berlin Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-36039-1>
- Verein deutscher Ingenieure. (1987). *VDI2235 - Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren.* Beuth Verlag Berlin.
- Verein deutscher Ingenieure. (1996). *VDI 2803: Funktionenanalyse – Grundlagen und Methode.* Beuth Verlag Berlin.
- Wafios AG. (2021). *Federwindmaschine FUL 56.* <https://www.wafios.com/nc/maschinen/produktgruppe/druckfedermaschinen/>, Zugriffsdatum: 29.03.2021

## **Studentische Abschlussarbeiten die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor Co-betreut wurden**

- Comak, A. (2018). *Analyse und Bewertung von Systemen zur Bauteilidentifikation und Rückverfolgbarkeit in der Antriebskomponentenfertigung im Zuge der Realisierung von Industrie 4.0.* Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Jost, D. (2019). *Entwicklung einer Methode zur Auswirkungs- und Risikoanalyse in der Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Wang, J [Jiaying]. (2018). *Analyse der Wechselwirkungen von Funktionen, Prozessen und Elementen eines Produkts und Produktionssystems im Kontext von Industrie 4.0*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

