

Simon Matthias Rapp

**Beitrag zur empirisch basierten Planung,  
Steuerung und methodischen Unterstützung  
von Variationen auf der Basis eines  
Referenzsystems im Modell der PGE –  
Produktgenerationsentwicklung**

Contribution to empirically based planning, control  
and methodological support of variations on the  
basis of a reference system in the model of PGE –  
Product Generation Engineering

Band 136

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2021  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen  
06224-7697915

ISSN 1615-8113



# **Beitrag zur empirisch basierten Planung, Steuerung und methodischen Unterstützung von Variationen auf der Basis eines Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung**

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. Simon Matthias Rapp

Tag der mündlichen Prüfung: 14.04.2021

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber



# 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 136

Die Produkte und technischen Lösungen haben sich in den letzten 20 Jahren in allen Branchen stürmisch weiterentwickelt. Die Leistungspotenziale konnten durch die zunehmende Integration von Mechanik, Elektronik und Software zu mechatronischen Gesamtlösungen auf ein Niveau mit hohem Funktionsumfang geführt werden. Gleichzeitig bieten die Lösungen vielfältige Potenziale zur Produktdifferenzierung in den zunehmend globalen und sich zu Käufermärkten entwickelnden Absatzsegmenten. Dieses Potenzial zur Produktdifferenzierung ist im Wettbewerb zwingend erforderlich. Es führt zu einem steten Wettbewerb in der Anreicherung neuer Produktgenerationen mit zusätzlichen Funktionen und Gestaltungen, um den Kundennutzen und den Anwendernutzen zu steigern. Gleichzeitig muss allerdings auch der sogenannte Anbieternutzen berücksichtigt werden. Das heißt, Lösungen müssen so entwickelt werden, dass die Kostenstruktur es erlaubt, die Produkte auch mit den notwendigen Margen am Markt vertreiben zu können. Dabei definiere ich eine Produktgeneration als ein eigenständiges sozio-technisches System dessen Elemente Produkte sind und das durch jeweils eine individuelle Time-to-Market und eine individuelle Time-in-Market gekennzeichnet ist. Ziel ist es mit den Produkten einen geplanten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen zu realisieren. Die Produkte einer Produktgeneration haben dabei eine individuelle Nutzungsdauer, die im Allgemeinen deutlich größer ist als die Time-in-Market der Produktgeneration.

Insgesamt führt diese Entwicklung der Märkte zu einer dramatisch gesteigerten Dynamik in den Entwicklungsprozessen. Die Produktgenerationsfolge verkürzt sich, wobei sich hier natürlich die jeweiligen Produktsegmente unterschiedlich entwickeln. Im Bereich der Konsumerelektronik ist es heute durchaus üblich, dass Produktgenerationen weniger als ein Jahr am Markt vertrieben werden. In der Automobilindustrie hat sich dieser Generationswechsel zwar ziemlich konstant bei vier bis fünf Jahren gehalten, allerdings werden hier die technischen Lösungen durch Updates auch während dieser Time-In-Market der Produktgeneration über sogenannte Face-Lifts immer wieder angereichert. Im Bereich der Haushaltselektronik ist ebenfalls eine erhebliche Beschleunigung der Generationsfolgen festzustellen, so dass von einem generellen Trend gesprochen werden kann.

Diese Dynamik in den Entwicklungsprozessen so antizipieren zu können, dass die erarbeiteten technischen Lösungen marktattractiv sind und dabei gleichzeitig bei möglichst geringen Entwicklungskosten eine hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit erreichen, ist eine große Herausforderung. Ein Modell, mit dem diese Herausforderung durch strukturiertes Entwicklungsmanagement unterstützt werden kann, ist das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS, das auf der Hypothese basiert, dass alle Produkte auf der Basis von Referenzen, die in einem Referenzsystem zusammengefasst und modelliert werden, entwickelt werden können. Durch Nutzung des systemtheoretischen Konzeptes von ROP-OHL, der die Beschreibung jedweder menschgemachter Systeme durch die Verknüpfung eines Zielsystems und eines Objektsystems mittels eines geeigneten Handlungssystems

beschreibt, kann dieser Ansatz universell auch unter den heutigen komplexen Randbedingungen genutzt werden. An diesem Modell forscht die Gruppe von Albers nun seit etwa 10 Jahren.

Das Modell der PGE beschreibt die Entwicklung neuer Systeme durch zwei grundlegende Hypothesen:

Jede Entwicklung eines neuen Systems basiert auf einem Referenzsystem: Das Referenzsystem für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist ein System, dessen Elemente bereits existierenden oder bereits geplanten sozio-technischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation entstammen und Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung der neuen Produktgeneration sind.

Die Teilsysteme des neuen Systems werden, ausgehend von den Teilsystemen des Referenzsystems, im Einzelnen jeweils durch eine und zusammen durch eine Kombination aus drei Variationsarten entwickelt: Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation. Bei mechatronischen Systemen wird die Ausprägungsvariation auch als Gestaltvariation bezeichnet.

Mit diesem Modell kann jede Art von Produktentwicklung – von einer absoluten Neuentwicklung, z.B. auf Basis von Forschungsergebnissen als Referenzelement, über typische Generation 1 Entwicklungen, bei der eine völlig neue Lösung für einen evtl. auch noch neuen Markt erarbeitet werden muss – sogenannte „White-Paper-Entwicklungen“ bis hin zu den typischen und am häufigsten in der Praxis vorkommenden Entwicklungen von Folgegenerationen – auch „Brown-Paper-Entwicklungen“ genannt – modelliert werden. Das Modell ist durch diese Universalität besonders geeignet die Bedürfnisse der Praxis abzudecken. In diesem Kontext ist die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Simon Rapp angeordnet. Er hat mit seiner Arbeit die gesamte Basis des Modells vollständig mit erforscht und hier erstmalig in dieser Tiefe dargestellt. Sein Schwerpunkt ist dabei die Untersuchung von Referenzen und ihr Zusammenhang zu Risiken im Produktentstehungsprozess. Die Arbeit leistet durch ihre ausgezeichnete wissenschaftliche Durchdringung und Aufbereitung der Problemstellung im Modell der PGE einen wichtigen Beitrag in der Forschung an den Entwicklungsprozessen und erbringt gleichzeitig sehr relevante Lösungsansätze für die Praxis.

April, 2021

Albert Albers

## Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung neuer Systeme und deren Beschreibung durch das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) als Variationen auf Basis eines Referenzsystems. In einer Potenzialanalyse verschiedener Ansätze wird die Auswahl des Modells der PGE als Grundlage für die vorliegende Arbeit begründet.

Anschließend wird im ersten Schritt eine Formalisierung als Beitrag zum Modell vorgeschlagen, mit der Variationen und Charakteristika von Elementen des Referenzsystems messbar und empirisch untersuchbar werden. Weiterhin werden Ziele, die Variationen und Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente zu Grunde liegen sowie die Auswirkungen von Variationen und Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente beschrieben. Dadurch werden Variationen sowie Referenzsystemelement-Charakteristika mit Innovationspotenzial und Entwicklungskosten, -aktivitäten und -risiken verknüpft. Grundlage für dieses formalisierte Modell sind Beobachtungen aus Fallbeispielen verschiedener Branchen.

Darauf aufbauend wird ein Rahmenwerk entwickelt, um gewählte Referenzsystemelemente und geplante Variationen zur Realisierung eines Innovationspotenzials in Form von Kunden-, Anbieter- und Anwendernutzen hinsichtlich möglicher Entwicklungsrisiken zu bewerten. Das Rahmenwerk wird in Form von drei Bausteinen in Fallstudien exemplarisch implementiert und evaluiert. Es wird zunächst ein Vorgehen zur Ableitung potenziell zielführender Variationen bei gegebenen Anforderungen und Referenzsystemelementen gezeigt. Anschließend wird ein Ansatz zur initialen Risikobewertung anhand von Variationsarten und Charakteristika von Referenzsystemelementen als Schlüsselfaktoren entwickelt. Im letzten Baustein werden Zusammenhänge zwischen Innovationspotenzial, Variationen, Charakteristika von Referenzsystemelementen und Entwicklungsrisiken übergreifend modelliert und zur Entscheidungsunterstützung durch bedarfsgerechte Informationsdarstellung in einer VR-Umgebung visualisiert.

Im letzten Teil der Arbeit wird anhand von fünf ausgewählten Fallbeispielen untersucht, wie Entwicklungsaktivitäten in Abhängigkeit von gewählten Variationsarten und Referenzsystemelementen methodisch unterstützt werden können.



## Abstract

Subject of the present work is the development of new systems and their description by the model of PGE – Product Generation Engineering according to ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) as variations on the basis of a reference system. In a potential analysis of different approaches the choice of the model of PGE as a basis for the present work is justified.

Subsequently, in a first step, a formalization as a contribution to the model is proposed, with which variations and characteristics of reference system elements become measurable and empirically examinable. Furthermore, the underlying goals of variations and characteristics of selected reference system elements are described as well as the effects of variations and characteristics of selected reference system elements. Thus, variations as well as reference system element characteristics are linked with innovation potential and development costs, activities and -risks. This formalized model is based on observations from case studies of various industries.

Based on this, a framework is developed to evaluate selected reference system elements and planned variations for the realization of an innovation potential in the form of customer, provider and user benefits with regard to possible development risks. The framework is implemented and evaluated in the form of three modules in case studies. First, a procedure for deriving potential variations for given requirements and reference system elements is shown. Subsequently, an approach for initial risk assessment is developed using variation types and characteristics of reference system elements as key factors. In the last module, the interrelationships between innovation potential, variations, characteristics of reference system elements and development risks are modelled comprehensively and visualized in a VR environment for decision support by means of information representation in line with requirements.

In the last part of the thesis, five selected case studies are used to investigate how development activities can be methodically supported depending on the selected variation types and reference system elements.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Für die Ermöglichung und Betreuung der Arbeit als Doktorvater möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers bedanken. Er hat am IPEK ein äußerst inspirierendes und konstruktives Umfeld geschaffen, geprägt durch Vertrauen, Zuversicht und Leistungsfähigkeit. Große Freiräume, Impulse und Leitplanken an den richtigen Stellen sowie die „Denkzeuge“, die den Kern der Karlsruher Schule für Produktentwicklung bilden, haben mir eine fachliche und persönliche Entwicklung ermöglicht, die ich außerordentlich schätze. Ich freue mich besonders, mit der vorliegenden Arbeit zum Modell der PGE als einem dieser zentralen Denkzeuge beitragen zu können.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats. Die Diskussionen mit ihm und seine Anmerkungen waren für die Fertigstellung der Arbeit sehr wertvoll.

Herrn Dr.-Ing. Nikola Bursac gilt ein großer Dank für den anregenden fachlichen und freundschaftlichen Austausch sowie die fachliche und persönliche Förderung während der gemeinsamen Zeit am Institut und darüber hinaus. Die vielen Hinweise und Diskussionen zu der vorliegenden Arbeit seien hier nur stellvertretend genannt, ebenso die spannenden Schach-Partien.

Herrn Dr.-Ing. Nicolas Reiß danke ich sehr für die Anmerkungen zu der vorliegenden Arbeit sowie zahlreiche fachliche und freundschaftliche Diskussionen, die immer wieder auch originelle Perspektiven auf ein Thema eröffnet haben.

Für zahlreiche Hinweise und Anmerkungen zu der vorliegenden Arbeit, die auch in vielen Details Verbesserungen ermöglicht haben, möchte ich Herrn Florian Marthaler, Herrn Christoph Kempf und Herrn Felix Pfaff herzlich danken.

Außerdem danke ich allen Studierenden, die insbesondere im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten zu der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Hier sind besonders Herr Moritz Altner, Herr Felix Pfaff und Herr Friedrich Wattenberg zu nennen.

Dem Team der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management und dem gesamten IPEK-Team gilt ein großer Dank für eine einzigartige Symbiose

aus fachlicher Leistungsfähigkeit und persönlichem Miteinander, das seinesgleichen sucht.

Herrn Dr.-Ing. Philipp Merkel möchte ich herzlich danken für sein Engagement als mein GfP-Mentor. Der so ermöglichte Austausch ist sowohl für die fachliche als auch die persönliche Entwicklung eine besondere Bereicherung.

Von Herzen danken möchte ich auch meiner Familie und Freunden aus Schul- und Studienzeiten für ihre ganz unterschiedlichen und eigenen Beiträge zu meiner persönlichen und fachlichen Entwicklung, die mir in diesem Sinne die vorliegende Arbeit ermöglicht haben.

Schließlich sei allen Weiteren gedankt, die mich in meinem bisherigen Werdegang geprägt haben und damit letztlich in ihrer Weise einen Teil zu der vorliegenden Arbeit beigesteuert haben.

Karlsruhe, den 23.04.2021

*Getrieben sind wir*

*Getrieben sind wir im Bestreben, dass die Welt so wie sie ist nicht bleibt;  
das Gute, das sie bereits birgt hingegen zu genießen, versagen wir uns fast die Zeit.*

*Unermülich sind wir, Neues zu bewegen und kreieren,  
dass wir die Muse für die Idee von Morgen manchmal fast verlieren.*

*Neugierig sind wir, Wissen zu erforschen, das noch keiner kennt  
und müssen uns erinnern vom Erreichten das Richtige zu bewahren als Fundament.*

*Rastlos sind wir auf einem Weg, der uns in sich selbst Erfüllung ist  
und müssen doch innere Ruhe finden, auch, wenn noch nicht jede Frage gelöst.*

*Auf steter Suche nach Balance bei allem was uns treibt,  
wägen wir, wie viel wir wofür geben und was am Ende bleibt.*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>xi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xxxix</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	3
1.2 Fokus der Arbeit .....	4
1.3 Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b> .....	<b>9</b>
2.1 Innovationen und Produktlebenszyklen .....	10
2.2 Modellierung von Produkten .....	16
2.2.1 Produkte als Systeme: Systemtheorie der Technik .....	16
2.2.2 Modellierung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs mit C&C <sup>2</sup> -A.....	20
2.2.3 Verknüpfung verschiedener Produktmodelle .....	22
2.3 Modellierung des Produktentstehungs-Prozesses und Agile Systems Design ...	23
2.3.1 Produktentstehung als Problemlösung mit SPALTEN .....	25
2.3.2 iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell .....	26
2.3.3 ASD – Agile Systems Design .....	28
2.4 Beschreibung der Beziehung von Referenzen und zu entwickelnden Systemen ..	29
2.4.1 C-K-Theorie .....	30
2.4.2 Design Reuse .....	32
2.4.3 Autogenetische Konstruktionstheorie und Technische Vererbung .....	37
2.4.4 Engineering Change (Technische Änderungen) .....	39
2.4.5 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung .....	43
2.4.6 Iterationen .....	47
2.4.7 Ansätze, die Beziehungen zu bestehenden Systemen implizit nutzen oder voraussetzen .....	49
2.5 Entwicklungsziele, Lösungsrichtungen und Risiken auf Basis von Referenzen ..	50
2.5.1 Beschreibung und Definition von Zielen in Relation zu Referenzen .....	51

2.5.2	Ableitung von Lösungsansätzen in der Entwicklung neuer Systeme in Relation zu Referenzen .....	60
2.5.3	Identifikation und Einschätzung von Risiken in der Entwicklung neuer Systeme in Relation zu Referenzen .....	64
2.6	Entwicklungsmethoden unter Berücksichtigung des Bezugs zu Referenzen .....	84
2.6.1	Situationsspezifische Methodenempfehlung mit dem InnoFox .....	85
2.6.2	Prozess- und Projektplanung auf Basis von Referenzen .....	86
2.6.3	Lösungsfindung auf Basis von Referenzen, insbesondere Kreativitätsmethoden .....	90
2.6.4	Produktmodellerstellung auf der Basis von Referenzen .....	93
2.6.5	Validierung auf der Basis von Referenzen .....	94
2.7	Wiederverwendung von Wissen über Referenzen ermöglichen .....	97
2.7.1	Bedeutung des Menschen für Wissenstransfer .....	98
2.7.2	Ansätze im Engineering Change Management .....	98
2.7.3	Referenzproduktmodelle im Modell der PGE .....	99
2.7.4	Lösungsmuster (Design Patterns, Solution Patterns) .....	100
2.7.5	DRed (Design Rationale Editor) .....	101
2.7.6	Beispiele weiterer Ansätze und zunehmend relevanter Themenfelder ... ..	104
2.8	Fazit und Auswahl eines Ansatzes für die weitere Arbeit .....	105
<b>3</b>	<b>Forschungsbedarf und Zielsetzung .....</b>	<b>113</b>
3.1	Forschungsbedarf .....	113
3.2	Zielsetzung .....	119
3.3	Forschungshypothesen und Grundannahme .....	119
3.4	Forschungsfragen .....	120
<b>4</b>	<b>Forschungsmethodik .....</b>	<b>123</b>
4.1	Einordnung der Arbeit .....	123
4.2	Forschungsstadien und Struktur der Arbeit .....	125
4.2.1	Forschungsstadien der Arbeit .....	125
4.2.2	Struktur der Arbeit .....	130
4.3	Überblick Forschungsmethoden und -umgebungen .....	131
<b>5</b>	<b>Formalisiertes Modell der PGE .....</b>	<b>135</b>
5.1	Gründe für Variationen und ihre Auswirkungen .....	137
5.1.1	Vorgehen .....	138
5.1.2	Fallbeispiel-Beobachtungen zu Gründen und Auswirkungen von Variationen .....	143
5.1.3	Zwischenfazit .....	160

5.2	Formalisiertes Modell der PGE .....	161
5.2.1	Vorgehen.....	163
5.2.2	Elemente und Struktur eines formalisierten Modells der PGE.....	163
5.2.3	Zwischenfazit .....	194
5.3	Evaluation des vorgeschlagenen Modells .....	199
5.3.1	Vorgehen.....	201
5.3.2	Evaluation zentraler Modellbestandteile .....	201
5.3.3	Zwischenfazit .....	227
<b>6</b>	<b>Rahmenwerk zur Bewertung von Variationen auf Basis von Referenzsystemelementen.....</b>	<b>229</b>
6.1	Variationen in bestehenden Methoden der Potenzial- und Risikoanalyse.....	231
6.1.1	Vorgehen.....	232
6.1.2	Analyse bestehender Methoden zur Bewertung von Variationen und Beobachtungen aus der Entwicklungspraxis .....	234
6.1.3	Diskussion und Zwischenfazit.....	237
6.2	Ableitung und initiale Bewertung potenziell zielführender Variationen .....	238
6.2.1	Vorgehen.....	240
6.2.2	Entwicklung des Ansatzes und Evaluation.....	240
6.2.3	Diskussion und Zwischenfazit.....	244
6.3	Risikobewertung anhand von Schlüsselfaktoren.....	246
6.3.1	Vorgehen.....	249
6.3.2	Entwicklung des Ansatzes und Evaluation.....	249
6.3.3	Diskussion und Zwischenfazit.....	265
6.4	Übergreifenden Potenzial- und Risiko-Darstellung .....	268
6.4.1	Vorgehen.....	271
6.4.2	Entwicklung des Ansatzes und Evaluation.....	271
6.4.3	Diskussion und Zwischenfazit.....	277
<b>7</b>	<b>Methodische Unterstützung von Variationen .....</b>	<b>279</b>
7.1	Fallbeispiel: Ableitung von Variationen zur Optimierung von Fliehkraftpendeln ..	281
7.1.1	Optimierung von Fliehkraftpendeln in Antriebsstranganwendungen	281
7.1.2	Erwartungen zu Entwicklungsaufwänden zur Optimierung von Fliehkraftpendeln in Antriebssträngen auf Basis von Variationsarten	283
7.1.3	Diskussion und Zwischenfazit.....	284
7.2	Fallbeispiel: Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten .....	285
7.2.1	Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten in der Frühen Phase der PGE.....	285

7.2.2	Ansätze zur Entwicklungsplanung auf Basis der Einordnung alternativer Lösungen als Variationen.....	287
7.2.3	Diskussion und Zwischenfazit .....	289
7.3	Fallbeispiel: Effiziente Gestaltung von Führungslenkern .....	290
7.3.1	Gestaltungsprozess von Führungslenkern bei einem Automobil-Zulieferer .....	290
7.3.2	Effiziente Gestaltung von Führungslenkern durch systematische Nutzung von Referenzsystemelementen.....	292
7.3.3	Diskussion und Zwischenfazit .....	296
7.4	Fallbeispiel: Reifegradabsicherung im Serienanlauf von Fahrzeugmotoren ....	297
7.4.1	Reifegradabsicherung im Serienanlauf eines OEM .....	297
7.4.2	Einflussfaktoren auf die Reifegradabsicherung und Potenziale zur Unterstützung durch Wissen aus der Entwicklung interner Referenzsystemelemente bei zwei Beispielteilsystemen .....	298
7.4.3	Diskussion und Zwischenfazit .....	302
7.5	Fallbeispiel: Prinzipskizzen in der Maschinenkonstruktionslehre-Projektarbeit....	303
7.5.1	Weiterentwicklung des Konzepts zur Maschinenkonstruktionslehre-Projektarbeit auf Grundlage des Modells der PGE .....	303
7.5.2	Erstellung von Prinzipskizzen auf Basis der Produktdokumentation von Referenzsystemelementen.....	306
7.5.3	Diskussion und Zwischenfazit .....	308
7.6	Nutzung von Modellzusammenhängen in weiteren Forschungsarbeiten .....	308
7.6.1	Vorgehen .....	309
7.6.2	Erhebung der Nutzung von Modellzusammenhängen .....	309
7.6.3	Diskussion und Zwischenfazit .....	311
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>313</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>333</b>
9.1	Theorie und Modell der PGE.....	334
9.2	Methoden & Prozesse: Produktentwicklung auf Basis des Modells der PGE...337	
9.3	Methoden & Prozesse: Validierungssystementwicklung auf Basis des Modells der PGE.....	341
9.4	Methoden & Prozesse: Produktionssystementwicklung auf Basis des Modells der PGE.....	343
9.5	Methoden & Prozesse: Strategieentwicklung auf Basis des Modells der PGE.....	344
9.6	PGE in der Ingenieursausbildung .....	346
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XLIII</b>

<b>Anhang A: Umfrage zur Wiederverwendung von Wissen.....</b>	<b>LXXIII</b>
<b>Anhang B: Fragebogen der Interviewstudie zu Variationen.....</b>	<b>LXXIX</b>
<b>Anhang C: Erhebung zur Modellnutzung.....</b>	<b>LXXX</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Rund 3000 Jahre Entwicklungsgeschichte, grundlegende Idee unverändert: Ein bronzezeitliches Rad aus dem Gebiet des Federsees und eine moderne Radaufhängung. Allerdings sind in der modernen Ausprägung zahlreiche weitere Funktionen, beispielsweise zur Dämpfung von Untergrundunebenheiten, und beträchtlich gesteigertes Leistungsvermögen in Form erreichbarer Geschwindigkeiten hinzugekommen ( <i>Daimler Global Media Site, 2020a; Federseemuseum, 2020b</i> ).....	1
Abbildung 1.2:	Formalisierte Konzepte zur Beschreibung eines Phänomens sind die Grundlage zur Entwicklung von Methoden für den Umgang mit dem Phänomen. Hier am Beispiel der klassischen Mechanik, von links nach rechts: Newtonsche Axiome, Grundgleichung der Mechanik als mathematische Formalisierung und Ergebnis einer Berechnung nach der Finite-Element-Methode (Berechnung der Verformung von Bindegewebe im Zusammenhang mit der Optimierung von Orthesen (Serf & Albers, 2019)). Bilder (Library of Congress, 2011; Serf & Albers, 2019).....	2
Abbildung 1.3:	ARC-Diagramm mit Thema der vorliegenden Arbeit, sowie Themen, zu denen beigetragen wird, Themen, auf die Bezug genommen wird und Themen, zu denen im weiteren Sinne Schnittstellen bestehen (ARC = „Areas of relevance and contribution“ (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 64–66)).....	5
Abbildung 1.4:	Kapitel der Arbeit. ....	6
Abbildung 2.1:	Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind Relationen zwischen bestehenden Systemen – im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) als Referenzen beschrieben – und einem System in der Entwicklung. Hier an einem Beispiel illustriert. Zur Klärung des Forschungsgegenstands werden die aufgeführten Themenbereiche in den genannten Abschnitten in diesem Kapitel behandelt.....	9
Abbildung 2.2:	Framework auf Basis von technischer und marktlicher Sicht auf Innovationen. Innovation im Schumpeter’schen Sinne als wirtschaftlich erfolgreiche unternehmerische Aktivität konstituiert	

	sich (nur) unter Berücksichtigung beider Sichten im Bereich oben rechts. Darstellung nach ISAKSSON ET AL. (2019, S. 1242). ....	11
Abbildung 2.3:	Produktprofil-Schema zur Darstellung von Produktprofilen nach ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018, S. 257) Neben Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen sind auch weitere Informationen zu Randbedingungen, der Marktsituation oder bestehenden Systemen, die als Referenz dienen, enthalten. ....	13
Abbildung 2.4:	Bestandteile einer Innovation nach ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018), Darstellung nach ALBERS, HEIMICKE, HIRSCHTER ET AL. (2018). ....	14
Abbildung 2.5:	Schematische Darstellung beobachtbarer Lebenszyklen von Produktgenerationen, Technologien und Branchen (Wesner, 1977), Darstellung nach ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 17).....	15
Abbildung 2.6:	Die drei Aspekte des Systembegriffs, Darstellung nach Ropohl (2009, S. 76). ....	17
Abbildung 2.7:	Beispiel einer Design Structure Matrix. Hier für die Teilsysteme eines automatisierten, unbemannten Kettenfahrzeugs, Darstellung nach Otto et al. (2016, S. 10).....	18
Abbildung 2.8:	Hierarchische Betrachtungsweise eines Systems mit Funktion, Physik und Gestalt (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 48). Eine generalisierte Modellbildung (unter anderem) für Anforderungen und die Verknüpfung mit der Gestalt eines Systems stellt auf Basis der technischen Systemtheorie das ZHO-Modell nach ALBERS dar (Albers & Braun, 2011), s. auch Abschnitt 2.3.2. ....	19
Abbildung 2.9:	Modellelemente und Grundhypothesen des C&C <sup>2</sup> -Ansatzes, Darstellung aus MATTHIESEN, GRAUBERGER, HÖLZ ET AL. (2018, S. 7). ....	21
Abbildung 2.10:	Framework für Produktmodelle unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungsbereiche und Abstraktionsgrade von Modellen (Albers, Matthiesen et al., 2015, S. 189), Darstellung (Bursac, 2016b, S. 116). ....	23
Abbildung 2.11:	Zur Modellierung des Produktentstehungsprozesses (oder Teilen davon) gibt es verschiedenste Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungs- und Formalisierungsgrad der Darstellung (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 29). ....	24
Abbildung 2.12:	Elemente der Problemlösungsmethodik SPALTEN nach Albers et al. (2002), Darstellung nach Albers et al. (2016). ....	25

Abbildung 2.13:	Iterative Entwicklung des Ziel- und Objektsystems durch das Handlungssystem in wechselnden Analyse- und Syntheseaktivitäten (erweitertes ZHO-Modell) (Albers et al., 2011, S. 2), übersetzte Darstellung nach LOHMEYER (2013, S. 122).....	26
Abbildung 2.14:	iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers & Meboldt, 2007; Albers, Reiß et al., 2016), Darstellung gemäß ALBERS UND REIß ET AL. (2016, 5). .....	27
Abbildung 2.15:	9 Prinzipien des ASD – Agile Systems Design nach ALBERS (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019a, S. 1018–1020, 2019b, S. 7–10), Darstellung auf Basis von ALBERS UND BURSAC (2019).....	29
Abbildung 2.16:	Co-Evolution von Concept-Space und Knowledge-Space, Darstellung nach AGOGUÉ UND KAZAKÇI (2014, S. 220), basierend auf HATCHUEL UND WEIL (2003, S. 10).....	31
Abbildung 2.17:	Design Reuse Model, nach DUFFY ET AL. (1995, S. 490), übersetzt.....	32
Abbildung 2.18:	Flexible Design Model (King & Sivaloganathan, 1998), Darstellung nach SIVALOGANATHAN UND SHAHIN (1999, S. 644).....	33
Abbildung 2.19:	Einteilung bestehenden Wissens in Wissensgebiete, auf die das Design Function Deployment als Design System zugreift (Sivaloganathan et al., 1995, S. 469).....	34
Abbildung 2.20:	Unterscheidung verschiedener Entwicklungssituationen bei der Einschätzung der Anwendbarkeit eines Ansatzes zur Unterstützung von Design Reuse, Darstellung nach BAXTER ET AL. (2007, S. 44).....	35
Abbildung 2.21:	Vier Facetten von Flexibilität und deren Wechselspiel als Grundlage für die Robustheit von Innovationsprojekten in der Frühen Phase: Iteratives Lernen, Design Reuse, Engineering Change Management und Modularität. Die Zeitpunkte „t-1“, „t“ und „t+1“ sind als Entwicklungsinkremente eines Systems zu verstehen, das „Design“ zum Zeitpunkt „t“ beispielsweise als eine andere Systemvariante. „Konzept“ und „Design“ sind dabei nicht trennscharf voneinander abgegrenzt. „Design“ meint jedoch stärker die konkrete Verkörperung des Systems, „Konzept“ den Entwurf. Darstellung nach ALBLAS UND JAYARAM (2015, S. 6832). .....	36
Abbildung 2.22:	Generelles Ablaufschema der autogenetischen Konstruktionstheorie (Vajna et al., 2005, S. 434 auf Basis von Wegner, 1999).....	37
Abbildung 2.23:	Informationsfluss bei der technischen Vererbung (Mozgova et al., 2015, S. 5). .....	38

Abbildung 2.24:	Übersicht über den Geltungsbereich verschiedener Definitionen von „Engineering Change“ (Hamraz et al., 2013, S. 475). Bezüge zu bestehenden Systemen oder Artefakten in der Planung – sofern vorhanden – werden gemäß der Einordnung von keiner Definition erfasst. ....	40
Abbildung 2.25:	Spannbreite an Neuentwicklungsanteilen in realen Entwicklungsprojekten und ungefähre Zuordnung zu Konstruktionsarten. Ein großer Anteil der Nennungen kann so nicht erfasst werden. (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015), Darstellung nach Vortrag zu ALBERS, BURSAC UND WINTERGERST (2015) und ALBERS, BURSAC UND RAPP (2016).....	44
Abbildung 2.26:	Beispielhafte Darstellung der zwei Grundhypothesen des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015), Darstellung basierend auf BURSAC (2016a).....	45
Abbildung 2.27:	Prozentualer Anteil an Teilsystemen, die durch eine bestimmte Variationsart mehreren Entwicklungsgenerationen einer Fahrzeugentwicklung entwickelt wurden in (Albers, Haug, Heitger, Fahl & Hirschter, 2019, S. 6).....	46
Abbildung 2.28:	Stereotype progressiver Iterationen (Wynn & Eckert, 2017, S. 167).	48
Abbildung 2.29:	Produktszenarien eines Leichtbaufahrzeugs (Fink & Siebe, 2016, S. 248). ....	52
Abbildung 2.30:	Produktmodell zur Strukturierung von Elementen des initialen Zielsystems (Albers, Heitger et al., 2018, S. 8). ....	54
Abbildung 2.31:	Vorgehensmodell zur Überführung von Zukunftsszenarien in Produktprofile (Hirschter et al., 2018, S. 9).....	55
Abbildung 2.32:	Im Eigenschaftsprofil wird das zu entwickelnde System gegenüber Referenzen (hier „Referenzprodukt $G_n - 1$ “) positioniert (Hirschter et al., 2018, S. 12). ....	56
Abbildung 2.33:	House of Quality als zentrales Element des QFD (Akao, 1992). Eine Relation zu bestehenden Systemen, namentlich des Wettbewerbs, wird sowohl aus Kundensicht (Bereich 2) als auch aus technischer Sicht (Bereich 7) hergestellt (Darstellung aus Saatweber (2016, S. 635), modifiziert).....	58
Abbildung 2.34:	Teilschritte der Vorgehenssystematik zur deduktiven Gestaltvariation nach WINTERGERST sowie Verortung verschiedener Ansätze der	

	qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse (Wintergerst, 2015, S. 147).....	61
Abbildung 2.35:	Beispiel für die Optimierung von Systemen durch Ableitung von Variationen auf Basis von Versuchsergebnissen: Für das funktionserfüllende reibschlüssige Wirkflächenpaar eines trockenlaufenden Kupplungssystems ist in der vertikalen die Temperaturverteilung entlang des Reibkontakts aufgetragen, in der horizontalen deren zeitliche Entwicklung. (Albers, Gladysz et al., 2016, S. 9).....	62
Abbildung 2.36:	Beispiel für Ansatz zur Abschätzung erforderlicher Veränderungsumfänge anhand von Funktion-Komponenten-Matrix am Beispiel eines automatisierten unbemannten Kettenfahrzeugs. GVI = generational variety index (Otto et al., 2016, S. 9 mit Bezug auf Simpson et al., 2012 und auf Basis von Martin & Ishii, 2002).....	64
Abbildung 2.37:	Beispiel: Bei Wißler verwendete Dimensionen zur Einschätzung von Risiken bei einzelnen Komponenten (Wißler, 2006, S. 88). Die ersten vier Dimensionen enthalten Bezüge zu bestehenden Systemen. Zur Beschreibung dieser Bezüge selbst wird allerdings kein Ansatz der Art aus Abschnitt 2.4 genutzt. ....	65
Abbildung 2.38:	Risikomanagementprozess nach (DIN ISO 31000:2018) (Oehmen, 2016, S. 61), modifiziert.....	68
Abbildung 2.39:	Kategorien für Entwicklungsprojekte auf Basis des Nutzen-Risiko-Verhältnis (Oehmen, 2016, S. 90), modifiziert.....	69
Abbildung 2.40:	Engineering Change Prozess (Hamraz et al., 2013, S. 476 auf Basis von Jarratt, Eckert & Clarkson, 2004). ....	71
Abbildung 2.41:	Mögliche Einteilung von Teilsystemen im Zuge der Analyse von Änderungsauswirkungen auf Basis dessen, inwieweit sie technische Änderungen „weitergeben“ oder „aufnehmen“ (Eckert et al., 2001, S. 152).....	73
Abbildung 2.42:	Unterschiedliche mögliche Entwicklungen der Änderungsfortpflanzung, ausgehend von einer initialen Änderung. Beispielhafte Darstellung auf Basis von Beobachtungen in einer Fallstudie (Eckert et al., 2001, S. 149), übersetzt.....	74
Abbildung 2.43:	Beispiel für DSM-basierten Ansatz zur Abschätzung der Fortpflanzung technischer Änderungen. Das Risiko der Fortpflanzung einer Änderung zwischen zwei Teilsystemen wird als Produkt von	

	Wahrscheinlichkeit der Fortpflanzung und Schwere der Auswirkung abgeschätzt (Clarkson, Simons & Eckert, 2001, S. 5).....	75
Abbildung 2.44:	Graph zur Darstellung der Auswirkungen von konstruktiven Änderungen (modelliert anhand von „Change features“) (Chen, Zhang, Wang & Xu, 2017, S. 136).....	76
Abbildung 2.45:	Struktur des Ansatzes von Albers, Walch und Bursac (2016), Walch (2017) zur Abschätzung des Realisierungsaufwands neuer Varianten von Nockenwellen auf Grundlage bestehender Objekte und Anforderungen an die neue Variante. Unten rechts werden die mit den unterschiedlichen Variationsarten zu entwickelnden Teilsystemmengen entsprechend der Nomenklatur des Modells der PGE aus Abschnitt 2.4.5 dargestellt (Albers, Walch & Bursac, 2016, S. 5).....	78
Abbildung 2.46:	Vorgehensmodell zur Priorisierung von Funktionsumfängen in der Risikobeurteilung (Gladysz, Waldeier, Jahn & Albers, 2018), Darstellung nach Gladysz (2019, S. 121). .....	79
Abbildung 2.47:	Auszug eines Formblatts für eine FMEA mit beispielhaften Eintragungen (DIN EN 60812:2015-08, S. 72). .....	80
Abbildung 2.48:	Ablauf mit Ermittlung von relevanten Produktcharakteristika (KPC) auf Basis einer QFD als Eingangsgröße für eine VMEA und Schritte einer VMEA (Johansson, Chakhunashvili, Barone & Bergman, 2006, S. 867). .....	80
Abbildung 2.49:	DRBFM-Prozess (Shimizu & Noguchi, 2005, S. 2023). .....	81
Abbildung 2.50:	Struktur eines DRBFM Worksheet (Shimizu & Noguchi, 2005, S. 2022). .....	82
Abbildung 2.51:	Situationserfassung (oben) und Ressourcenangabe (unten) im InnoFox als Basis für eine Methodenauswahl (Albers, Reiß et al., 2015, S. 8). .....	85
Abbildung 2.52:	Strategien zur Unterstützung des Änderungsmanagements, eingeschätzter Nutzen und tatsächliche Nutzung (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 38).....	87
Abbildung 2.53:	Ansatz zur Darstellung von Multi-Domain-Matrizen (MDM) zweier Produktfamiliengenerationen (PFG I, II) sowie Änderungs- und Delta-Matrizen als Unterstützung zur Planung von Produktfamilien generationen und Nachverfolgung von Änderungen (Küchenhof et al., 2020, S. 5).....	88

Abbildung 2.54:	Benutzeroberfläche des InnoBandit, bei der durch die Verwendung potenzieller Referenzprodukte zusammen mit Mega- und Mikrotrends neue Produktprofile und -ideen stimuliert werden (Heimicke et al., 2018, S. 5, Darstellung nach Vortrag zu Heimicke et al., 2018).....	90
Abbildung 2.55:	Beispiel (Auszug) aus einem Konstruktionskatalog (Roth, 2000, S. 207).....	92
Abbildung 2.56:	Notwendige Überarbeitungsumfänge in Sichten übergreifenden Produktmodellen in Abhängigkeit unterschiedlicher Variationsarten (Albers & Moeser, 2016, 6).....	94
Abbildung 2.57:	Ansatz zur Priorisierung von Validierungsumfängen. Ob Technologie und Anwendungsszenario bekannt sind oder nicht wird letztlich durch die zu Grunde liegenden Referenzprodukte bestimmt. (Albers, Klingler & Wagner, 2014, S. 85, übersetzte Darstellung Albers, Behrendt et al., 2016, S. 552). .....	95
Abbildung 2.58:	Referenzprodukt als Bestandteil physisch-virtueller Prototypen bei der Validierung von Lösungskonzepten in einer Augmented-Reality-Umgebung. Das Kochfeld wird physisch dargestellt, verschiedene Abzugsformen werden virtuell modelliert (Reinemann et al., 2018, S. 11).....	96
Abbildung 2.59:	In Unternehmen genutzte Wissensmanagement-Systeme (Albers, Bursac et al., 2014, S. 21). .....	97
Abbildung 2.60:	Auszugsweise Struktur eines beispielhaften Engineering Checksheet (Stenholm et al., 2019, S. 13).....	99
Abbildung 2.61:	Auszug aus einem Lösungsmuster aus dem Bereich der Mikrotechnologie (Albers & Deigendesch, 2010, S. 1543). .....	101
Abbildung 2.62:	Elemente zur Dokumentation von Entscheidungsfindungen und Zusammenhängen in DRed (Bracewell et al., 2004, S. 3).....	102
Abbildung 2.63:	Beispiel für die Dokumentation von Entscheidungsfindung und Zusammenhängen in der Entwicklung eines Systems mit DRed (Bracewell et al., 2004, S. 9). .....	103
Abbildung 2.64:	Evaluation der zwei Grundhypothesen des Modells der PGE durch eine Praxisbefragung (n = 58) (Albers, Haug et al., 2016, S. 232). ...	110
Abbildung 3.1:	Bereiche, in denen Forschungsbedarf besteht. Bedarf im Bereich I kann nur auf Grundlage eines passenden Beschreibungsmodells adressiert werden. Bedarfe in den Bereichen II und III ergeben sich	

	aus unzureichenden Lösungsansätzen im Bereich I. Darstellung mit Elementen aus Abbildung 2.26 und Abbildung 2.64 (zu Grunde liegende Referenzen s. dort).....	114
Abbildung 3.2:	Auszugsweises Ergebnis einer Umfrage (eigene Erhebung) unter Forschern im Bereich Design Research zu Faktoren, die Effizienz und Effektivität von Entwicklungsprozessen beeinträchtigen (übersetzt). .....	118
Abbildung 3.3:	Zentrale Forschungshypothese der Arbeit sowie untergeordnete Forschungshypothesen für die drei Teilbereiche der Arbeit auf Basis von Abbildung 3.1. ....	120
Abbildung 4.1:	Spiral of Applied Research nach Eckert et al. (2003, S. 4) mit Verortung der einzelnen Teile der vorliegenden Arbeit. ....	124
Abbildung 4.2:	Forschungsstadien nach der DRM einschließlich Zweck und Hauptergebnissen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15). Abkürzungen für die Stadien wurden ergänzt. ....	126
Abbildung 4.3:	Einordnung der Forschungsfragen (verkürzt) und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in die Stadien der DRM nach Blessing und Chakrabarti (2009). ....	127
Abbildung 4.4:	Mögliche Forschungstypen im DRM-Framework basierend auf den unterschiedlichen Forschungsstadien und ihren Ausprägungen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18). ....	130
Abbildung 4.5:	Struktur der Arbeit mit Verortung der Ergebnisse aus Abbildung 4.3 in den Kapiteln der vorliegenden Arbeit. ....	131
Abbildung 4.6:	Überblick zu den Forschungsmethoden in den verschiedenen Stadien der Arbeit. ....	132
Abbildung 4.7:	Phasen des Referenzprozesses im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017). ....	133
Abbildung 5.1:	Abschnittsweise Entwicklung und Evaluation eines Variablenmodells für die empirische Untersuchung der Ziele und Auswirkungen von Variationen im Modell der PGE nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Darstellung mit Bildelementen aus Abbildung 2.26. ....	136
Abbildung 5.2:	In diesem Abschnitt werden Variationen sowie die damit verfolgten Ziele als auch damit einhergehende Auswirkungen näher untersucht. ....	137

Abbildung 5.3:	Beispiel eines modernen Zweimassenschwungrads (Schnittdarstellung) und Darstellung des Einbauorts im Fahrzeug. Darstellung in Anlehnung an Vortragsfolien zu (Albers, Bursac & Rapp, 2017) mit Material von Schaeffler, 2020 und BMW nach auto-motor.at, 2020. .....	139
Abbildung 5.4:	Als Fallbeispiel im Hinblick auf Ziele und Auswirkungen von Variationen untersuchte Produktgenerationen des Zweimassenschwungrads (Albers, Bursac & Rapp, 2017). Darstellung als Viertelschnitt. Blau Primärseite (mit Motor verbunden), rot Sekundärseite (mit Wirflfläche zur Kupplungsscheibe, Kupplungssystem bei 5. gezeigter Produktgeneration auch dargestellt), gelb Federn, die die zwei Seiten verbinden.....	140
Abbildung 5.5:	Operationalisierung von Forschungsfragen durch die Überführung in Interviewfragen (Kaiser, 2014, S. 57 nach Wattenberg, 2018, S. 82). .....	141
Abbildung 5.6:	Beispiel einer Gestaltvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der vierten auf die fünfte untersuchte Produktgeneration. Der Durchmesser des ZMS-Lagers wurde so stark reduziert, dass die Tragzahl des Lagers auf etwa 20% des bisherigen Wertes reduziert wurde (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.....	147
Abbildung 5.7:	Beispiel einer Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der ersten auf die zweite untersuchte Produktgeneration. Es wurde von einer statisch bestimmten zu einer statisch unbestimmten Lagerung gewechselt, da bei der statisch bestimmten Lagerung im Betrieb auftretende Coriolis-Kräfte der Schwungradhälften zu Lebensdauerproblemen beim Lager geführt hatten (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.....	151
Abbildung 5.8:	Beispiel einer Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der fünften auf die sechste untersuchte Produktgeneration. Durch Verwendung eines Gleit- an Stelle eines Wälzlagers wurden Kosteneinsparungen erwartet (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.....	152
Abbildung 5.9:	In diesem Abschnitt wird ein Ansatz zur Formalisierung und Strukturierung der Beobachtungen aus Abschnitt 5.1 vorgeschlagen. .....	162
Abbildung 5.10:	C&C <sup>2</sup> -A-Modellierung für die Gestaltvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der vierten zur fünften Produktgeneration aus	

	Abbildung 5.6: LSS und WFP bleiben erhalten, ändern sich aber in ihrer Gestalt, hier insbesondere den Abmaßen. Die starke Reduktion des Lagerdurchmessers führt zu einer Reduktion der Tragzahl um ca. 80% (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.....	164
Abbildung 5.11:	C&C <sup>2</sup> -A-Modellierung der Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der ersten zur zweiten Produktgeneration aus Abbildung 5.7: Beim Übergang von der statisch bestimmten zur statisch unbestimmten Lagerung werden LSS und WFP entfernt (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert. ....	165
Abbildung 5.12:	Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der fünften zur sechsten Produktgeneration aus Abbildung 5.8: Hier fall die LSS und WFP des Wälzlagers weg, LSS und WFP des Gleitlagers kommen neu hinzu (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.....	165
Abbildung 5.13:	C&C <sup>2</sup> -A-basierte Indikatoren für die Variationsarten im Modell der PGE auf Basis der Fallbeispielbeobachtungen (Albers, Bursac & Rapp, 2017).....	166
Abbildung 5.14:	Erweiterung des Modells der PGE durch das Modellelement „Referenzsystem“ am Beispiel des Tesla Roadster (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, S. 11), modifiziert. ....	167
Abbildung 5.15:	Modellierung des Zusammenhangs zwischen gewählten Referenzsystemelementen und Innovationspotenzial sowie Risiken durch Verwendung von Referenzsystemelement-Charakteristika als eigenständige, messbare Faktoren. ....	170
Abbildung 5.16:	Dimensionen des Produktprofils (s. Abschnitt 2.1, Abbildung 2.3), anhand derer die beobachteten Ziele von Variationen in Abschnitt 5.1 geordnet werden. ....	171
Abbildung 5.17:	Verknüpfungen, die sich bei der Zuordnung von Gründen für Variationen zu Produktprofildimensionen gezeigt haben. Hier ohne die Gründe, die nicht spezifisch einer einzelnen Dimension zugeordnet werden konnten sowie Variationen als Gründe für Variationen. ....	176
Abbildung 5.18:	Variationen werden durch die Aktivitäten der Produktentstehung im iPeM realisiert. Die Aktivitäten der Produktentstehung werden daher genutzt, um die Auswirkungen von Variationen zu strukturieren. ...	177
Abbildung 5.19:	In tiefgezogenes Blech eingeformte Gewinde für Verschraubungen des Kupplungsdeckels an einem ZMS als Beispiel dafür, welche	

	konstruktiven Möglichkeiten durch das enge Wechselspiel von Variationen in der Produktentwicklung und Variationen in der Produktionssystementwicklung im Rahmen des Produkt-Produktions-Co-Designs entstehen können (A. Albers, persönl. Mitteilung, 07.12.2020). Darstellung des Einbauortes anhand der fünften unter suchten ZMS-Produktgeneration. .... 192	192
Abbildung 5.20:	Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemen über die Variationen in der jeweiligen Systementwicklung am Beispiel der Wechselwirkungen im Produkt-Produktions-Co-Design. Zwischen den Variationen in den verschiedenen Systementwicklungen sind beide Beziehungsrichtungen möglich.. 193	193
Abbildung 5.21:	Vernetzung von Variationen mit ihren Auswirkungen in Form Aktivitäten der Produktentstehung in verschiedenen Bereichen und weiteren Risiken, basierend auf Tabelle 25 bis Tabelle 29 und dem Schema aus Abbildung 5.23..... 194	194
Abbildung 5.22:	Vorgeschlagenes Modell zur Strukturierung von Gründen für und Auswirkungen von Variationen sowie die Wahl bestimmter Referenzsystemelemente. Die Modellstruktur bietet eine Grundlage für weitergehende empirische Untersuchungen. Die Variationsarten sowie die Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente nehmen im Modell die Rolle von Schlüsselfaktoren für den Zusammenhang zwischen Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken ein. Dargestellt sind nur in den Fallstudien beobachtete Verknüpfungen. Im Allgemeinen können in der Praxis weitere Zusammenhänge auftreten. .... 195	195
Abbildung 5.23:	Unterschiedliche Detailgrade bei der Systemanalyse und der dazu genutzten C&C <sup>2</sup> -A-Modellierung führen womöglich zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der retrospektiven Identifikation von Variationsarten. Im unteren (hypothetischen) Fall wird das gesamte Teilsystem Lagerung als eine Struktur modelliert und nicht detaillierter analysiert. Die vorgenommene Prinzipvariation kann so mit den vorgeschlagenen Indikatoren für Variationsarten nicht identifiziert werden. Abbildung nach Vortragsfolien zu Rapp und Barg et al. (2020), modifiziert. .... 197	197
Abbildung 5.24:	In diesem Abschnitt werden drei Elemente des vorgeschlagenen Modells evaluiert: Die C&C <sup>2</sup> -A-basierten Indikatoren für Variationsarten, Charakteristika von Referenzsystemelementen als	

	Einflussfaktoren und Risiken als Folge von Variationen oder gewählter Referenzsystemelemente. ....	200
Abbildung 5.25:	Untersuchtes Fallbeispiel: Produktgenerationen des Prüfkopfs am Trockenreibprüfstand des Instituts (Barg, 2019, S. 38).....	202
Abbildung 5.26:	Vorgehen zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf C&C <sup>2</sup> -A-basierte Indikatoren für Variationen im Beispiel TRP-Prüfkopf (Barg, 2019, S. 32).....	203
Abbildung 5.27:	Einordnung der drei untersuchten Konfigurationen beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf in den durch die Parameterstufen aufgespannten Raum. Detaillierte Darstellungen der einzelnen Konfigurationen in den folgenden Abschnitten.....	204
Abbildung 5.28:	C&C <sup>2</sup> -A-Modell für die Funktion „Drehmoment übertragen“ in der ersten Modellkonfiguration beim TRP-Prüfkopf und Einordnung der Variationsarten für die einzelnen Teilsysteme (Barg, 2019, S. 44)...	205
Abbildung 5.29:	Modellierungskonfigurationen 1 und 2 im Vergleich. Bei Konfiguration 2 verringerte Detailtiefe der C&C <sup>2</sup> -A-Modellierung. In den hervorgehobenen LSS in Konfiguration 2 wurden mehrere Elemente aus Konfiguration 1 zusammengefasst. (Barg, 2019, S. 48), modifiziert.....	208
Abbildung 5.30:	C&C <sup>2</sup> -A-Modellierung und identifizierte Variationsarten in der zweiten Modellierungskonfiguration beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf (Barg, 2019, S. 55).....	209
Abbildung 5.31:	Teilsystemstruktur von Modellierungskonfiguration 1 und 3 im Vergleich beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf. Die hervorgehobenen Teilsysteme sind eine feinere Aufteilung gegenüber Konfiguration 1. (Barg, 2019, S. 60), modifiziert.....	212
Abbildung 5.32:	C&C <sup>2</sup> -A-Modellierung und identifizierte Variationsarten in der dritten Modellierungskonfiguration beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf (Barg, 2019, S. 66), modifiziert.....	213
Abbildung 5.33:	C&C <sup>2</sup> -A-Modellierungen und identifizierte Variationsarten der einzelnen Teilsysteme für die drei untersuchten Modellierungskonfigurationen beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf im Überblick, basierend auf Abbildung 5.28, Abbildung 5.30 und Abbildung 5.32, mit Einzeldarstellungen aus (Barg, 2019).....	216

Abbildung 5.34:	Fallbeispiele, in denen die Charakteristika von Referenzsystemelementen als Einflussfaktoren hin untersucht wurden. ....	218
Abbildung 5.35:	Bei unternehmensexternen Referenzsystemelementen ist eine Folge, dass Zielsysteminformationen nicht explizit verfügbar sind (Albers, Haug et al., 2016). ....	219
Abbildung 5.36:	Auswirkungen der Charakteristika von Referenzsystemelementen und deren Wechselwirkungen im Fallbeispiel der Schaumstoffpartikelmaschine aus Albers, Rapp und Spadinger et al. (2019d). ....	220
Abbildung 5.37:	Als Einflussfaktoren beobachtete Charakteristika von Referenzsystemelementen im Fallbeispiel „Ventil“.....	221
Abbildung 5.38:	Der Einsatzmarkt eines Referenzsystemelements als beobachteter Einflussfaktor im Fallbeispiel „Schienenfahrzeug-Kupplung“. ....	221
Abbildung 5.39:	Insgesamt in den Fallbeispielen aus Abschnitt 5.1 und 5.3 als Einflussfaktoren beobachtete Charakteristika von Referenzsystemelementen, dargestellt nach der in Abschnitt 5.2 vorgeschlagenen Struktur.....	222
Abbildung 5.40:	Vorgehen bei der selektiven Suche (Altner, 2019, S. 28).....	223
Abbildung 5.41:	Vorgehen bei der systematischen Suche (Altner, 2019, S. 29). ....	224
Abbildung 6.1:	Struktur des Kapitels mit der Analyse bestehender Ansätze und drei Teilen eines Frameworks für die Bewertung von Variationen auf der Basis von Referenzsystemelementen. ....	230
Abbildung 6.2:	In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit die Zusammenhänge des Modells aus Kapitel 5 in bestehenden Ansätzen zur Bewertung von Variationen berücksichtigt sind. ....	231
Abbildung 6.3:	Stufenweise Clustering und Auswahl von Risikomanagementansätzen zur Identifikation der schlussendlich in der Untersuchung näher analysierten Ansätze (Altner, 2019, S. 33), modifiziert. ....	233
Abbildung 6.4:	Verortung der Methoden bzw. Methodengruppen entlang der Dimensionen Risikoart und Variationstyp (Altner, 2019, S. 89; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 6) modifiziert. ....	235
Abbildung 6.5:	Verortung der untersuchten Methoden entlang der Dimensionen Variationstyp und Referenzsystemelemente (Altner, 2019, S. 88; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 7), modifiziert. ....	236

Abbildung 6.6:	In diesem Abschnitt werden die Fragen II.2 und II.3 in Bezug auf die Ableitung und initiale Bewertung potenziell zielführender Variationen bei gegebenem Zielsystem beantwortet.....	239
Abbildung 6.7:	Verschiedene Umfänge der Modellübernahme und Modellüberarbeitung bei verschiedenen Variationen als Folge der Überarbeitung von Anforderungen in verschiedenem Umfang (Albers & Moeser, 2016, 6). .....	240
Abbildung 6.8:	Ansatz zur Ableitung alternativer Lösungen für eine neue Produktgeneration beim Vorliegen von Anforderungen und potenziellen Referenzprodukte. Darstellung in Anlehnung an EICHHORN (2017, S. 28), auf Basis von EICHHORN (2017, S. 36), RAPP ET AL. (2018, S. 5).....	241
Abbildung 6.9:	Ableitung eines alternativen Lösungskonzepts („PV1“), das potenziell die gewünschten Funktionen vollständig erfüllt, für eine neue Produktgeneration des Ventils in der Fallstudie. Im ersten Schritt entsteht das alternative Lösungskonzept „GV1“ durch eine Gestaltvariation auf Basis des Referenzprodukts „RP1“. Anschließend erfolgt auf Basis von „GV1“ und einem weiteren Referenzprodukt „RP2“ eine Prinzipvariation. Das Lösungskonzept „PV1“ weist einen Erfüllungsgrad von 100% auf gegenüber jeweils 57% bei RP1 und RP2 und 71% bei GV1 (Rapp et al., 2018, S. 6). .....	243
Abbildung 6.10:	Der in diesem Abschnitt entwickelte Ansatz zeigt, wie Variationsarten und Charakteristika von Referenzsystemelementen als Schlüsselfaktoren für eine Risikobewertung auf Basis des Modells der PGE genutzt werden können. ....	248
Abbildung 6.11:	Beispiel für einen urbanen Logistikassistenten (welt.de, 2016), ähnlich dem in der Fallstudie betrachteten System.....	249
Abbildung 6.12:	Ansatz zur Unterstützung der Bewertung von Variationen bereits in der Frühen Phase der PGE basierend darauf, dass sowohl technische Neuheit in Form von Gestalt- und Prinzipvariationsanteil als auch die organisatorische Herkunft von Referenzsystemelementen tendenziell zu Entwicklungsrisiko führen (s. Kapitel 5). Beispielhaft Teilsysteme der 1. ZMS-Generation sowie des zugehörigen Kupplungssystems verortet. Abbildung aus Vortrag zu und basierend auf ALBERS UND RAPP ET AL. (2017) (modifiziert).....	251
Abbildung 6.13:	In der Evaluation des Ansatzes im Live-Lab IP (s. Abschnitt 4.3) wurden der Testgruppe zur Bewertung von Variationen Erkenntnisse	

	aus den Fallbeispieluntersuchungen in Abschnitt 5.1 bereitgestellt. Darstellung auf Basis von Abbildung 5.22 und WATTENBERG (2018, S. 116).....	253
Abbildung 6.14:	Version des Portfolios aus Abbildung 6.12 wie es im IP-Workshop zum Ausfüllen durch die Probanden eingesetzt wurde. Der Farbverlauf wurde entfernt, um die Probanden vorab nicht zu beeinflussen und um Inkonsistenzen mit der Unterteilung der Waagrechten gemäß der drei Variationsarten zu vermeiden. Referenzprodukte sind die Quellen für Referenzsystemelemente (Wattenberg, 2018, S. 115).	254
Abbildung 6.15:	Ausgefüllte Portfolios für die alternativen Lösungen V1 – V5 bei der initialen Konzeptauswahl in der Fallstudie. Der Fokus liegt auf der Verortung der einzelnen Teilsysteme im Portfolio des entwickelten Ansatzes. V1 wurde schlussendlich ausgewählt. „Referenzprodukte“ in der vertikalen Dimension sind die Ursprungssysteme von Referenzsystemelementen (Winter, 2018, S. 49–52).....	256
Abbildung 6.16:	Erste Systemstruktur zu Beginn der Ausarbeitung des Lasthandlings für das gewählte Konzept in der Fallstudie (Winter, 2018, S. 57)....	258
Abbildung 6.17:	Erste Risikobewertung in der Fallstudie auf Basis der Struktur aus Abbildung 6.16 und den Werten aus Tabelle 39. Aus den Werten für die Teilsysteme wurde auch ein Datenpunkt für das Gesamtsystem berechnet (X). Anteile der Teilsysteme am Gesamtsystem auf Basis von Experteneinschätzung (Winter, 2018, S. 61).....	259
Abbildung 6.18:	Risikobewertung, bei der das Teilsystem „Ladungsträger“ konkretisiert ist. Dadurch ergibt sich eine detailliertere Analysegrundlage für die Bewertung (Winter, 2018, S. 79). .....	260
Abbildung 6.19:	Systemstruktur zum Ende der Entwicklung in der Fallstudie (Winter, 2018, S. 83).....	261
Abbildung 6.20:	Risikobewertung auf Basis der Systemstruktur aus Abbildung 6.19 (Winter, 2018, S. 93).....	262
Abbildung 6.21:	Wichtige Zeitpunkte in der untersuchten Fallstudie. Nicht alle Bewertungszeitpunkte sind dargestellt. Zu erkennen ist insbesondere der über den Projektverlauf zunehmende Detailgrad der Systemmodellierung und damit einhergehend der Struktur der Risikobewertung (Winter, 2018, S. 61).....	263
Abbildung 6.22:	Zeitlicher Verlauf der Gesamtrisiko-Bewertung in der Fallstudie. Die Risikobewertung ändert sich bei zunehmendem Konkretisierungsgrad	

	nur wenig. Hier spielt womöglich die Überlagerung zweier Effekte eine Rolle: Die Teilsysteme, die durch Gestalt- und Prinzipvariation entwickelt werden, werden zwar zunehmend feingranularer abegrenzt und damit „kleiner“, gleichzeitig nimmt ihre Anzahl zu. (Winter, 2018, S. 98).....	264
Abbildung 6.23:	Teilsysteme, die in einer Produktgeneration, womöglich mit erhöhtem Risiko, entwickelt wurden, stehen in einer darauffolgenden Produktgeneration als Referenzsystemelement zur Verfügung. Hier im Beispiel zu sehen an der Sekundärseite in der zweiten Produktgeneration, die Teil des zweigeteilten Schwungrads aus der ersten Produktgeneration ist (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7), modifiziert.....	266
Abbildung 6.24:	Mögliche Erweiterung des vorgestellten Ansatzes, um mehrere Systemebenen darzustellen (Albers, Rapp, Heitger et al., 2018, S. 472).....	268
Abbildung 6.25:	Der in diesem Abschnitt entwickelte Ansatz erlaubt durch die Integration von weiteren Referenzsystemcharakteristika als Einflussfaktoren und Innovationspotenzial als Zielgröße eine übergreifende Chancen- und Risiko-Darstellung und Einschätzung.	270
Abbildung 6.26:	Beispiel für die Visualisierung der Zusammenhänge aus Tabelle 40 im Rahmen des Workshops mit HECTOR-Studierenden anhand des Referenzsystemelement-Charakteristikums organisatorische Herkunft (Pfaff, 2020, S. 110).....	273
Abbildung 6.27:	Die Chancen-Risiken-Bewertung für Lösungskonzepte der HECTOR-Studierenden wurde im Workshop zweistufig durchgeführt. Die beispielhaft in Abbildung 6.26 gezeigten Visualisierungen wurden dabei nach dem ersten und vor dem zweiten Bewertungsdurchgang ausgehändigt (Pfaff, 2020, S. 111).....	274
Abbildung 6.28:	Datenmodell, das die Zusammenhänge zwischen Variationen von Teilsystemen (TS), Charakteristika von Referenzsystemelementen (RSE) mit den „Kriterien“ Innovationspotenzial, Kosten und Risiken darstellt als Grundlage für eine VR-Implementierung. ( <i>Gn</i> : Produktgeneration in der Entwicklung, <i>Rn</i> : Zugehöriges Referenzsystem) (Pfaff, 2020, S. 118), modifiziert.....	275
Abbildung 6.29:	VR-basierte Visualisierung eines Teilsystems (1) einer neuen Roller-Produktgeneration und dem zugehörigen Referenzsystemelement (2) (Gesamtsystemansicht hier oben links ebenfalls zu sehen, im Tool	

	separate Ansicht). Die Bewertungsspinne (3) zeigt die Einordnung entlang verschiedener Zielkriterien auf Basis der geplanten Variationsart und Charakteristika des gewählten Referenzsystemelements. Hintergrundinformationen zu dein Einzelbewertungen, beispielsweise Begründungen oder auch Hinweise zu erwarteten Entwicklungsaktivitäten, werden bei Bedarf durch Auswahl der Bewertungspunkte gesondert eingeblendet (4) (Pfaff, 2020, S. 124), modifiziert. .... 276
Abbildung 7.1:	In diesem Kapitel wird die variationspezifische methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten an fünf Fallbeispielen untersucht. Die Untersuchungen in jedem Fallbeispiel werden durch die Forschungsfragen III.1-III.3 geleitet. .... 280
Abbildung 7.2:	1. Produktgeneration des Fliehkraftpendels der Fa. Schaeffler (Schottmüller et al., 2019, S. 4), modifiziert. .... 282
Abbildung 7.3:	Zusammenhang zwischen Normgröße zur Charakterisierung eines Antriebsstrangs auf Basis von Informationen, die bereits früh vorliegen, und erwarteter Beanspruchung, hier Umlauf-Biegebeanspruchung. Mit Hilfe dieses Zusammenhangs können früh Lasten für neue Antriebsstrang-Produktgenerationen abgeschätzt werden. (Fischer & Albers, 2018, S. 7)..... 286
Abbildung 7.4:	Zusammenhang zwischen Normgröße und Belastung, hinterlegt mit Einsatzbereichen dreier bereits vorhandener Antriebsstrang-Komponenten (A, B, C). In Orange eingetragen drei unterschiedliche mögliche Ergebnisse der Lastabschätzung für eine neue Produktgeneration und Einordnung der sich daraus ergebenden Lösungsrichtungen als Variationen. (Fischer et al., 2019, S. 9), übersetzt. .... 287
Abbildung 7.5:	Beispiel einer modernen Fahrzeugachse mit Einbauort eines Führungslenkers (teilweise verdeckt) vergleichbar zur betrachteten Fallstudie (Darstellung Audi AG, 2020, modifiziert)..... 291
Abbildung 7.6:	Ausgangssituation beim Vorgehen zur Gestaltung von Führungslenkern in der Fallstudie (Rouby, 2020, S. 2), übersetzt. ... 292
Abbildung 7.7:	Ansätze zur Effizienzsteigerung bei der Gestaltung von Führungslenkern (Rouby, 2020, S. 33), modifiziert..... 293
Abbildung 7.8:	Informationen zu vorhandenen Bauteilen, die in der Portfolio-Analyse erfasst wurden als Grundlage, um künftig potenzielle Referenzsystemelemente systematisch identifizieren zu können.

	Werte auf Grund von Vertraulichkeit gegenüber Originalwerken skaliert. (Rouby, 2020, S. 46), übersetzt. ....	294
Abbildung 7.9:	Verortung der initial für die Portfolio-Analyse untersuchten Bauteile im Raum, der durch die typischen Anforderungsdimensionen für Führungslenker aufgespannt wird. Wird eine neue Kundenanfrage in diesem Raum eingeordnet, kommen in der Nähe befindliche Bauteile als potenzielle Referenzsystemelemente in Frage. Werte auf Grund von Vertraulichkeit gegenüber Originalwerken skaliert. (Rouby, 2020, S. 47) .....	295
Abbildung 7.10:	Relevante Quality Gates für die Reifegradabsicherung im Serienanlauf eines OEM (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 7), Übersetzung (Weber, 2020, S. 91) .....	298
Abbildung 7.11:	In Interviews mit Beteiligten und auf Basis von Berichtsanalysen ermittelte Gründe für im Sinne der Reifegradabsicherung kritische Bauteile (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 6), Übersetzung (Weber, 2020, S. 88) .....	299
Abbildung 7.12:	Identifizierte Gründe für späte oder regelmäßige Variationen im Serienanlauf, die dazu führen, dass Bauteile im Hinblick auf die Reifegradabsicherung im Serienanlauf kritisch werden. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 7), Übersetzung (Weber, 2020, S. 91) .....	300
Abbildung 7.13:	Mit Hilfe der Methodik von Albers et al. (2020) auf Basis des ASD-Ansatzes abgeleitete Erfolgsfaktoren, um späte oder regelmäßige Variationen, die Bauteile hinsichtlich der Reifegradsteuerung im Serienanlauf kritisch werden lassen, zu vermeiden oder den Umgang mit ihnen zu verbessern. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 8), Übersetzung (Weber, 2020, S. 102–104) .....	301
Abbildung 7.14:	Bisheriger Prozess der Projektarbeit im Workshop zur Maschinenkonstruktionslehre IV mit Aufgabenblatt als Ausgangspunkt und Produktdokumentation als Ergebnis (Rapp, 2019, S. 3), vgl. auch Vortrag zu (Albers, Matthiesen et al., 2018) .....	304
Abbildung 7.15:	Konzept, um in der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre IV Entwicklungsaktivitäten auf Basis von Referenzsystemelementen einschließlich deren Produktdokumentation zu ermöglichen, indem einem neuen Jahrgang die Ergebnisse des Vorgängerjahrgangs als Ausgangspunkt zur Verfügung gestellt werden (Rapp, 2019, S. 8, vgl. auch Vortrag zu Albers, Matthiesen et al., 2018).....	305

Abbildung 7.16:	Beispiele für Prinzipskizzen aus der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre IV. Links schematisch Wellen, Lager, Zahnräder und Gehäuse eines Differentialgetriebes, rechts eine Lösung zur formschlüssigen, lösbaren Verbindung von Wellen (Rapp, 2019, S. 14, vgl. auch Vortrag zu Albers, Matthiesen et al., 2018). . . . .	306
Abbildung 7.17:	Vorgehen von Studierenden zur Erstellung von Prinzipskizzen auf der Basis von Referenzsystemelementen und der zugehörigen Produktdokumentation in der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre. Links Gesamtansicht, rechts Ausschnitt. Bereits in den Prinzipskizzen können unterschiedliche Variationen identifiziert werden (Rapp, 2019, S. 15, vgl. auch Vortrag zu Albers, Matthiesen et al., 2018).....	307
Abbildung 8.1:	Ergebnis der Potenzialanalyse verschiedener Beschreibungsansätze. Zusammengefasste Darstellung auf Basis von Tabelle 5 und Tabelle 6 in Abschnitt 2.8.....	313
Abbildung 8.2:	Forschungsbedarfe, die in der vorliegenden Arbeit adressiert werden. ....	314
Abbildung 8.3:	Ergebnisse von 13 untersuchten Fallbeispielen aus unterschiedlichen Branchen zu Gründen und Auswirkungen von Variationen werden in einem Modell strukturiert. Für Modellbestandteile werden messbare Indikatoren vorgeschlagen. Dadurch entsteht ein formalisiertes Modell der PGE.....	316
Abbildung 8.4:	Evaluierte Aspekte des vorgeschlagenen formalisierten Modells der PGE (Teil 1, Fortsetzung in Abbildung 8.5).....	318
Abbildung 8.5:	Evaluierte Aspekte des vorgeschlagenen formalisierten Modells der PGE (Fortsetzung von Abbildung 8.4) .....	319
Abbildung 8.6:	Die erste Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die Ergebnisse in Kapitel 5 bestätigt. ....	321
Abbildung 8.7:	In Methoden-Benchmarks wird gezeigt, inwieweit die im formalisierten Modell der PGE beschriebenen Zusammenhänge in bestehenden Methoden zur Chancen-Risiken-Analyse berücksichtigt sind .....	322
Abbildung 8.8:	Zur Adressierung der zuvor erkannten Bedarfe bei bisherigen Methoden zur Chancen-Risiken-Analyse in der Produktentwicklung wird entlang dreier beispielhafter Bausteine ein Framework zur	

	Ableitung und Bewertung von Variationen entwickelt und evaluiert (Teil 1, Fortsetzung in Abbildung 8.9) .....323
Abbildung 8.9:	Zur Adressierung der zuvor erkannten Bedarfe bei bisherigen Methoden zur Chancen-Risiken-Analyse in der Produktentwicklung wird entlang dreier beispielhafter Bausteine ein Framework zur Ableitung und Bewertung von Variationen entwickelt und evaluiert (Fortsetzung von Abbildung 8.8) .....324
Abbildung 8.10:	Die zweite Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die Ergebnisse in Kapitel 6 bestätigt. ....327
Abbildung 8.11:	Anhand von fünf ausgewählten Beispielen wird in Kapitel 7 gezeigt, wie Entwicklungsaktivitäten variationsspezifisch unterstützt werden können. ....327
Abbildung 8.12:	Die dritte Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die Ergebnisse in Kapitel 7 bestätigt. ....330
Abbildung 8.13:	Die zentrale Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die gewonnenen Erkenntnisse bestätigt. ....330
Abbildung 9.1:	Struktur des Forschungsfelds PGE am IPEK, ausgehend von dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Modell und den weiteren Ergebnissen, sowie Verortung laufender Arbeiten in den verschiedenen Teilbereichen. Auf die Teilbereiche wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen. ....333
Abbildung 9.2:	Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten zur Theorie und dem Modell der PGE. ....334
Abbildung 9.3:	Indikatoren für Variationen können sowohl in verschiedenen weiteren Sichten auf ein System als auch für unterschiedliche Arten von Systemen gefunden werden (Darstellung nach ALBERS, RAPP ET AL., 2020, S. 2242). ....335
Abbildung 9.4:	Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten zur Entwicklung von Methoden und Prozessen der Produktentwicklung. ....338
Abbildung 9.5:	Laufende Vorhaben zur Erforschung von Methoden und Prozessen der Validierungssystementwicklung auf Basis des Modells der PGE (ausschnittsweise Darstellung aus Abbildung 9.1) .....342
Abbildung 9.6:	Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit Arbeiten zur Wechselwirkung von Produkt und Produktionssystem.....343

Abbildung 9.7:	Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten, die mit der Strategieentwicklung in Verbindung stehen. ....	344
Abbildung 9.8:	Beispielhafte Darstellung der Entwicklung von Produktfunktionen über mehrere Produktgenerationen und Produktlinien hinweg. Darstellung (IPEK, 2020b) auf Basis von Albers und Fahl et al. (2020). ....	345
Abbildung 9.9:	Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE zur Ingenieurausbildung, unter anderem mit den Live-Labs HECTOR School und MSuP (Mechatronische Systeme und Produkte). ....	346
Abbildung 9.10:	Im Rahmen von MSuP entwickeltes System. Die blauen und roten Klötze müssen aufgesammelt und vom entwickelten System zu Türmen aufgestapelt werden. Bildschirmfoto von Video der MSuP Abschlussveranstaltung (KIT - Karlsruher Institut für Technologie, 2020). ....	347



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definition von Elementen der natürlichen Evolution für das Konzept der technischen Vererbung im Zuge der Analogiebildung (Mozgova et al., 2015, S. 5–6), übersetzt. ....	39
Tabelle 2:	Moden von Design Änderungen nach McMahon (1994), Darstellung Hamraz et al. (2013, S. 475).....	42
Tabelle 3:	3 Hauptziele von Standardänderungen und kritischen Änderungen nach Langer und Maier et al. (2012, S. 226), übersetzt. ....	53
Tabelle 4:	Beispiele für Methoden zur Risikoidentifikation (Oehmen, 2016, S. 71).....	70
Tabelle 5:	Einordnung der Beschreibungsansätze aus Abschnitt 2.4 entlang der abgeleiteten Dimensionen (1/2), in Teilen in Anlehnung an (Pfaff, 2020, S. 35–62).....	108
Tabelle 6:	Einordnung der Beschreibungsansätze aus Abschnitt 2.4 entlang der abgeleiteten Dimensionen (2/2), in Teilen in Anlehnung an (Pfaff, 2020, S. 35–62).....	109
Tabelle 7:	Übersicht über die untersuchten Fallbeispiele, die zugehörige Branche, die Art der verwendeten Datenerfassung sowie Referenz zu den Einzeldarstellungen (für die Interviews basierend auf Wattenberg, 2018, S. 87).....	142
Tabelle 8:	Gründe für Übernahmevariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	144
Tabelle 9:	Auswirkungen von Übernahmevariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	145
Tabelle 10:	Begünstigende Faktoren für Übernahmevariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	146
Tabelle 11:	Gründe für Gestaltvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	147
Tabelle 12:	Auswirkungen von Gestaltvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	149
Tabelle 13:	Begünstigende Faktoren für Gestaltvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	151
Tabelle 14:	Gründe für Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.....	152

Tabelle 15:	Auswirkungen von Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	154
Tabelle 16:	Begünstigende Faktoren für Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	157
Tabelle 17:	Hemmende Faktoren für Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	157
Tabelle 18:	Grund für gewählte Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	158
Tabelle 19:	Auswirkungen gewählter Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	158
Tabelle 20:	Begünstigende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	159
Tabelle 21:	Hemmende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen. ....	159
Tabelle 22:	Relation zwischen Gründen für die Wahl bestimmter Referenzsystemelemente und dabei als Einflussfaktor in Erscheinung tretendes Charakteristikum des Referenzsystemelements. ....	168
Tabelle 23:	Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente und beobachtete Auswirkungen in den Fallbeispielen. ....	169
Tabelle 24:	Verortung von Gründen für Variationen entlang von Produktprofil-Dimensionen. Die Zuordnung für die Beobachtungen in den mittels Interview untersuchten Fallbeispielen stützt sich auch auf (Wattenberg, 2018, S. 102). ....	172
Tabelle 25:	Aktivitäten der Produktentstehung in der Entwicklung von $G_n$ , die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018), modifiziert. ....	178
Tabelle 26:	Aktivitäten der Produktentstehung in der Produktionssystementwicklung, die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018), modifiziert. ....	184
Tabelle 27:	Aktivitäten der Produktentstehung in der Validierungssystementwicklung, die mit den beobachteten	

	Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018), modifiziert.....	187
Tabelle 28:	Aktivitäten der Produktentstehung in der Strategieentwicklung, die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018), modifiziert. ....	188
Tabelle 29:	Auswirkungen von Variationen, die nicht unmittelbar mit Aktivitäten der Produktentstehung assoziiert wurden. ....	190
Tabelle 30:	Anzahl der C&C <sup>2</sup> -A-Kernelemente je Teilsystem als Gewichtung bei der Berechnung von Variationsanteilen und identifizierte Variationsart je Teilsystem für Modellkonfiguration 1. Es wurde keine Übernahmevariation identifiziert. Dies kann sowohl daran liegen, dass der Prüfkopf am Prüfstand bei der Entwicklung einer neuen Prüfstandsgeneration tendenziell am stärksten von Entwicklungsaktivitäten betroffen ist, als auch daran, dass schon einzelne gestaltvariierte Elemente in Teilsystemen den Ausschlag zur Eeinordnung geben, selbst, wenn noch übernommene Bestandteile vorhanden sind. (Barg, 2019, S. 45).....	206
Tabelle 31:	Gegenüberstellung identifizierter Variationsarten bei unterschiedlicher C&C <sup>2</sup> -A-Modellierungstiefe und Anzahl an C&C <sup>2</sup> -A-Modellelementen je Teilsystem, die als Gewichtung bei der Variationsanteilsberechnung dienen (Barg, 2019, S. 56).....	210
Tabelle 32:	Gegenüberstellung der berechneten Variationsanteile bei unterschiedlicher C&C <sup>2</sup> -A-Modellierungstiefe (Barg, 2019, S. 57)...	211
Tabelle 33:	Gegenüberstellung identifizierter Variationsarten bei unterschiedlicher Teilsystemstruktur und die Anzahl an C&C <sup>2</sup> -A-Modellelementen je Teilsystem, die als Gewichtung bei der Variationsanteilsberechnung dienen (Barg, 2019, S. 68), modifiziert. ....	214
Tabelle 34:	Gegenüberstellung der berechneten Variationsanteile bei unterschiedlicher Teilsystemstruktur (Barg, 2019, S. 69), modifiziert. ....	215
Tabelle 35:	Auf der Grundlage von Beobachtungen in Fallbeispielen können die unten aufgeführten Risikodimensionen aus der Literatur	

	Variationsarten zugeordnet werden. Tabelle auf Basis von (Altner, 2019, S. 53). .....	224
Tabelle 36:	Untersuchte Methoden und Methodengruppen (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 5) (modifiziert).....	234
Tabelle 37:	Anzahl an Risiken und möglichen Kosten, die durch die Teilnehmer in der Evaluationsstudie im IP-Workshop jeweils pro Team insgesamt identifiziert wurden (Wattenberg, 2018, S. 117). .....	255
Tabelle 38:	Ergebnis einer Nutzwertanalyse zur finalen Auswahl aus den Konzeptalternativen, die in Abbildung 6.15 im Portfolio verortet sind (Winter, 2018, S. 56). .....	257
Tabelle 39:	Zuordnung von Zahlenwerten zu den Dimensionen des Portfolios. Zu beachten ist, dass die Abstufung nur Tendenzen widerspiegelt (Winter, 2018, S. 62). .....	258
Tabelle 40:	Charakteristika von Referenzsystemelementen, Variationsarten und tendenzieller Zusammenhang mit Innovationspotenzial, Kosten und Risiko (Pfaff, 2020, S. 106). .....	272
Tabelle 41:	Erwartungen zu Entwicklungsaufwänden bei der Entwicklung einer neuen FKP-Produktgeneration je nach Variationsart (Schottmüller et al., 2019, S. 9).....	283
Tabelle 42:	Mögliche Lösungsrichtungen für die Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten, ausgehend von den Ergebnissen der Lastabschätzung und Gegenüberstellung mit Einsatzbereichen verfügbarer Referenzsystemelemente, sowie Einordnung der Lösungsrichtungen und Implikationen für weitere Entwicklungsaktivitäten (Fischer et al., 2019, S. 8–9). .....	288
Tabelle 43:	Von den Befragten genannten Anwendungen von Modellzusammenhängen in Forschungsthemen. Darstellung zusammengefasst, die vollständigen Antworten sind in Anhang C aufgeführt. ....	309

# 1 Einleitung

Unsere Welt ist geprägt durch technischen Fortschritt in Form kontinuierlicher nutzenstiftender Neuerungen, die sich in einem marktwirtschaftlichen Wettbewerb mit seinen Randbedingungen erfolgreich durchsetzen. Erfolg unter den Randbedingungen eines marktwirtschaftlichen Wettbewerbs bedeutet dabei nicht nur, hinreichend neuen Nutzen zu stiften. Die nutzenstiftende Neuerung muss auch mit einem Aufwand realisiert werden, der sowohl im Verhältnis zum Nutzen als auch im Verhältnis zum Aufwand von Wettbewerbern hinreichend ist (s. Abschnitt 2.1). Ein Kernelement ist hierbei, einerseits das Richtige neu zu machen, andererseits auch von Bestehendem Bewährtes zu übernehmen und weiter zu nutzen. Ein einfaches Beispiel zur Veranschaulichung ist das System „Rad“ in Abbildung 1.1, das über Jahrtausende fortentwickelt wurde. Obwohl die Leistungsfähigkeit der beiden „Räder“ völlig unterschiedlich ist, hat sich das Prinzip „Rollen“ nicht geändert. Selbstverständlich sind über die Entwicklungsgeschichte hinweg neue Funktionen wie beispielsweise die Dämpfung von Untergrundunebenheiten hinzugekommen und die erreichbaren Geschwindigkeiten wurde erheblich gesteigert.

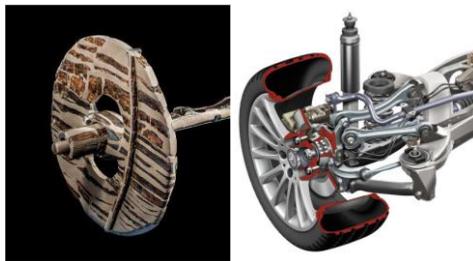


Abbildung 1.1: Rund 3000 Jahre Entwicklungsgeschichte, grundlegende Idee unverändert: Ein bronzezeitliches Rad aus dem Gebiet des Federsees und eine moderne Radaufhängung. Allerdings sind in der modernen Ausprägung zahlreiche weitere Funktionen, beispielsweise zur Dämpfung von Untergrundunebenheiten, und beträchtlich gesteigertes Leistungsvermögen in Form erreichbarer Geschwindigkeiten hinzugekommen (*Daimler Global Media Site, 2020a; Federseemuseum, 2020b*).

Stets auf Bestehendes aufzubauen und dieses, wo passend, weiter zu verwenden und gleichzeitig Neues hinzuzufügen ermöglicht die Entwicklung komplexer Systeme wie beispielsweise Fahrzeuge oder Fertigungsstraßen, wie wir sie heute kennen. Sowohl die Handhabung dieser Komplexität in der Entwicklung als auch Erfolg einer Entwicklung unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten erfordert eine systematische Vorgehensweise mit Hilfe von Methoden und Prozessen (s. Abschnitt 2.6). Die Bereitstellung solcher Methoden und Prozesse für die Entwicklung neuer Systeme ist das Ziel entwicklungsmethodischer Forschung.

Dies erfordert Konzepte, die das betrachtete Phänomen greifbar machen. So beruhen in der Mechanik beispielsweise Finite-Element-Methoden in der Festigkeitslehre letztlich auch auf den Newtonschen Axiomen (s. Abbildung 1.2) und Syntheseverfahren in der Chemie auf Konzepten zur Beschreibung atomarer Bindungen. Bindeglied zwischen solchen zu Grunde liegenden Konzepten und den darauf basierend entwickelten Methoden ist eine hinreichende Formalisierung der Konzepte, in den genannten Beispielen die Quantifizierung der beobachtbaren Auswirkungen von Kräften bzw. die Relation atomarer Bindungen mit Energien.

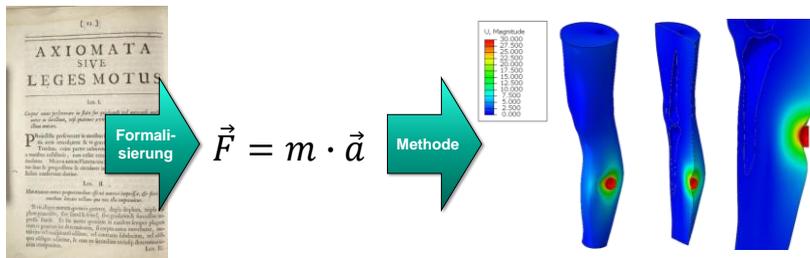


Abbildung 1.2: Formalisierte Konzepte zur Beschreibung eines Phänomens sind die Grundlage zur Entwicklung von Methoden für den Umgang mit dem Phänomen. Hier am Beispiel der klassischen Mechanik, von links nach rechts: Newtonsche Axiome, Grundgleichung der Mechanik als mathematische Formalisierung und Ergebnis einer Berechnung nach der Finite-Element-Methode (Berechnung der Verformung von Bein-gewebe im Zusammenhang mit der Optimierung von Orthesen (Serf & Albers, 2019)). Bilder (Library of Congress, 2011; Serf & Albers, 2019).

Der formalisierten Beschreibung von Konzepten kommt also eine Schlüsselrolle dabei zu, die Konzepte als Grundlage für die Erforschung von Methoden und Prozessen zugänglich zu machen. Mit der vorliegenden Arbeit wird hierfür ein Beitrag für die entwicklungsmethodische Forschung auf Basis des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) geleistet. Die spezifische Motivation und der Fokus der Arbeit und die sich daraus ergebende Struktur werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

## 1.1 Motivation

Neue Systeme werden auf Basis bestehender Systeme entwickelt. Die Entwicklung geschieht durch eine Kombination aus Übernahme sowie Neuentwicklungsaktivitäten in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Ausprägung (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Geleitet wird die Entwicklung neuer Systeme durch ein angestrebtes Aufwand-Nutzen-Verhältnis, wobei beide Größen mit den unterschiedlichen Entwicklungsaktivitäten in Verbindung stehen. Im Hinblick darauf müssen Methoden und Prozesse zur Entwicklungsunterstützung die folgenden Punkte adressieren:

- Unterstützung bei der Entscheidung, in welchem Umfang und in welcher Form bei der Entwicklung eines neuen Systems auf Bestehendes zurückgegriffen wird oder neu entwickelt wird, auf Basis einer Chancen-Risiko-Analyse
- Bereitstellung von Methoden, die spezifisch die unterschiedlich ausgeprägten Entwicklungsaktivitäten unterstützen können
- Erarbeitung von Ansätzen, die Zugang zu und Verwendung von bestehenden Systemen und zugehörigem Wissen spezifisch für die unterschiedlich ausgeprägten Entwicklungsaktivitäten ermöglichen

Daraus ergeben sich unter anderem Gebiete wie Innovationsmanagement, Risikomanagement, Ansätze zur Methodenempfehlung oder Wissensmanagement. Damit Methoden und Prozesse für diese verschiedenen Gebiete abgestimmt und integriert empirisch untersucht und verwendet werden können, bedarf es eines gemeinsamen zu Grunde liegenden Konzepts zur Beschreibung der Entstehung neuer Systeme sowie einer Formalisierung dieses Konzepts.

Während innerhalb der unterschiedlichen Gebiete teils zahlreiche Ansätze für Methoden und Prozesse zu finden sind, können bisher jedoch nur wenige verknüpfende oder durchgängig als Basis verwendete Ansätze beobachtet werden.

## 1.2 Fokus der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst verschiedene bestehende Ansätze aus den im vorigen Abschnitt genannten Bereichen betrachtet und analysiert. Diese Analyse lässt für das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) das größte Potenzial erkennen (vgl. Abschnitt 2.8), in den zuvor genannten Bereichen durchgängig als Basis zur Methoden- und Prozessentwicklung zu dienen. Das Modell der PGE beschreibt die Entstehung neuer Systeme mit zwei grundlegenden Hypothesen:

- Jede Entwicklung eines neuen Systems erfolgt auf der Basis von Referenzen
- Jede Entwicklung eines neuen Systems ist eine Kombination aus drei unterschiedlichen Variationsarten in unterschiedlichen Anteilen

In der vorliegenden Arbeit wird darauf aufbauend eine Formalisierung des Modells der PGE als Grundlage zur Erforschung von Entwicklungsmethoden und -prozessen vorgeschlagen. Darauf basierend wird ein Rahmenwerk zur Planung und Steuerung von Entwicklungsaktivitäten auf Basis und ausgehend von bestehenden Systemen vorgestellt. Abschließend werden beispielhafte Methodenadaptionen und -entwicklungen unter Verwendung des Modells der PGE dargestellt.

Die Arbeit liefert damit einen Beitrag zur empirisch basierten Planung, Steuerung und methodischen Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten auf der Basis bestehender Systeme im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung.

Themenfelder, zu denen beigetragen wird, ebenso wie solche, auf die im Rahmen der initialen Analyse Bezug genommen wird oder zu denen Schnittstellen bestehen, sind in Abbildung 1.3 im Überblick dargestellt.



Abbildung 1.3: ARC-Diagramm mit Thema der vorliegenden Arbeit, sowie Themen, zu denen beigetragen wird, Themen, auf die Bezug genommen wird und Themen, zu denen im weiteren Sinne Schnittstellen bestehen (ARC = „Areas of relevance and contribution“ (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 64–66)).

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist wie in Abbildung 1.4 gezeigt in 9 Kapitel gegliedert. Die Inhalte der einzelnen Kapitel werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

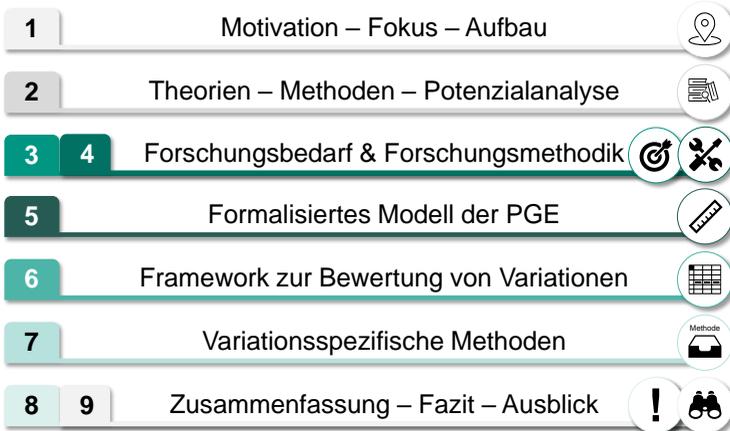


Abbildung 1.4: Kapitel der Arbeit.

In **Kapitel 2** werden verschiedene Design-Theorien vorgestellt sowie Methoden und Modelle aus folgenden Bereichen: Produkt- und Prozessmodellierung, Innovations- und Risikomanagement, Produktinkremente innerhalb einzelner Entwicklungsprojekte und über mehrere Produktgenerationen hinweg, Bewertung von Lösungskonzepten und Änderungs- und Wissensmanagement. Auf Basis einer Potenzialanalyse der vorgestellten Ansätze wird dasjenige Modell ausgewählt, das den Rahmen für die weitere Arbeit bildet.

In **Kapitel 3** wird der dezidierte Forschungsbedarf abgeleitet und darauf aufbauend die Zielsetzung der Arbeit formuliert. Zur Erreichung des Forschungsziels werden Forschungshypothesen entwickelt und durch Forschungsfragen operationalisiert.

In **Kapitel 4** wird die Arbeit in entwicklungsmethodischen Forschungsframeworks verortet. Die verschiedenen Forschungsstadien zur Beantwortung der Forschungsfragen werden erläutert und es wird ein Überblick über die dabei eingesetzten Forschungsmethoden gegeben.

Der erste Teil der Forschungsergebnisse wird in **Kapitel 5** beschrieben. Dort werden auf Basis der Grundhypothesen des Modells der PGE Gründe und Auswirkungen von Variationen in verschiedenen Fallbeispielen untersucht. Anhand der Ergebnisse werden die Struktur für ein formalisiertes Modell der PGE sowie messbare Indikatoren für dessen Elemente vorgeschlagen und evaluiert. Die beobachteten Zusammenhänge aus den Fallbeispielen können damit abgebildet werden und es wird die Grundlage für vertiefende künftige empirische Untersuchungen gelegt.

In **Kapitel 6** wird entlang von Beispielen für einzelne Bausteine ein Framework zur Ableitung und Bewertung von Variationen entwickelt. Hierbei werden die im vorangehenden Kapitel gefundenen und modellierten Zusammenhänge nutzbar gemacht.

In **Kapitel 7** wird anhand fünf ausgewählter Beispiele gezeigt, wie die methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten variationsspezifisch erfolgen kann.

**Kapitel 8** enthält einen Überblick über die zentralen Ergebnisse der Arbeit und die wichtigsten Erkenntnisse.

**Kapitel 9** bildet den Abschluss der Arbeit. Dort werden weiterführende Forschungsbedarfe beschrieben, die sich aus den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit ergeben.



## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind die Modellierung, empirische Untersuchung, Planung, Steuerung und methodische Unterstützung der Entstehung neuer technischer Systeme auf Basis und ausgehend von Referenzen. Als Referenzen, die als Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung neuer Systeme dienen, werden durch das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, s. ausführlich Abschnitt 2.4.5) bestehende Systeme und auch damit assoziiertes Wissen beschrieben. Referenzen können so beispielsweise Vorgänger- oder Wettbewerbssysteme und deren Modelle sein, aber auch Forschungsergebnisse, technische Prozesse, Standards, Konzepte und deren Formulierung sein. Für diesen Forschungsgegenstand sind die in Abbildung 2.1 gezeigten Themenfelder relevant.

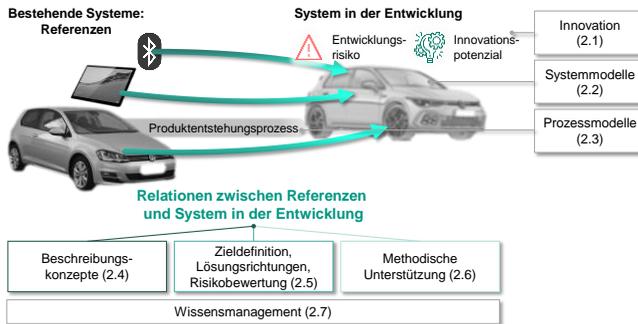


Abbildung 2.1: Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind Relationen zwischen bestehenden Systemen – im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) als Referenzen beschrieben – und einem System in der Ent-

wicklung. Hier an einem Beispiel illustriert. Zur Klärung des Forschungsgegenstands werden die aufgeführten Themenbereiche in den genannten Abschnitten in diesem Kapitel behandelt<sup>1</sup>.

Zur Klärung des Forschungsgegenstands und zur Präzisierung des Forschungsbedarfs werden entsprechend Abbildung 2.2 in den folgenden Abschnitten Grundlagen und der Stand der Forschung zu den folgenden Themenbereichen dargestellt:

- Innovationen und Produktlebenszyklen (Abschnitt 2.1)
- Modellierung von Produkten (Abschnitt 2.2)
- Modellierung des Produktentstehungs-Prozesses und Agile Systems Design (Abschnitt 2.3)
- Beschreibung der Beziehung von Referenzen und zu entwickelnden Systemen (Abschnitt 2.4)
- Entwicklungsziele, Lösungsrichtungen und Risiken auf Basis von Referenzen (Abschnitt 2.5)
- Entwicklungsmethoden unter Berücksichtigung des Bezugs zu Referenzen (Abschnitt 2.6)
- Wiederverwendung von Wissen über Referenzen ermöglichen (Abschnitt 2.7)

Den Abschluss des Kapitels bildet Abschnitt 2.8 mit einem Fazit zu den Ansätzen aus den verschiedenen Abschnitten. Besonderes Potenzial, um im Weiteren als Grundlage der vorliegenden Arbeit zu dienen, haben dabei Ansätze, die möglichst viele der oben genannten Bereiche adressieren oder adressieren können. Im nächsten Abschnitt wird zunächst ein Überblick über das Phänomen und den Begriff der Innovation gegeben, das als zentrale Triebfeder der Entstehung neuer Produkte betrachtet werden kann.

## 2.1 Innovationen und Produktlebenszyklen

Die Bedeutung von Innovationen für Unternehmen lässt sich bereits daran erkennen, dass viele Unternehmen das Innovationsmanagement explizit in der Aufbauorganisation verankern. In Bezug darauf, was „Innovation“ ist, kann in der Literatur jedoch ein heterogenes Begriffsverständnis beobachtet werden. Einen aktuellen

---

<sup>1</sup> Darstellung mit Elementen von [adac.de](http://adac.de), [cdn.motor1.com](http://cdn.motor1.com), [i.pinimg.com](http://i.pinimg.com), [cyberport.scene7.com](http://cyberport.scene7.com), jeweils zuletzt aufgerufen am 01.08.2020

Überblick aus der Perspektive der Produktentwicklung (engl. „Engineering Design“) geben ISAKSSON ET AL. (2019). In ihrem Fazit assoziieren Sie Innovationen mit größeren und damit herausfordernden technischen oder organisatorischen Neuerungen und grenzen Innovationen zu „regular product development activities“ ab (Isaksson et al., 2019, S. 1241).

Dem entgegen steht ein Verständnis von Innovation als wirtschaftlichem Erfolg, auf den jedwede unternehmerische Aktivität hinführen muss. Entsprechend diesem Verständnis, das bereits bei SCHUMPETER (1927) zu finden ist, ist die Neuerung allein nicht ausreichend, sondern Innovation ergibt sich unter Berücksichtigung von technischer und marktlicher Sicht als wirtschaftlich erfolgreiche Neuerung (Schumpeter, 1927, S. 295). ISAKSSON ET AL. bringen dies in dem Framework in Abbildung 2.2 zum Ausdruck.

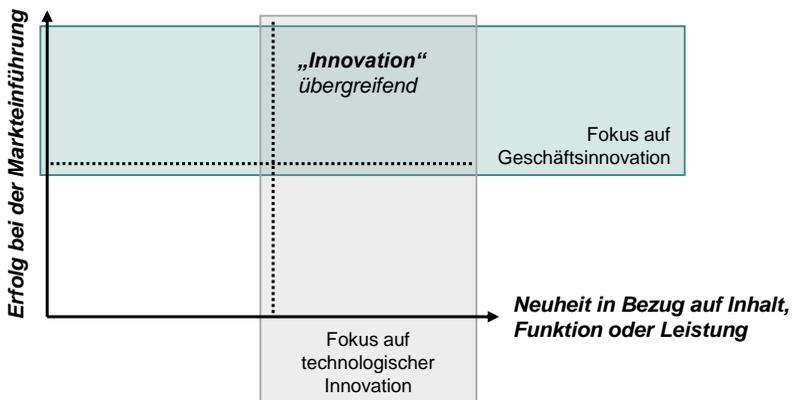


Abbildung 2.2: Framework auf Basis von technischer und marktlicher Sicht auf Innovationen. Innovation im Schumpeter'schen Sinne als wirtschaftlich erfolgreiche unternehmerische Aktivität konstituiert sich (nur) unter Berücksichtigung beider Sichten im Bereich oben rechts. Darstellung nach ISAKSSON ET AL. (2019, S. 1242).

Nicht jeder Verwendung des Innovationsbegriffs liegt jedoch eine unmittelbare Verknüpfung mit wirtschaftlichem Erfolg zu Grunde, beispielsweise bei HENDERSON UND CLARK: „(...) how minor innovations can have great competitive consequences“ (Henderson & Clark, 1990, S. 10). Dort wird mit dem Begriff der Innovation eher auf

die technische Neuerung abgestellt, die wirtschaftlichen Implikationen werden als gesondertes Element verstanden. Wird Innovation im oben beschriebenen Sinne als wirtschaftlich erfolgreiche Neuerung verstanden, wird die Neuerung selbst dagegen als Invention bezeichnet. Eine Innovation kann dabei nicht nur mechatronische Produkte betreffen, sondern auch Geschäftsmodelle, sowohl als Geschäftsmodell für ein Produkt als auch als eigenständiges Produkt (Albers, Basedow et al., 2020). Innovation als wirtschaftlicher Erfolg kann sowohl durch Differenzierung gegenüber bisherigen Produkten als auch durch Kostenreduktion zu Stande kommen (Gassmann, 2006, S. 7). Verallgemeinert wird durch eine Innovation damit ein Bündel aus Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen realisiert (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Für eine Innovation ist es notwendig (aber nicht hinreichend!) dieses Nutzenbündel zu identifizieren, als Ausgangspunkt für die Produktentwicklung zu beschreiben und einer Validierung zugänglich zu machen. Dies geschieht nach ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018) mit Hilfe des Produktprofils:

**Definition Produktprofil:**

Ein Produktprofil ist ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt.

Ein Nutzenbündel wird hierbei verstanden als eine Gesamtheit aus Produkten und Dienstleistungen, welches mit dem Zweck erstellt wird, an einen Kunden verkauft zu werden und für ihn direkt oder indirekt – z.B. für von ihm berücksichtigte Anwender oder für seine Kunden – Nutzen zu stiften.

(Albers, Heimicke, Walter et al., 2018, S. 255), Übersetzung nach IPEK-Glossar (IPEK, 2020a)

Zur Modellierung von Produktprofilen stellen ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018) das in Abbildung 2.3 gezeigte Produktprofil-Schema bereit, das neben den genannten Nutzendimensionen auch weiterführende Informationen zu Randbedingungen, der Marktsituation und bereits bestehenden Systemen gibt, die als Referenz dienen. Da, wie zuvor angeführt, Innovationen auch Geschäftsmodelle betreffen können, können im Produktprofil Bezüge zum Geschäftsmodell für das zu entwickelnde Produkt enthalten sein. Ebenso kann ein Geschäftsmodell Teil des zu entwickelnden Produkts sein.

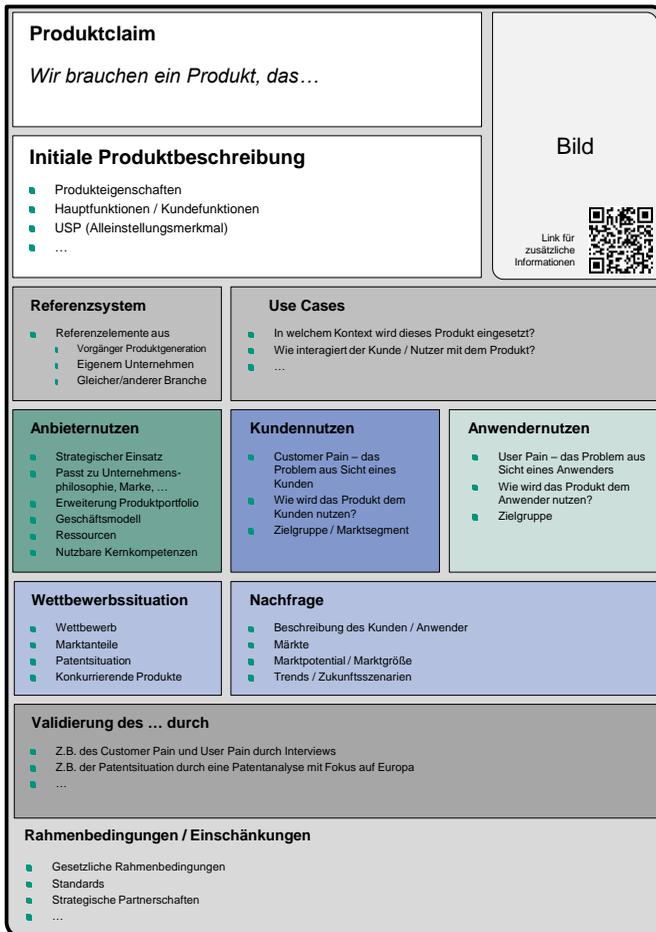


Abbildung 2.3: Produktprofil-Schema zur Darstellung von Produktprofilen nach ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018, S. 257) Neben Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen sind auch weitere Informationen zu Randbedingungen, der Marktsituation oder bestehenden Systemen, die als Referenz dienen, enthalten.

Ausgehend vom Produktprofil ergeben sich zusammen mit der Invention zur Realisierung und der erfolgreichen Markteinführung die in Abbildung 2.4 gezeigten Bestandteile einer Innovation nach ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018).

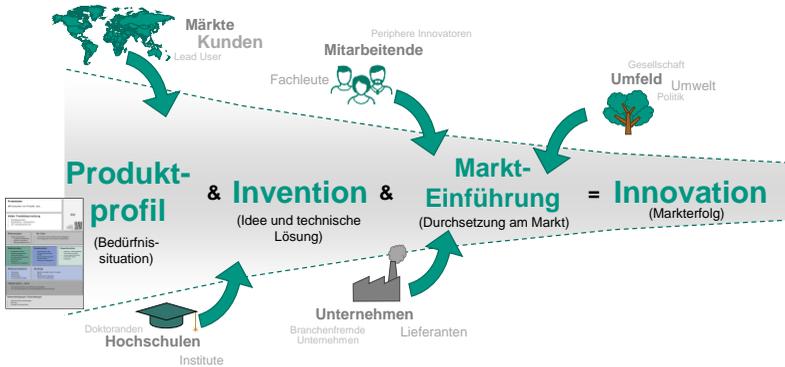


Abbildung 2.4: Bestandteile einer Innovation nach ALBERS, HEIMICKE UND WALTER ET AL. (2018), Darstellung nach ALBERS, HEIMICKE, HIRSCHTER ET AL. (2018).

Die Nutzenbündel einer Innovation werden unter anderem durch Neuerungen realisiert. Diese Neuerungen führen zu Risiken (Unger & Eppinger, 2009, S. 400). Dabei ist „[h]oher Profit mit wenig Risiko [...] Wunschdenken und lässt sich selten finden. Meistens gilt es zu entscheiden zwischen durchschnittlichen Margen bei wenig Risiko oder hohen Margen bei hohem Risiko.“ (Gassmann, 2006, S. 6)

Diese Risiken können Unternehmen auf Basis des wirtschaftlichen Erfolgs aus vorangegangenen Innovationen eingehen und müssen sie für künftigen wirtschaftlichen Erfolg auch eingehen. Für fortdauernden wirtschaftlichen Erfolg müssen Unternehmen regelmäßig Innovationen entwickeln (Abernathy, 1981 nach Maul, 2015, S. 9).

Einerseits ist zwar eine Mindstdifferenzierung neuer Produkte gegenüber bestehenden Produkten zu erreichen, andererseits sind aber Risiken in Folge von Neuerungen zu begrenzen. Aus dieser Notwendigkeit folgt, dass Innovationen in der Regel nicht nur durch Neuerungen realisiert werden können, sondern auch Bestehendes, wo möglich, einzubringen und zu nutzen ist. Ergebnis sind Beziehungen neu entwickelter Systeme zu bereits bestehenden Systemen. Diese manifestie-

ren sich beispielsweise in optischer Ähnlichkeit, ähnlichen Bezeichnungen, Verwendung gleicher Bauteile oder in teilweise ähnlichem Zweck und ähnlicher Zielsetzung bei Entwicklung und Nutzung. Es ergeben sich so beobachtbare Produktgenerationslebenszyklen wie in Abbildung 2.5 dargestellt.

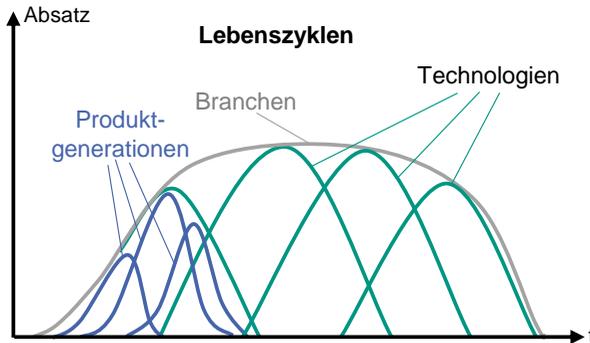


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung beobachtbarer Lebenszyklen von Produktgenerationen, Technologien und Branchen (Wesner, 1977), Darstellung nach ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 17).

Über Lebenszyklen einzelner Produktgenerationen hinaus können, wie dargestellt, auch Lebenszyklen von Technologien und Branchen beobachtet werden.

Aus dem Ziel heraus, die Entwicklung neuer Produkte mit Innovationspotenzial methodisch zu unterstützen und für das Management solcher Prozesse geeignete Ansätze bereitzustellen, ergeben sich folgende Handlungsfelder:

- Beschreibung von innovativen Produkten und deren Entstehungsprozesses
- Ontologische Beschreibung der Beziehung neu entwickelter oder zu entwickelnder Systeme zu bestehenden, um das Phänomen für die Forschung greifbar zu machen
- Erforschung von Ansätzen, einerseits zur Zieldefinition für innovative Produkte, sodass eine hinreichende Differenzierung in Bezug auf die Nutzenperspektive gegenüber bestehenden Systemen gegeben ist, andererseits zur Einschätzung und Handhabung der Risiken bei der Entwicklung des neuen Systems

- Erforschung von Ansätzen, die die Wiederverwendung von Wissen aus der Entwicklung von Systemen ermöglicht
- Methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten

Dabei gilt, dass Innovationen nur retrospektiv beurteilbar sind, aber vorausschauend geplant werden müssen: „Die Basis für den Innovationserfolg von morgen ist daher eine vorausschauende und systemorientierte Produktentstehung“ (Albers & Gausemeier, 2012, S. 17). Als Grundlage hierfür wird im nächsten Abschnitt ein Überblick über die Modellierung von Produkten und deren Beschreibung als Systeme gegeben.

## 2.2 Modellierung von Produkten

Modelle sind der allgemeinen Modelltheorie von STACHOWIAK (1973) nach Abbildungen von etwas (Abbildungsmerkmal) (Stachowiak, 1973, S. 131). Damit geht einher, dass Modelle stets nur einen Auszug dessen, was sie abbilden, als Information beinhalten (Verkürzungsmerkmal) (Stachowiak, 1973, S. 132). Die Verkürzung erfolgt gemäß Modellzweck und Relevanz von Informationen für diesen Zweck. Umgekehrt führt diese Informationsverkürzung dazu, dass Modelle mehrerer Originale gleich sein können bzw. ein bestimmtes Modell als Abbild von mehreren Originalen gesehen werden kann. Ein Modell ist also seinem Original nicht eindeutig zuzuordnen (Pragmatisches Merkmal) (Stachowiak, 1973, S. 132).

Grundlage für die Modellierung technischer und soziotechnischer Systeme ist häufig die Systemtheorie der Technik nach ROPOHL (1979).

### 2.2.1 Produkte als Systeme: Systemtheorie der Technik

Die Systemtheorie der Technik (Ropohl, 1979) ermöglicht, ausgehend von der allgemeinen Systemtheorie, die Modellierung von Produkten, für die mehrere Domänen relevant sind (Bursac, 2016b, S. 9)<sup>2</sup>.

Der Systembegriff umfasst drei Aspekte: Das strukturelle, das funktionale und das hierarchische Konzept (Ropohl, 2009, S. 75–77). Diese drei Aspekte sind in Abbildung 2.6 veranschaulicht.

---

<sup>2</sup> Für weiterführende Erläuterungen und Referenzen zur Historie der Systemtheorie siehe dort.

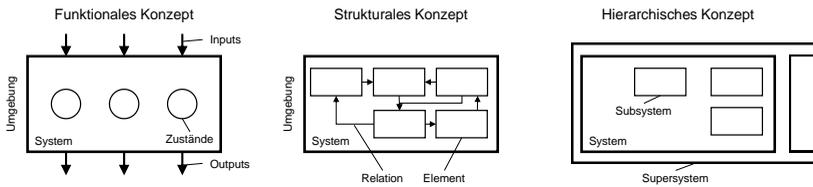


Abbildung 2.6: Die drei Aspekte des Systembegriffs, Darstellung nach Ropohl (2009, S. 76).

Beim Funktionalen Konzept liegt der Fokus gegenüber der Beschaffenheit eher auf dem Verhalten eines Systems, das sich in seiner Wechselwirkung mit der Umgebung durch die Wandlung von Input- in Output-Größen manifestiert (Ropohl, 2009, S. 75–76). Die Bestandteile eines Systems und deren Zusammenspiel (Relationen), die letztlich den Systemcharakter konstituieren, wird durch das Strukturele Konzept beschrieben (Ropohl, 2009, S. 75). Das Hierarchische Konzept erfasst, dass bei der Modellierung eines Systems verschiedene Detailtiefen der Betrachtung möglich sind (Ropohl, 2009, S. 77).

Die Strukturierung eines Systems in Teilsysteme wird, insbesondere im Zusammenhang mit Baukästen, als „Modularisierung“ bezeichnet (Bursac, 2016b nach Scherer, 2016, S. 32). Das Ergebnis wird auch „Produktarchitektur“ genannt. Diese ist ein Schema, durch das Funktionen eines Produkts physischen Komponenten zugeordnet werden (Ulrich, 2012 nach Mirdamadi, Addouche & Zolghadri, 2018, S. 1; Inkermann et al., 2019). Ziel dabei ist es letztlich, Stakeholder-Anforderungen in ein Set handhabbarer und realisierbarer Teilprobleme zu überführen, die es zu lösen gilt (Kissel & Lindemann, 2013, S. 5). Entsprechend unterschiedlicher Stakeholder können die Zielgrößen für eine Modularisierung vielfältig sein, beispielsweise gute Herstellbarkeit, gute Austauschbarkeit oder einfache Beschaffung von Modulen. Zur Definition von „Modul“ existieren verschiedene Ansätze. Einen Überblick gibt BURSAC (2016b, S. 49). ALBERS, SCHERER, BURSAC UND RACHENKOVA (2015) definieren ein Modul wie folgt als Teilsystem eines technischen Systems:

**Definition Modul:**

Ein Modul ist ein technisches Subsystem, das sich durch andere technische Subsysteme ersetzen lässt, so dass die Menge aller Funktionen oder Attribute des technischen Systems variiert wird.

(Albers, Scherer et al., 2015, S. 49)

Zur methodischen Unterstützung bei der Modularisierung von Systemen gibt es verschiedenste Ansätze. Einen Überblick geben beispielsweise SCHERER (2016, S. 32–33) und OTTO ET AL. (2016).

Zur Darstellung der Module eines Systems und deren Wechselbeziehungen werden häufig Design Structure Matrices (DSM) (Eppinger & Browning, 2012) verwendet. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.7 gezeigt.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Chassis		X	X			X	X				X		
2	Batterie					X								
3	Ausleger	X				X								
4	Kette	X				X								
5	Kommunikationsbox					X							X	
6	Elektronikbox		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
7	Manipulator	X				X								
8	Mast	X				X		X						
9	Kopf					X		X		X				
10	Greifer					X								
11	Kameras					X		X						
12	Ladebucht	X				X								
13	Antenne				X									X
14	OCU												X	

Abbildung 2.7: Beispiel einer Design Structure Matrix. Hier für die Teilsysteme eines automatisierten, unbemannten Kettenfahrzeugs, Darstellung nach Otto et al. (2016, S. 10)

In den Zeilen und Spalten sind jeweils die Teilsysteme eingetragen. Die Kreuze in den Matrixfeldern zeigen an, ob zwischen den Teilsystemen Wechselwirkungen bestehen. In weiteren Varianten kann beispielsweise durch unterschiedliche Arten von Matrixeinträgen angegeben werden, um welche Art von Wechselwirkung es sich handelt (z.B. Stoff-, Energie- oder Informationsfluss).

Gemäß dem hierarchischen Konzept, das die prinzipiell in unterschiedlichem Detailgrad und auf unterschiedlichen Ebenen mögliche Betrachtung eines Systems beschreibt, können für ein bestimmtes System unterschiedliche Teilsystemunterteilungen, die auch in einer unterschiedlichen Teilsystemgröße und -anzahl resultieren, gewählt werden.

In einer weiteren Ausprägung der hierarchischen Systembetrachtung werden, wie in Abbildung 2.8 gezeigt, beispielsweise Funktion, Physik und Gestalt technischer Systeme unterschieden.

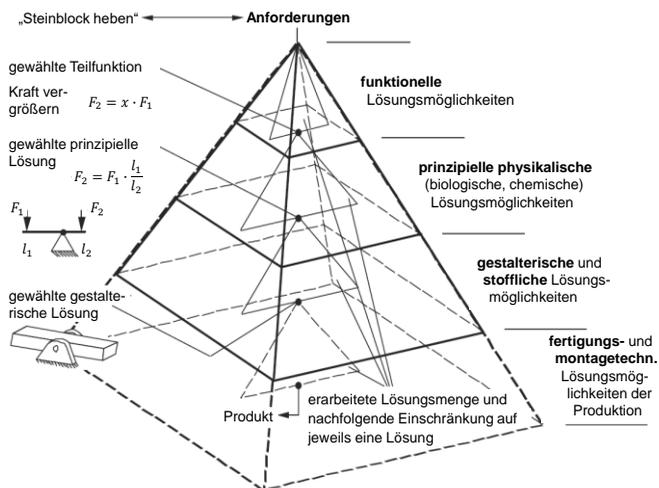


Abbildung 2.8: Hierarchische Betrachtungsweise eines Systems mit Funktion, Physik und Gestalt (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 48). Eine generalisierte Modellbildung (unter anderem) für Anforderungen und die Verknüpfung mit der Gestalt eines Systems stellt auf Basis der technischen Systemtheorie das ZHO-Modell nach ALBERS dar (Albers & Braun, 2011), s. auch Abschnitt 2.3.2.

Für die Erfüllung eines bestimmten Zwecks technischer Systeme ist dabei insbesondere der Zusammenhang zwischen ihrer Funktion und Gestalt von Bedeutung. Im folgenden Abschnitt wird die Modellierung dieses Zusammenhangs mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes erläutert.

## 2.2.2 Modellierung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs mit C&C<sup>2</sup>-A

Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz ist ein Metamodell<sup>3</sup> zur Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ). Für den C&C<sup>2</sup>-Ansatz liegen 20 Jahre erfolgreiche Anwendungserfahrung vor (Grauberger et al., 2019), eine ausführliche Darstellung einer Anwendung enthält beispielsweise ALBERS, ALINK, THAU UND MATTHIESEN (2008). Der Ansatz wird daher für die vorliegende Arbeit zur Modellierung von GFZ genutzt und im Folgenden vorgestellt.

Der Ansatz wurde von ALBERS UND MATTHIESEN (2002) vorgestellt mit dem Ziel, Entwickelnde bei der Identifikation funktionsrelevanter Parameter<sup>4</sup> und dem Denken im Systemkontext zu unterstützen (Matthiesen, Grauberger, Sturm & Steck, 2018, S. 476).

„C&C<sup>2</sup>“ steht für die Kernelemente des Ansatzes zur Darstellung von GFZ: Wirkflächenpaare (Contact), Leitstützstrukturen (Channel) und Connectoren. Diese Kernelemente sowie Nebenelemente und Grundhypothesen zur Modellbildung sind in Abbildung 2.9 dargestellt.

Ein Wirkflächenpaar (WFP) beschreibt die Schnittstelle, an der Teile des Systems während der Funktionserfüllung in Kontakt sind. Leitstützstrukturen (LSS) verlaufen durch die Teile des Systems und verbinden Wirkflächenpaare, wobei der von einer LSS umfasste Systembereich je nach Modellierungszweck von Teilbereichen einzelner Komponenten bis hin zu ganzen Teilsystemen reichen kann. Connectoren bilden die Systemgrenze mit der Wechselwirkung des Systems mit seiner Umgebung. (Albers & Wintergerst, 2014, S. 160; Matthiesen, 2002, S. 48–51; Matthiesen, Grauberger, Sturm & Steck, 2018, S. 476)

---

<sup>3</sup> Metamodelle „sind abstrakte Modelle [...] und dienen der Entwicklung und der Ableitung formaler Modelle.“ (Meboldt (2009, S. 104), mit Verweis auf Hars (1994)).

<sup>4</sup> Vgl. hierzu auch die 4. zentrale Hypothese der Produktentstehung nach Albers (2010): „The objects that are created in an engineering process have to be described in reference to the intended functions that are part of the system of objectives in order to keep these objectives transparent“

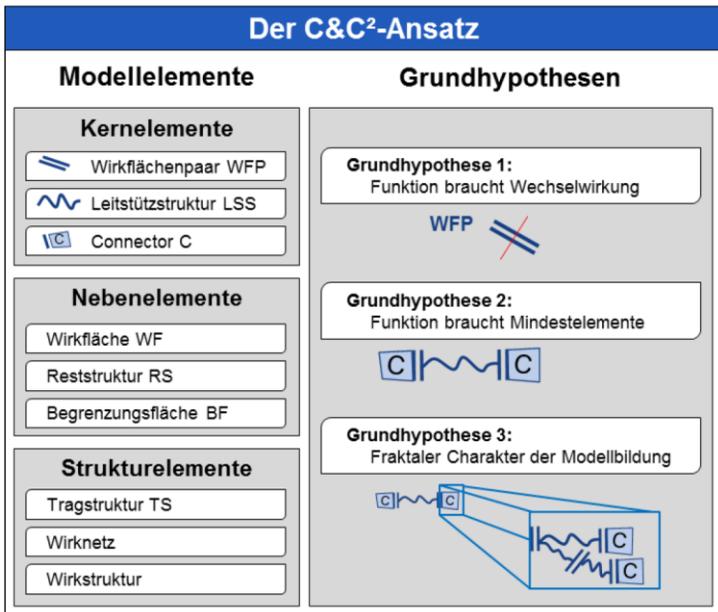


Abbildung 2.9: Modellelemente und Grundhypothesen des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes, Darstellung aus MATTHIESEN, GRAUBERGER, HÖLZ ET AL. (2018, S. 7).

Die zweite Grundhypothese der Modellbildung mit C&C<sup>2</sup>-A in Abbildung 2.9 beruht auf der 5. zentralen Hypothese der Produktentstehung nach ALBERS (2010), der zu Folge für die Realisierung einer technischen Funktion mindestens zwei WFP und eine Wechselwirkung des Systems mit seiner Umgebung notwendig sind (Albers, 2010, S. 6).

Auf Grund der Dynamik vieler Systeme können bei der Erfüllung von Funktionen und der Modellierung dieser mit C&C<sup>2</sup>-A verschiedene Zustände beobachtet werden. Die zeitliche Abfolge dieser Zustände ergibt ein Sequenzmodell, für dessen Erstellung MATTHIESEN UND RUCKPAUL (2012) ein Vorgehen vorschlagen (Matthiesen & Ruckpaul, 2012, S. 5–6). Die Summe der C&C<sup>2</sup>-Elemente in einem Zustand bilden das Wirknetz, die Summe der Wirknetze über alle Zustände die Wirkstruktur eines Systems (Albers & Wintergerst, 2014, S. 161; Matthiesen, Grauberger, Hölz et al., 2018, S. 7).

Eine weitere Variabilität im C&C<sup>2</sup>-A-Modell eines Systems ergibt sich durch die 3. Grundhypothese gemäß derer verschiedene Detailgrade bei der Modellierung eines Systems möglich sind (vgl. auch hierarchisches Konzept in der Systemtheorie in 2.2.1). Der Detailgrad wird durch den Modellierungszweck bestimmt. ALBERS, GLADYSZ, KNIEL, ASCHOFF UND MEYER A. (2016) zeigen verschieden detaillierte Modellierungen an einem Friktionskontakt eines trockenlaufenden Kupplungssystems. Die Überführung von Modellen unterschiedlichen Detailgrades ineinander stellt dabei bisher noch eine Herausforderung dar (Albers, Gladysz et al., 2016, S. 4).

„Der initiale Modellierungsaufwand bei modellbasierten Analyse- und Synthese-Methoden, die im Gegensatz zu rein funktionsbasierten Modellen sowohl Funktions[...] als auch Gestalt-Aspekte von technischen Systemen integrieren, ist in der Regel höher, da zusätzliche Informationen im jeweiligen Modell abgebildet werden müssen.“ (Albers, Gladysz et al., 2016, S. 1). Es wird versucht, dieser Herausforderung durch die Verknüpfung von Modellen, sowohl für einzelne Systeme als auch über mehrere Systeme hinweg zu begegnen. Der nächste Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über dafür genutzte Ansätze.

### **2.2.3 Verknüpfung verschiedener Produktmodelle**

Die Verknüpfung verschiedener Produktmodelle und Verwendung dieser Verknüpften Modelle als Grundlage für die Produktentstehung wird vor dem Hintergrund des Systems Engineering als Model Based Systems Engineering bezeichnet (Estefan, 2007, S. 10). Damit einhergehen soll auch die Verknüpfung und Verwendung von Produktmodellen zur Verwendung über mehrere Produktentstehungsprojekte hinweg. Unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungsbereiche und verschiedener Abstraktionsgrade in der Modellbildung stellen ALBERS, MATTHIESEN ET AL. (2015) das in Abbildung 2.10 gezeigte Framework für Produktmodelle bereit.

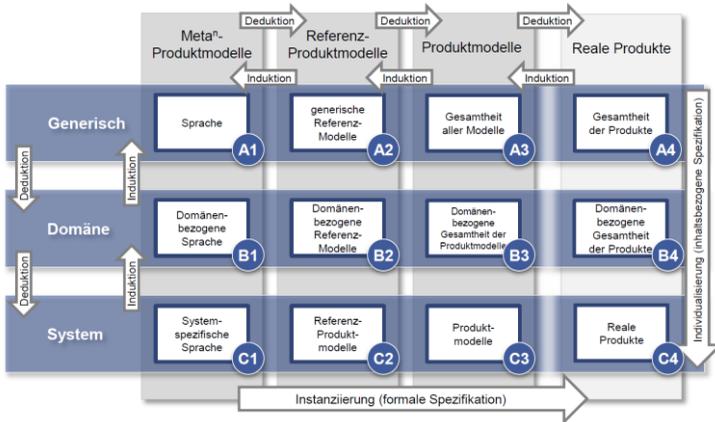


Abbildung 2.10: Framework für Produktmodelle unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungsbereiche und Abstraktionsgrade von Modellen (Albers, Matthiesen et al., 2015, S. 189), Darstellung (Bursac, 2016b, S. 116).

Ansätze zur situationsgerechten Bereitstellung des Wissens aus diesen Modellen im Produktentstehungsprozess können dem Bereich des Wissensmanagements zugeordnet werden. Ausgewählte Ansätze werden hier in Abschnitt 2.7 vorgestellt. Die Modellierung von Produktentwicklungs- und -entstehungsprozessen selbst kann ebenfalls auf Grundlage der Systemtheorie erfolgen und wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

## 2.3 Modellierung des Produktentstehungs-Prozesses und Agile Systems Design

Eine Herausforderung bei der Modellierung von Produktentstehungsprozessen ist, dass jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell ist (Albers, 2010, S. 4)<sup>5</sup>. Im Grundsatz kann jeder Produktentstehungsprozess zunächst als Problemlösungsprozess verstanden werden (Albers, Saak & Burkardt, 2002), aufbauend

<sup>5</sup> Erste zentrale Hypothese nach Albers (2010).

auf einer Auffassung von Problem als Abweichung zwischen einem beliebig unbekanntem IST-Zustand und einem gewünschten, zunächst beliebig vagen SOLL-Zustand (Dörner, 1979 nach Albers et al., 2002).

Dieser Prozess wird, wie in Abbildung 2.11 zu sehen, von einer Vielzahl unterschiedlicher Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungs- und Formalisierungsgrad der Darstellung modelliert (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1).

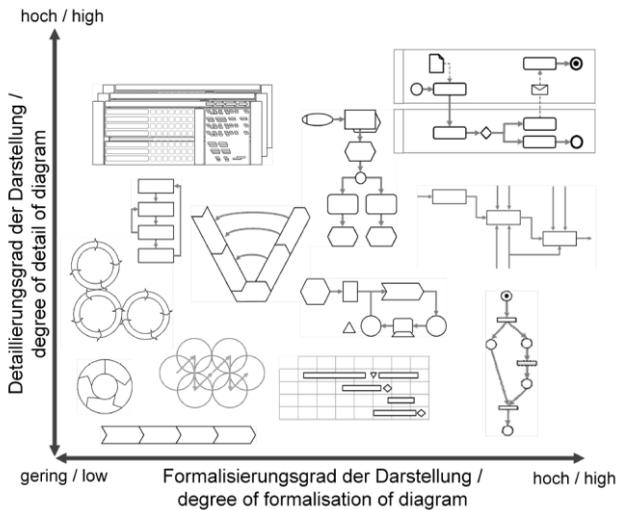


Abbildung 2.11: Zur Modellierung des Produktentstehungsprozesses (oder Teilen davon) gibt es verschiedenste Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungs- und Formalisierungsgrad der Darstellung (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 29).

Im Folgenden wird als ein Beispiel für eine Problemlösungsmethodik mit hohem Abstraktionsgrad und entsprechend breitem Anwendungsbereich der SPALTEN-Ansatz vorgestellt.

### 2.3.1 Produktentstehung als Problemlösung mit SPALTEN

Die Problemlösungsmethodik SPALTEN wurde von ALBERS ET AL. (2002) entwickelt. Der Name ist dabei ein Akronym aus den Schritten der Problemlösung des Ansatzes, dargestellt Abbildung 2.12. Die einzelnen Schritte sind so leicht zu merken (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016, S. 9).

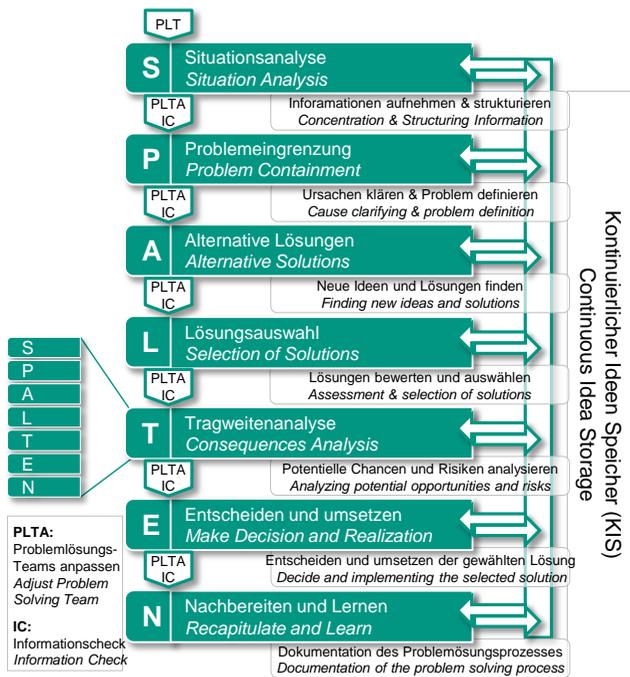


Abbildung 2.12: Elemente der Problemlösungsmethodik SPALTEN nach Albers et al. (2002), Darstellung nach Albers et al. (2016).

In einer Studie zu 15 Jahren der Anwendung wird der Ansatz von ALBERS ET AL. (2016) positiv evaluiert. Der Ansatz ist weiterhin ein Kernbestandteil des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM als Meta-Modell zur Modellierung von Produktentstehungsprozessen.

### 2.3.2 iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Auf Grundlage der Systemtheorie kann die Produktentstehung auch verstanden werden als die Überführung eines initial vagen Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem (Albers, 2010, S. 4)<sup>6</sup>.

Dabei enthält das Zielsystem Ziele, Randbedingungen, deren Wechselwirkungen und Begründungen für die Entwicklung eines Produkts. Das Objektsystem enthält alle die Artefakte, die im Produktentstehungsprozess entstehen, einschließlich des Produkts selbst. Das Handlungssystem als sozio-technisches System erstellt Ziel- und Objektsystem und verbindet diese. Im Handlungssystem sind die zur Produktentstehung notwendigen Methoden, Prozesse und Ressourcen enthalten. (Albers & Braun, 2011)

Die Entwicklung von Ziel- und Objektsystem durch das Handlungssystem geschieht iterativ durch einen Wechsel von Analyse- und Syntheseaktivitäten wie in Abbildung 2.13 dargestellt. Dieser Prozess kann auf unterschiedlichen Ebenen von einzelnen Entwickelnden bis hin zur gesamten Organisation beobachtet werden. (Albers, Lohmeyer & Ebel, 2011)

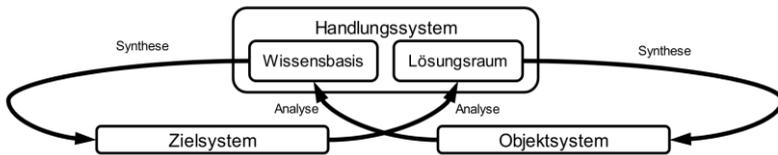


Abbildung 2.13: Iterative Entwicklung des Ziel- und Objektsystems durch das Handlungssystem in wechselnden Analyse- und Syntheseaktivitäten (erweitertes ZHO-Modell) (Albers et al., 2011, S. 2), übersetzte Darstellung nach LOHMEYER (2013, S. 122).

Diese Zusammenhänge sowie SPALTEN als Problemlösungsmethodik bilden die Basis für das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell nach ALBERS (Albers & Meboldt, 2007). Das Modell ist ein Meta-modell zur Modellierung von Produktent-

---

<sup>6</sup> Zweite zentrale Hypothese nach Albers (2010).

stehungsprozessen. In Abbildung 2.14 ist die aktuelle Darstellung des iPeM zu sehen, die sowohl eine Darstellung der Zusammenhänge von Produkt- mit Produktionssystem-, Validierungssystem- und Strategientstehung erlaubt als auch die Modellierung mehrerer Produktgenerationen (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016).

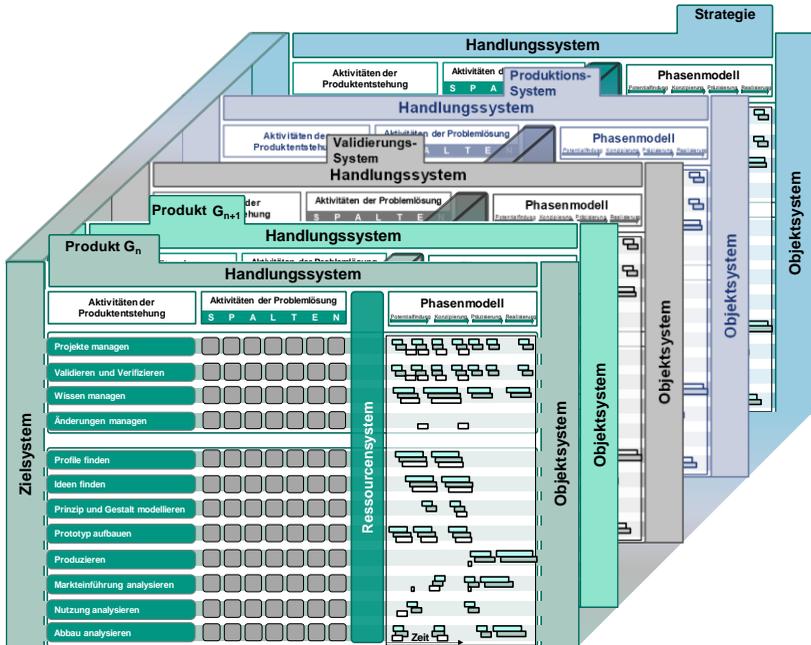


Abbildung 2.14: iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers & Meboldt, 2007; Albers, Reiß et al., 2016), Darstellung gemäß ALBERS UND REIß ET AL. (2016, 5).

Das Phasenmodell im iPeM ermöglicht die Darstellung iterativer Prozesse und ist damit auch zur Modellierung agiler Produktentstehungsprozesse geeignet. Einen Rahmen für die Gestaltung solcher Prozesse bietet der Ansatz des ASD – Agile Systems Design.

### 2.3.3 ASD – Agile Systems Design

Der Ansatz des ASD – Agile Systems Design wurde von ALBERS (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019b) entwickelt, um den Einsatz agiler Methoden und Prozesse in der Mechatroniksystem-Entwicklung zu ermöglichen und dort unter Berücksichtigung des spezifischen Umfelds „das Vorgehen in der Entwicklung mittels des geeigneten Maßes an Agilität zu gestalten.“ (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019b, S. 7).

Ausgehend von einem Überblick zu den vielfältigen anzutreffenden Agilitätsverständnissen wird dafür Agilität wie folgt definiert:

**Definition Agilität:**

Agilität - basierend auf der Systemtripel-Theorie<sup>7</sup> - ist die Fähigkeit eines Handlungssystems, die Gültigkeit eines Projektplans im Hinblick auf die Planungsstabilität der Elemente des Systemtripels kontinuierlich zu überprüfen und in Frage zu stellen und bei einer ungeplanten Informationskonstellation eine situations- und bedarfsgerechte Anpassung der Abfolge von Synthese- und Analysetätigkeiten zu implementieren, wodurch der Kunden-, Nutzer- und Anbieter-Nutzen gezielt gesteigert wird.

(Albers, Heimicke, Müller & Spadinger, 2019, S. 10), übersetzt

Kernelement des ASD sind 9 Prinzipien (Abbildung 2.15), die als übergeordnete Leitlinien für die Entwicklung und den Einsatz von Methoden und Prozessen verstanden werden können (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019a, S. 1018–1020, 2019b, S. 7–10).

---

<sup>7</sup> Gemeint ist das Tripel aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem, siehe Abschnitt 2.3.2

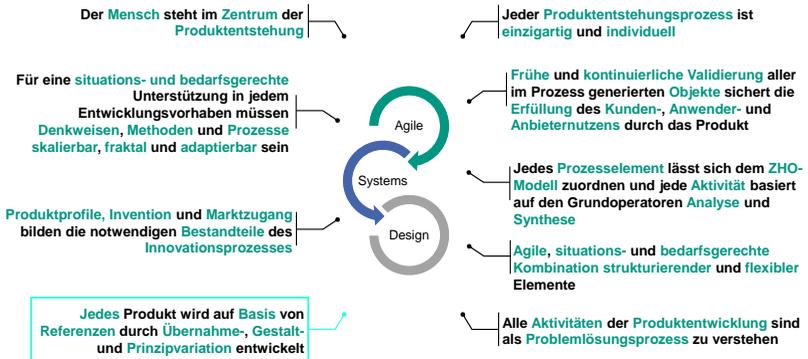


Abbildung 2.15:9 Prinzipien des ASD – Agile Systems Design nach ALBERS (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019a, S. 1018–1020, 2019b, S. 7–10), Darstellung auf Basis von ALBERS UND BURSAC (2019).

Wie im iPeM über mehrere Produktgenerationen dargestellt, ist in den 9 ASD-Prinzipien ebenfalls der Bezug zu bestehenden Systemen (Referenzen) expliziert. Der Fokus vieler gängiger Prozessmodelle liegt jedoch auf einem einzelnen Produktentwicklungs- oder -entstehungsprojekt. Der Bezug zu bestehenden Systemen wird, wenn, dann eher implizit dargestellt. Ansätze, die den Bezug zwischen neu entstehenden Systemen und bereits bestehenden explizit beschreiben, werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

## 2.4 Beschreibung der Beziehung von Referenzen und zu entwickelnden Systemen

In der Literatur ist in Bezug auf Entwicklungsvorhaben einerseits immer wieder eine Trennung zu finden zwischen Vorhaben, die auf bestehendem aufbauen und solchen, die völlig neu sind. Einige solcher Unterscheidungen führen beispielsweise HAMRAZ, CALDWELL UND CLARKSON (2013, S. 474) an, dem zu Folge diese Taxonomie unumstritten ist. Demgegenüber führen SIVALOGANATHAN UND SHAHIN (1999, S. 641) andererseits an, dass Produktentwicklung stets eine Mischung aus bestehenden Lösungen und neuen Innovationen sei. WYNN UND ECKERT (2017, S. 541)

führen weiterhin an, dass sich viele Forscher darüber einig sind, dass Produktentwicklung vom Wesen her iterativ ist, auch über Projekte hinweg (Wynn & Eckert, 2017, S. 154).

Es ergeben sich so Beziehungen zwischen in der Entwicklung befindlichen Systemen und bereits bestehenden Systemen. Verschiedene Ansätze, die darauf abzielen, diese Beziehungen greifbar zu machen, werden in den nächsten Abschnitten vorgestellt. Es gibt unterschiedliche Auffassungen, wann es sich dabei um ein Modell oder eine Theorie handelt (Chakrabarti & Blessing, 2014, S. 9). In den folgenden Abschnitten wird hier vor allem dann explizit von einem oder anderen gesprochen, soweit es sich um Selbstbezeichnungen handelt. Ein weiter gefasster Überblick über verschiedenste Modelle und Theorien in der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik zur Beschreibung unterschiedlichster Phänomene ist zum Beispiel bei CHAKRABARTI UND BLESSING (2014, S. 38–41) und CHAKRABARTI UND BLESSING (2014, S. 345–349) zu finden.

ECKERT ET AL. (2017) weisen im Zusammenhang mit Prozess- und Produktmodellen darauf hin, dass Formalismen zur Modellbildung auch implizit sein können (Eckert et al., 2017, S. 12). In diesem Sinne wird zum Ende des Teilkapitels auch in Kürze eine Auswahl an Ansätzen vorgestellt, in denen die Beziehung zwischen in der Entwicklung befindlichen Systemen und bestehenden Systemen nicht im Fokus steht, diese Beziehung aber implizit vorausgesetzt oder erforderlich ist.

## 2.4.1 C-K-Theorie

Die C-K-Theorie wurde von HATCHUEL UND WEIL (2003) vorgeschlagen. Die Ausführungen dieses Abschnitts beruhen, sofern nicht anders angegeben, darauf. Die C-K-Theorie kann als abstrakteste unter den Design-Theorien betrachtet werden und weist starke mathematisch-logische Bezüge auf (Agogué & Kazakçi, 2014, S. 231). Sie ist bei HATCHUEL UND WEIL zunächst nur für eine einzelne Person in der Rolle des Entwickelnden formuliert, die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass die beschriebenen Zusammenhänge prinzipiell auch bei mehreren Personen gelten können.

Namensgebend für die Theorie sind zwei Räume („Spaces“) im Sinne mathematischer Mengen, der Konzeptraum („Concept-Space“) und der Wissensraum („Knowledge-Space“) .

Alle Design-Elemente (im Original „Propositions“) mit denen Entwickelnde im Design-Prozess zu tun haben, sind einem der zwei Räume zugeordnet. Elemente, im K-Space, beispielsweise technische Lösungsideen, sind dadurch gekennzeichnet, dass sie (für die Entwickelnden) einen „logischen Status“ besitzen. Im Fall einer Standard-Logik mit der binären Unterscheidung zwischen WAHR und FALSCH kann dies für eine technische Lösungsidee als „funktioniert“ bzw. „funktioniert nicht“

verstanden werden, also das Wissen um die Funktionsfähigkeit oder Realisierbarkeit der Idee. Da dieses Wissen von Person zu Person verschieden sein kann, ist der K-Space personenabhängig (bzw. bei Betrachtung von mehr als einer Person beispielsweise Team-abhängig). Bei Elementen im C-Space liegt Wissen über den logischen Status nicht vor, es handelt sich um „ungeprüfte“ Ideen, Konzepte und andere Elemente. Neues in der Entwicklung ist dadurch explizit als das definiert, was nicht im personenspezifischen Wissensraum ist. Elemente aus dem C-Space können durch Methoden der Verifikation und Validierung in den K-Space gelangen. Neue Elemente können durch Erweiterung oder Reduktion von bestehenden Elementen entstehen, beispielsweise indem bestehende Lösungen (ggf. gedanklich) um neue Eigenschaften erweitert werden. Je nachdem, ob das Ergebnis einen logischen Status besitzt oder nicht, entsteht ein neues Element im K-Space oder im C-Space, wie in Abbildung 2.16 gezeigt.

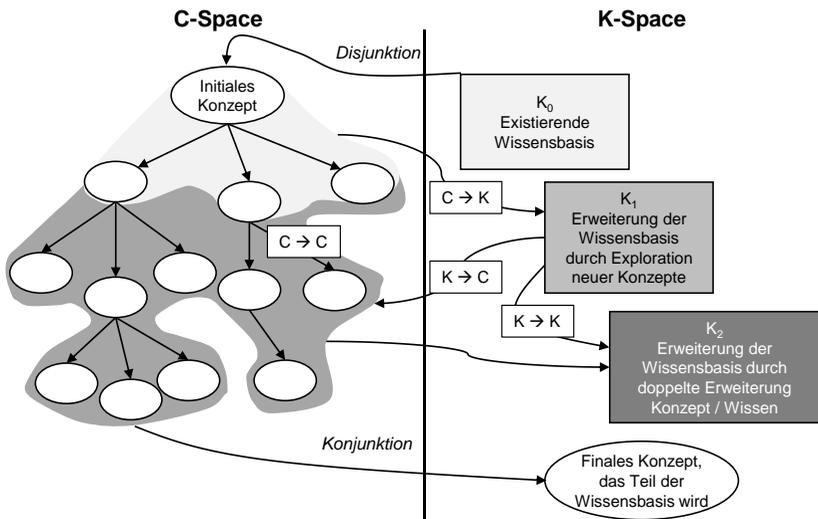


Abbildung 2.16: Co-Evolution von Concept-Space und Knowledge-Space, Darstellung nach AGOGUÉ UND KAZAKÇI (2014, S. 220), basierend auf HATCHUEL UND WEIL (2003, S. 10).

Entwicklung („Design“) ist in der C-K-Theorie damit die in Abbildung 2.16 dargestellte Co-Evolution der beiden Räume.

Insgesamt ist die C-K-Theorie durch wenige, klar definierte Modellelemente und Operatoren gekennzeichnet, die einer streng formalen Logik genügen. Sie ist generisch ohne domänenspezifische Bezüge und weist dadurch einen prinzipiell verhältnismäßig breiten potenziellen Anwendungsbereich auf. AGOGUÉ UND KAZAKÇI (2014, S. 230–231) nennen verschiedene Arbeiten zur C-K-Theorie mit Bezug zu Unternehmensprojekten. Diese scheinen häufig allerdings eher beispielhaft zu sein und eine starke Verbreitung der Theorie scheint derzeit nicht beobachtbar zu sein. Eine ähnliche Co-Evolution zweier Räume findet sich im Co-Evolution-Modell nach DORST UND CROSS (2001). Dort handelt es sich um Lösungs- und Problemraum (Dorst & Cross, 2001 nach Hay et al., 2017, S. 14).

Die Wiederverwendung von bereits vorhandenem Wissen in neuen Projekten kann als Teil der beschriebenen Co-Evolution der Räume der C-K-Theorie betrachtet werden und ist Gegenstand des „Design Reuse“. Dieser ist ein Teil des Design Function Deployment-Frameworks und wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

### 2.4.2 Design Reuse

Design Reuse stammt als Forschungsthema ursprünglich aus der Informatik und der Software-Entwicklung (Sivaloganathan & Shahin, 1999, S. 643). ALBLAS UND JAYARAM (2015) beschreiben Design Reuse zusammengefasst als „the process of using previous design artifacts in future designs“ (Alblas & Jayaram, 2015, S. 6823). Als Ansatz für eine formalisierte Beschreibung des Phänomens entwickeln DUFFY, DUFFY UND MACCALLUM (1995) das Design Reuse Model in Abbildung 2.17.

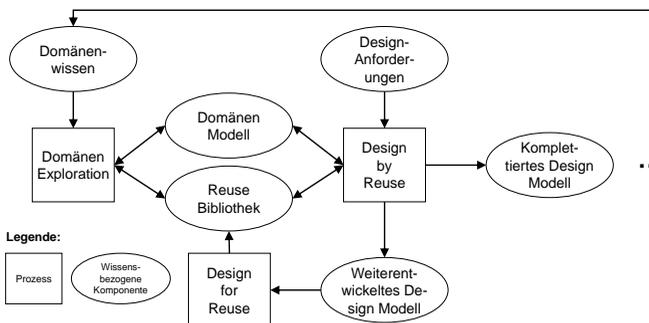


Abbildung 2.17: Design Reuse Model, nach DUFFY ET AL. (1995, S. 490), übersetzt.

Design by Reuse ist dabei definiert als „the process in which knowledge resources are searched so that useful knowledge can be identified, retrieved and applied to the new design problem.“ (Duffy et al., 1995, S. 493).

Die Entwicklung neuer Produkte durch die Kombination aus der Wiederverwendung eines Produktkerns („Core“) und neuen Elementen, um ausgehend von bereits bedienten Marktsegmenten benachbarte Segmente zu erschließen, bezeichnen KING UND SIVALOGANATHAN (1998) als Flexible Design. Das Flexible Design Model in Abbildung 2.18 mit dem zugehörigen Prozess nennt explizit ein bestehendes Produkt als Ausgangspunkt.

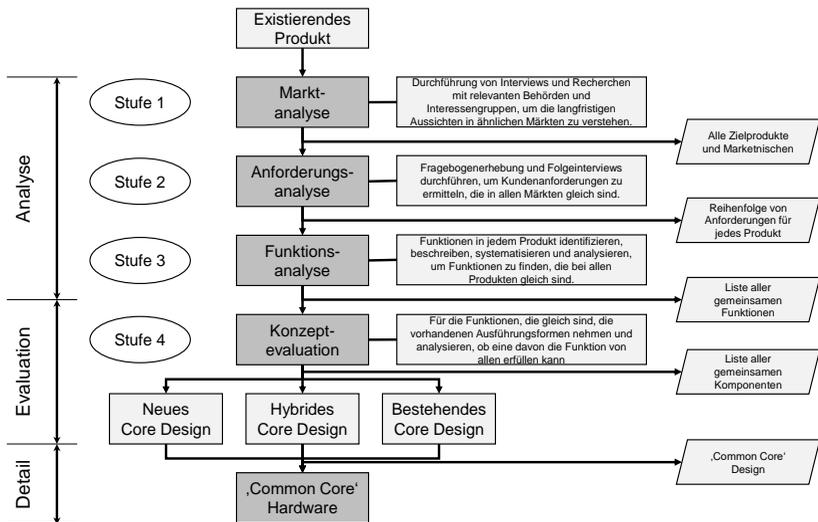


Abbildung 2.18: Flexible Design Model (King & Sivaloganathan, 1998), Darstellung nach SIVALOGANATHAN UND SHAHIN (1999, S. 644).

Design Reuse ist ebenfalls ein wichtiges Element des Design Function Deployment (DFD) nach SIVALOGANATHAN, EVBUOMWAN, JEBB UND WYNN (1995) Ziel ist es, ein Computer-basiertes Design System bereit zu stellen, das gegebene informationstechnologische Möglichkeiten zum Umgang mit generiertem Design-Wissen möglichst gut nutzt (Sivaloganathan et al., 1995, S. 458). Dabei werden Elemente des Quality Function Deployment (QFD, s. Abschnitt 2.5.1.3), von bestehenden Design-

Modellen, -Methoden und -Systemen sowie des Concurrent Engineering adaptiert (Sivaloganathan et al., 1995, S. 469). Das Konzept des DFD umfasst dabei die folgenden Elemente (Sivaloganathan et al., 1995, S. 458):

- Ein Vorgehensmodell mit 5 Stadien, gleichzeitig die erste Ebene einer Struktur mit 3 Ebenen
- Einer Struktur zur Speicherung textueller und geometrischer Daten, die im Zuge eines Design-Prozesses generiert werden
- Einer erweiterbaren Liste an Design-Methoden
- Eine Sammlung an Datenbasen, Regelwerken und Wissensbasen in der dritten Ebene der Struktur, die durch Programme in der zweiten Ebene der DFD-Struktur genutzt werden können

Bestehendes Design-Wissen, auf das das DFD aufbaut und das im Rahmen dessen genutzt und auch mit neuen Elementen kombiniert werden kann, wird wie in Abbildung 2.19 gezeigt eingeteilt.

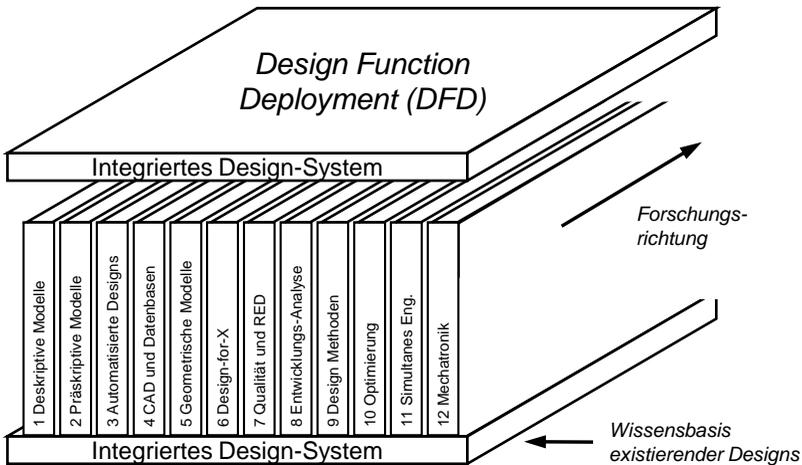


Abbildung 2.19: Einteilung bestehenden Wissens in Wissensgebiete, auf die das Design Function Deployment als Design System zugreift (Sivaloganathan et al., 1995, S. 469).

Insgesamt kann DFD vor allem als konzeptionelles Rahmenwerk betrachtet werden. In Bezug auf Design Reuse stellen SIVALOGANATHAN UND SHAHIN (1999) fest, dass die Elemente, die Design Reuse konstituieren, nach wie vor wenig formalisiert sind (Sivaloganathan & Shahin, 1999, S. 644). Im Vordergrund stehen Methoden, Prozesse und Tools, die die Wiederverwendung von Wissen ermöglichen und unterstützen sollen. In diesem Zusammenhang werden unter anderem Ansätze des Case Based Reasoning (CBR) und des Model Based Reasoning (MBR) unterschieden. CBR zielt darauf ab, bereits existierende Designlösungen direkt zur Wiederverwendung in oder als Startpunkt für neue Lösungen bereitzustellen, während MBR darauf abzielt, ausgehend von vorhandenen Design-Lösungen generalisierte und damit abstraktere Wissensmodelle als bei CBR als Grundlage für künftige Designlösungen bereitzustellen (Duffy, Smith & Duffy, 1998, S. 46–47).

Die Wiederverwendung von Wissen und die Anwendbarkeit darauf abzielender Ansätze kann projektspezifisch sehr unterschiedlich sein. BAXTER ET AL. (2007) unterscheiden beispielsweise die in Abbildung 2.20 gezeigten Situationen.

<b>Produktkomplexität</b>	Hoch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessmanagement anhand allgemeiner Prozessvorlagen</li> <li>• Begrenzte Wiederverwendung von Wissen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzen durch Indexierung von unstrukturiertem Wissen</li> <li>• Prozessmanagement durch produktspezifische Vorlagen</li> </ul>
	Moderat bis gering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringste Anwendbarkeit und geringster Nutzen. Ansatz kann eventuell genutzt werden, um eine allgemeine Prozessvorlage zu entwickeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höchste Anwendbarkeit. Nutzen durch domänenspezifische Prozessvorlagen und Management von strukturiertem und unstrukturiertem Wissen</li> </ul>
		Gering	Groß

**Produktähnlichkeit (direkte Wiederverwendung)**

Abbildung 2.20: Unterscheidung verschiedener Entwicklungssituationen bei der Einschätzung der Anwendbarkeit eines Ansatzes zur Unterstützung von Design Reuse, Darstellung nach BAXTER ET AL. (2007, S. 44).

Design Reuse wird von ALBLAS UND JAYARAM (2015) als eine von vier Facetten von Flexibilität identifiziert, die in Unternehmen zur Robustheit von Innovationsprojekten in der Frühen Phase beitragen. Dieser Aspekt ist auch im ASD-Framework aus Abschnitt 2.3.3 abgebildet in Form des Prinzips, dass jede Entwicklung auf Basis von

Referenzen erfolgt. Weitere Facetten sind iteratives Lernen, Modularität und Engineering Change Management (Alblas & Jayaram, 2015, S. 6823). Das Zusammenspiel dieser Elemente ist in Abbildung 2.21 dargestellt.

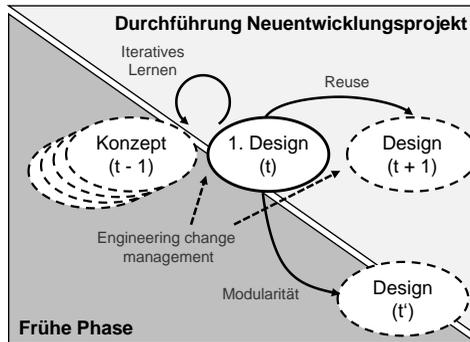


Abbildung 2.21: Vier Facetten von Flexibilität und deren Wechselspiel als Grundlage für die Robustheit von Innovationsprojekten in der Frühen Phase: Iteratives Lernen, Design Reuse, Engineering Change Management und Modularität. Die Zeitpunkte „t-1“, „t“ und „t+1“ sind als Entwicklungsschritte eines Systems zu verstehen, das „Design“ zum Zeitpunkt „t“ beispielsweise als eine andere Systemvariante. „Konzept“ und „Design“ sind dabei nicht trennscharf voneinander abgegrenzt. „Design“ meint jedoch stärker die konkrete Verkörperung des Systems, „Konzept“ den Entwurf. Darstellung nach ALBLAS UND JAYARAM (2015, S. 6832).

Modularität wurde bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Auf Engineering Change bzw. Engineering Change Management wird in Abschnitt 2.5.3.2 näher eingegangen, auf Iterationen in Abschnitt 2.4.6.

Die Weitergabe von Wissen von einem Produkt auf nachfolgende ist auch Gegenstand der autogenetischen Konstruktionstheorie und des Konzepts der Technischen Vererbung, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

### 2.4.3 Autogenetische Konstruktionstheorie und Technische Vererbung

Durch die autogenetischen Konstruktionstheorie nach VAJNA UND WEGNER (1997) und VAJNA, CLEMENT, JORDAN UND BERCEY (2005) soll durch „methodische orientierte Analogiebetrachtungen unter Einbeziehung der Gesetzmäßigkeiten der biologischen Evolution“ (Vajna & Wegner, 1997, S. 116) ein Zugang eröffnet werden, Evolutionsstrategien und genetische Algorithmen auf Entwicklungsprobleme anzuwenden. Damit soll der zunehmenden Komplexität der zu entwickelnden Systeme in Folge steigender Anforderungen begegnet werden können. (Vajna & Wegner, 1997, S. 116)

Das generelle Ablaufschema der Theorie<sup>8</sup> ist in Abbildung 2.22 dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Evolution eines Systems während seines Entwicklungsprozesses (Vajna et al., 2005, S. 423). Verschiedene Objekte aus der Entwicklung früherer Systeme können dabei als Startpunkt dienen.

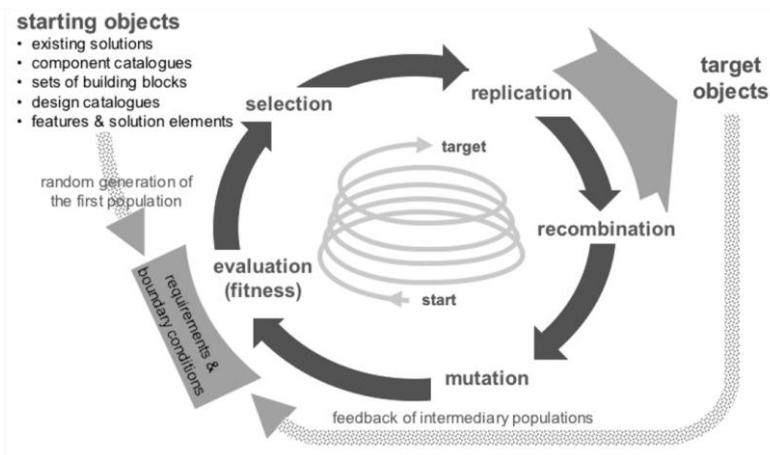


Abbildung 2.22: Generelles Ablaufschema der autogenetischen Konstruktionstheorie (Vajna et al., 2005, S. 434 auf Basis von Wegner, 1999).

<sup>8</sup> Entsprechend der Anmerkung in der Einführung von Abschnitt 2.4 liegt dieser Einordnung hier ausschließlich die Eigenbezeichnung zu Grunde.

Ebenfalls auf einer Analogiebildung zwischen Natur und technischen Systemen beruht das Konzept der technischen Vererbung nach LACHMAYER (Lachmayer et al., 2014) (Lachmayer et al., 2014; Mozgova, Lachmayer & Gottwald, 2015). Mit diesem Konzept soll beschrieben werden, wie Komponenten, wie in Abbildung 2.23 zu sehen, Informationen aus Entwicklung, Herstellung und Nutzung in die nächste Generation übertragen.

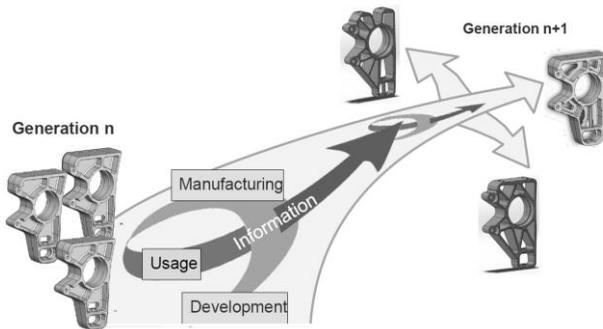


Abbildung 2.23: Informationsfluss bei der technischen Vererbung (Mozgova et al., 2015, S. 5).

Zur Realisierung der technischen Vererbung müssen Komponenten Informationen aufnehmen können. Solche Komponenten werden mit dem Kunstwort „gentelligent“ beschrieben und waren Gegenstand des Sonderforschungsbereichs 653 (Denkena & Mörke, 2017). Im Zuge der Analogiebildung werden Elemente der natürlichen Evolution für die technische Vererbung wie in Tabelle 1 definiert.

Tabelle 1: Definition von Elementen der natürlichen Evolution für das Konzept der technischen Vererbung im Zuge der Analogiebildung (Mozgova et al., 2015, S. 5–6), übersetzt.

Element	Definition
Technische Evolution	Technische Evolution ist ein Prozess der Steuerung, schrittweisen und kontinuierlichen Veränderung von technischen Systemen, Produkten und Prozessen sowie von Modellen mit dem Ziel der Anpassung an Einflüsse und Anforderungen.
Individuum	Das Individuum ist das kleinste betrachtete technische System, Produkt, Prozess oder Modell in einer Population.
Generation	Die Generation ist eine Gruppe von Individuen mit gleichem Entwicklungsstand.
Population	Die Population besteht aus allen Generationen von Individuen eines technischen Systems, Produkts und Prozesses sowie eines Modells zum aktuellen Zeitpunkt.
Technische Vererbung	Technische Vererbung ist die Übertragung der gesammelten und verifizierten Informationen von der Produktion und Anwendung <sup>9</sup> auf die nächste Produktgeneration.
Selektion	Auswahlprozess basierend auf mehreren Kriterien eines Anforderungsprofils.
Mutation	Ein Prozess mit gezieltem oder nicht gezieltem Charakter zur Erzeugung von Varianten mit daraus resultierenden veränderten Eigenschaften.

Veränderungen an Systemen wie hier durch den Prozess der Mutation beschrieben, deren Gründe und Auswirkungen werden ebenfalls im Forschungsgebiet des Engineering Change untersucht, das im nächsten Abschnitt eingeführt wird.

#### 2.4.4 Engineering Change (Technische Änderungen)

In der Literatur sind verschiedene Definitionen für „Engineering Change“ (EC) zu finden. Ausgehend von einer Zusammenstellung mehrerer bestehender Definitio-

---

<sup>9</sup> Die Entwicklung wird hier im Original nicht genannt, jedoch, wie in Abbildung 2.23 zu sehen, mit betrachtet

nen definieren HAMRAZ ET AL. (2013) ECs als “changes and/or modifications to released structure (fits, forms and dimensions, surfaces, materials etc.), behavior (stability, strength, corrosion etc.), function (speed, performance, efficiency, etc.), or the relations between functions and behavior (design principles), or behavior and structure (physical laws) of a technical artefact” (Hamraz et al., 2013, S. 475). Einschränkend wird beispielsweise bei LANGER, WILBERG, MAIER UND LINDEMANN (2012) bezugnehmend auf JARRATT, ECKERT, CALDWELL UND CLARKSON (2011) definiert, dass es sich um Änderungen an Artefakten handelt, die bereits im Entwicklungsprozess freigegeben wurden (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 5). Einen Überblick über verschiedene Definitionen geben HAMRAZ ET AL. (2013). Der von den verschiedenen Definitionen erfasste Bereich des Produktlebenszyklus sowie des möglichen EC-Spektrums ist in Abbildung 2.24 dargestellt.

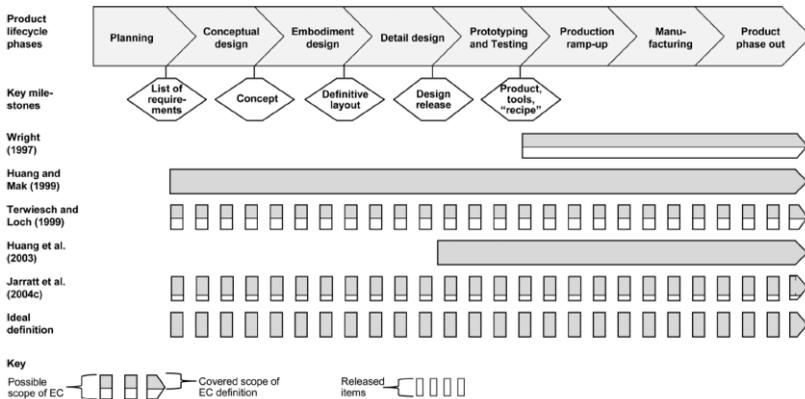


Abbildung 2.24: Übersicht über den Geltungsbereich verschiedener Definitionen von „Engineering Change“ (Hamraz et al., 2013, S. 475). Bezüge zu bestehenden Systemen oder Artefakten in der Planung – sofern vorhanden – werden gemäß der Einordnung von keiner Definition erfasst.

Es fällt auf, dass entsprechend der Einordnung Bezüge zu bestehenden Systemen oder Artefakten in der Planungsphase – sofern vorhanden – nicht erfasst werden. Weitere Bezeichnungen für EC, Technische Änderungen und die zugehörigen Prozesse in Literatur und Praxis sind Änderungswesen, Prototypänderung, Engineering design change, product change, design change, change, engineering change order,

simultaneous engineering amendment oder prototype alteration (Hamraz et al., 2013, S. 474; Jarratt et al., 2011, S. 106; Langer, Wilberg et al., 2012, S. 5 weiterführende Verweise s. dort). Der mögliche Umfang eines EC kann sehr unterschiedlich sein, von kleinen Detailänderungen, die in kurzer Zeit erledigt sind, bis hin zu Änderungen, die mehrere Monate oder Jahre an Arbeit erfordern (Jarratt et al., 2011, S. 105).

Zur besseren Beschreibung gibt es daher verschiedene Ansätze, EC weiter zu klassifizieren. Diese nehmen beispielsweise auf den Zweck oder Ursprung einer Änderung Bezug, deren Dringlichkeit oder dem Zeitpunkt des Auftretens im Produktlebenszyklus (Jarratt et al., 2011, S. 110). So können z.B. direkte Komponentenänderungen als „native“ EC, dadurch und somit indirekt ausgelöste EC als „propagated“ eingeteilt werden (Colombo, Cascini & Weck, 2015, S. 3). KISSEL UND LINDEMANN (2013) unterscheiden danach, ob eine Änderung aus einem bereits vorliegenden Grund heraus vorgenommen wird oder eher ein künftig zu erwartender Anlass proaktiv antizipiert wird, zwischen proaktiven und reaktiven Änderungen. Je nachdem, wie viele und wie große Teile eines Systems betroffen sind, kann auch zwischen lokalen EC und Schnittstellen-übergreifenden EC unterschieden werden (Lindemann, Kleedörfer & Gerst, 1998 nach Jarratt et al., 2011, S. 114). Weitere Ansätze orientieren sich auch an den Auswirkungen als Kriterium (s. Abschnitt 2.5.3.2), wobei dies das Problem mit sich bringt, dass eine Klassifizierung der Änderung dann nicht a priori, sondern erst durch eine Untersuchung der möglichen Auswirkungen möglich ist. Ähnlich ist die Unterscheidung von ECKERT, ZANKER UND CLARKSON (2001) in emergente EC, denen Probleme im Entwicklungsprozess zu Grunde liegen und initiierte EC, die durch Kundenwünsche ausgelöst werden (Eckert et al., 2001, S. 147).

Als weiterer Ansatz können die verschiedenen Moden von Design Änderungen nach MCMAHON (1994) in Tabelle 2 gesehen werden.

Tabelle 2: Moden von Design Änderungen nach McMahon (1994), Darstellung Hamraz et al. (2013, S. 475).

McMahon's modes of design change	Product domain
<b>1. Parameter space exploration.</b> Variation of explicit attributes within the limits imposed by feasible explicit attribute set.	Structure
<b>2. Improved understanding of explicit-implicit attribute relationships.</b> Exploiting an improved understanding of the relationships relating implicit to explicit values through improved analytical techniques, modelling or mathematical methods, experiments etc.	Structure-behaviour relation (physical laws)
<b>3. Change in product design specification.</b> 3i. Change in the specified values of implicit or explicit attributes or external factors that the design must meet. 3ii. Change in utility function for the design, e.g. emphasis in automotive design from performance to economy. 3iii. Extension of the set of functional requirements that the design has to meet.	Behaviour Function Function
<b>4. Modifying the feasible design space.</b> Development of the design due to change of explicit attribute space as a result of innovation e.g. by manufacturing process improvement such as reduction of minimum wall thickness for a casting.	Structure
<b>5. Changing the design principle.</b> Adoption of an alternative design principle with different design space.	Behaviour-function-relation (design principles)

Trotz des prinzipiell durch das Begriffsverständnis zugelassenen großen Umfangs eines EC kann beobachtet werden, dass unter EC nicht jegliche Entwicklungsaktivität erfasst oder verstanden wird. So findet eine Differenzierung gegenüber Neuentwicklungsprojekten statt (zum Beispiel bei Jarratt et al., 2011, S. 103) und es werden nur Teile aller Forschungs- und Entwicklungskapazitäten von Unternehmen der Bearbeitung von EC zugerechnet (Langer, Maier, Wilberg, Münch & Lindemann, 2012).

Ein Charakteristikum von EC gegenüber Iterationen ist, dass Entwickelnde bei letzterem nicht annehmen, dass das jeweilige Artefakt fertig ist ((Wynn, Eckert & Clarkson, 2007) nach (Jarratt et al., 2011, S. 104)).

JARRATT ET AL. (2011) charakterisieren EC darüber hinaus als Aktivität (Jarratt et al., 2011, S. 104). Damit ähnelt EC den Variationsarten im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS im nächsten Abschnitt. Dort wird jedoch darauf abgezielt, nicht nur Aktivitäten zu erfassen, die der Veränderung bestehender Systeme im Zuge der Entwicklung eines neuen Systems dienen. Es werden auch Aktivitäten erfasst, die der Beibehaltung von Elementen dienen.

Anhand der bisher dargestellten Konzepte ist zu erkennen, dass die Relation zwischen bestehenden Systemen und zu entwickelnden Systemen mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden betrachtet werden kann. Während die C-K-Theorie ein verhältnismäßig abstraktes Konzept ist, bezieht sich beispielsweise das Konzept der technischen Änderungen spezifisch auf Artefakte des Entwicklungsprozesses. Die Darstellung verschiedener Abstraktionsgrade in einem einzelnen Ansatz wird im Modell der PGE im nächsten Abschnitt durch den Bezug, vor allem zum hierarchischen und strukturalen Konzept der Systemtheorie der Technik aus Abschnitt 2.2.1 adressiert.

Weiter ist zu beobachten, dass in den bisher dargestellten Konzepten unterschiedliche Umfänge von Neuem oder Veränderterem beschrieben werden. Wird diese Variabilität in einem einzelnen Element eines Beschreibungskonzeptes abgebildet, wie beispielsweise bei der technischen Änderung, führt dies dazu, dass dieses Element selbst sehr unterschiedlich ausgeprägt und dadurch schwer greifbar sein kann. Auch dieser Aspekt wird im Modell der PGE durch den Bezug auf die Systemtheorie adressiert.

#### **2.4.5 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung**

ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) schlägt das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ausgehend von der Erkenntnis vor, dass bestehende Ansätze wie beispielsweise die Einteilung von Entwicklungsprojekten in Konstruktionsarten nach PAHL UND BEITZ (Feldhusen & Grote, 2013) die breite Spanne an Neuentwicklungsanteilen in realen Entwicklungsprojekten nicht abbilden können (s. Abbildung 2.25).

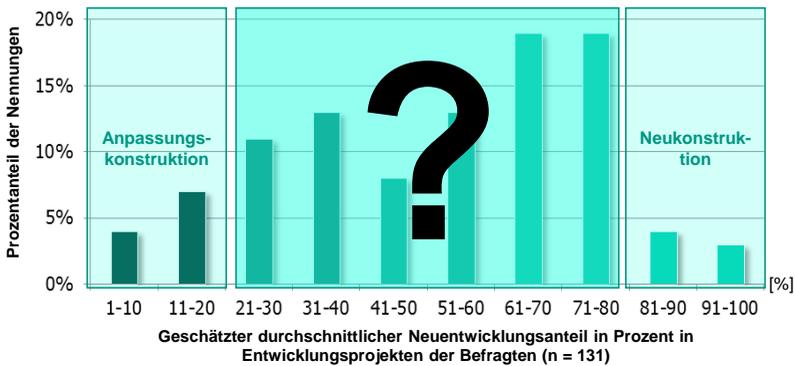


Abbildung 2.25: Spannweite an Neuentwicklungsanteilen in realen Entwicklungsprojekten und ungefähre Zuordnung zu Konstruktionsarten. Ein großer Anteil der Nennungen kann so nicht erfasst werden. (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015), Darstellung nach Vortrag zu ALBERS, BURSAC UND WINTERGERST (2015) und ALBERS, BURSAC UND RAPP (2016).

Ansätze, die auf dem Element der Innovation aufbauen (s. Abschnitt 2.1), sind ebenso wenig geeignet als Basis zur präskriptiven Entwicklungsunterstützung, da bei Projekten der wirtschaftliche Erfolg, der eine Innovation auszeichnet, stets erst retrospektiv beurteilt werden kann (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 3). Im Modell der PGE wird die Entstehung neuer Produkte mit 2 Grundhypothesen beschrieben (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 4–5):

- Jede Entwicklung basiert auf Referenzen. Dabei kann es sich unter anderem um Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte, aber beispielsweise auch Forschungsergebnisse handeln. Die Referenzen geben die Struktur und Gestalt des neuen Systems vor oder dienen als Ausgangspunkt für deren Entwicklung. Eine konkretisierte Beschreibung der Rolle von Referenzen bei der Entwicklung neuer Systeme erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Abschnitt 5.2.2.2 mit dem Modellelement Referenzsystem.
- Die Teilsysteme eines neuen Systems werden davon ausgehend durch die Aktivitäten Übernahme-, Gestalt- oder Prinzipvariation entwickelt.

Diese Grundhypothesen sind in Abbildung 2.26 beispielhaft dargestellt.

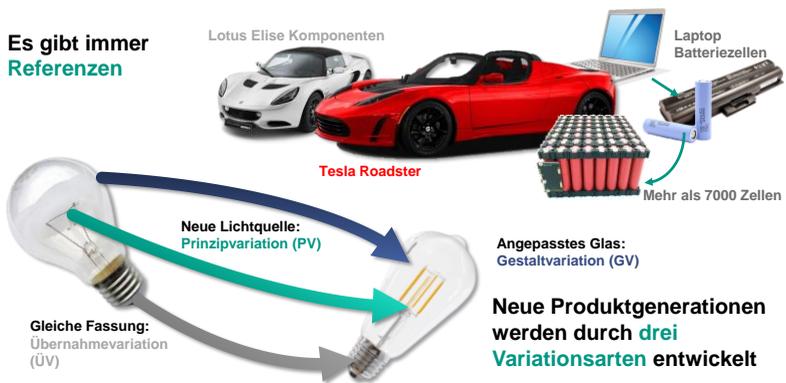


Abbildung 2.26: Beispielhafte Darstellung der zwei Grundhypothesen des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015), Darstellung basierend auf BURSAC (2016a).

Neue Produktgenerationen können unter anderem anhand von Projektbezeichnungen oder Markteinführungsterminen identifiziert und voneinander abgegrenzt werden (Albers, Haug et al., 2016, S. 234). Auch Varianten eines Produkts können als Produktgenerationen beschrieben werden (Peglow, Powelske, Birk, Albers & Bursac, 2017).

Zur Beschreibung und Strukturierung der Zusammenhänge verschiedener Produktvarianten in variantenreichen Produktportfolios definieren PEGLOW ET AL. (2017) Basis- und Variantenreferenzprodukt. Dabei handelt es sich gewissermaßen um bestimmte Rollen ausgewählter Produkte als Referenzen zur Entwicklung von Produktvarianten.

Verwendete Referenzen können weiter danach unterschieden werden, ob sie aus dem Unternehmen selbst stammen, also unternehmensintern sind, oder unternehmensextern (Albers, Haug et al., 2016, S. 236).

Die durch das Modell der PGE beschriebenen Phänomene lassen sich nicht nur in der Relation von bestehenden Systemen und einem in der Entwicklung befindlichen System beobachten, sondern auch in der Beziehung zwischen aufeinanderfolgenden Entwicklungssinkrementen innerhalb der Entwicklung eines Systems. Die ent-

sprechenden Inkremente können daher auch als Entwicklungsgenerationen aufgefasst und mit demselben Modell beschrieben werden (Albers, Bursac & Rapp, 2016, S. 799). Abbildung 2.27 zeigt für mehrere Entwicklungsgenerationen einer Fahrzeugentwicklung den Prozentsatz an Teilsystemen, die jeweils durch eine bestimmte Variationsart entwickelt wurden.

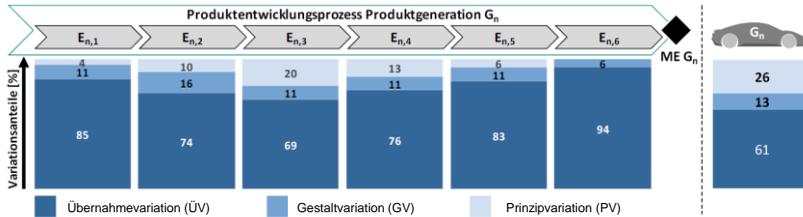


Abbildung 2.27: Prozentualer Anteil an Teilsystemen, die durch eine bestimmte Variationsart mehreren Entwicklungsgenerationen einer Fahrzeugentwicklung entwickelt wurden (Albers, Haug, Heitger, Fahl & Hirschter, 2019, S. 6).

Der in Abbildung 2.27 gezeigten Berechnung von Variationsanteilen liegt eine mathematische Beschreibung einer neuen Produktgeneration als Menge aus Teilsystemen zu Grunde, die durch die drei Variationsarten entwickelt werden. Dies kann wie folgt formuliert werden (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 5):

$$G_n = \dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n \quad 1$$

mit

$G_n$ : Aktuell in der Entwicklung befindliche Produktgeneration die am nächsten zum Markteintritt ist als Vereinigung dreier Mengen an Teilsystemen:

$\dot{U}S_n$ : Menge der Teilsysteme von  $G_n$ , die durch Übernahmevariation entwickelt werden

$GS_n$ : Menge der Teilsysteme von  $G_n$ , die durch Gestaltvariation entwickelt werden

$PS_n$ : Menge der Teilsysteme von  $G_n$ , die durch Prinzipvariation entwickelt werden

Durch Abzählen der Elementmengen können Variationsanteile berechnet werden als Anteil derjenigen Teilsysteme, die durch eine bestimmte Variationsart entwickelt werden, an der Gesamtmenge an Teilsystemen. So gilt für den Prinzipvariationsanteil  $\delta_{pV}$ :

$$\delta_{pV} = \frac{|PS_n|}{|G_n|} \quad 2$$

Gestalt- und Übernahmevariationsanteil ( $\delta_{GV}$  bzw.  $\delta_{GV}$ ) berechnen sich analog. Mit einer erweiterten Nomenklatur können für Produkt- und Entwicklungsgenerationen beispielsweise auch Informationen zur Produktlinie, Variantenbezeichnung oder zu bestimmten Kunden oder Anwendern erfasst werden (Albers, Fahl et al., 2020, S. 7):

Nomenklatur-Schema für Produktgenerationen:

$$G_{\{\text{Nummer der Produktgeneration}\}}^{\{\text{Produktlinie, Variante, Kunde, Anwender, ...}\}} \quad 3$$

Nomenklatur-Schema für Entwicklungsgenerationen:

$$E_{\{\text{Nummer der zugehörigen Produktgeneration, Nummer der Entwicklungsgeneration}\}}^{\{\text{Produktlinie, Variante, Kunde, Anwender, ...}\}} \quad 4$$

Eine Definition einer Produktlinie geben dabei FAHL, HIRSCHTER, KAMP, ENDL UND ALBERS (2019).

Durch die Beschreibung von Produkt- und Entwicklungsgenerationen mit denselben Modellelementen bildet das Modell der PGE Iterationen auf unterschiedlichen Ebenen durch eine gemeinsame Modellbildung ab. Ein Überblick über weitere Ansätze zur Beschreibung von Iterationen wird im nächsten Abschnitt gegeben.

## 2.4.6 Iterationen

Zu Iterationen gibt es in der Forschung eine heterogene Terminologie (Wynn & Eckert, 2017, S. 154). SAFOUTIN UND SMITH unterscheiden Iterationen auf 3 verschiedenen Skalen (Safoutin & Smith, 1996, S. 565–566). Mikro-skalige Iterationen finden sich zum Beispiel bei iterativen mathematischen Verfahren. Makro-skalige Iterationen sind Iterationen, die sich über mehrere Entwicklungsprojekte hinweg er-

strecken. Meso-skalige Iterationen bewegen sich zwischen den zwei zuvor genannten. Ein Beispiel kann hier der iterative Entwurf und anschließende Test von Prototypen sein. Die C-K-Theorie aus Abschnitt 2.4.1 wird von WYNN UND ECKERT (2017) als Modell für mikro-skalige Iterationen betrachtet. Auf verschiedenen Skalen können Engineering Changes wie in Abschnitt 2.4.4 beschrieben liegen (Wynn & Eckert, 2017, S. 160).

Ein Beispiel für eine weitere Iterationstaxonomie, die im Sinne der oben angeführten Charakterisierung von Iterationen auch makro-skalige Iterationen beinhalten kann, geben Fairley und Willshire (2005, S. 37) für den Software-Bereich. Dabei liegt der Fokus darauf, inwieweit die in einer Iteration geleistete Arbeit eventuell vermeidbar gewesen wäre.

WYNN UND ECKERT (2017) schlagen auf Basis einer Literaturanalyse eine Taxonomie für Iterationen vor, die solche Iterationen näher betrachtet, die innerhalb eines Entwicklungsprojekts stattfinden. In der Taxonomie werden verschiedene Beschreibungen von Iterationen in der Literatur entlang dreier Dimensionen, die sich aus beobachteten Funktionen von Iterationen ergeben. Diese können als Weiterentwicklung („progress“), Fehlerbehebung („correct“) und Koordination („coordinate“) verstanden werden (Wynn & Eckert, 2017, S. 166). Abbildung 2.28 zeigt als Beispiel in der Taxonomie unterschiedene Stereotype progressiver Iterationen.

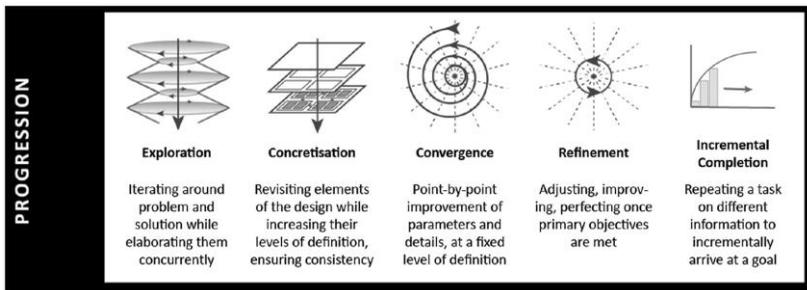


Abbildung 2.28: Stereotype progressiver Iterationen (Wynn & Eckert, 2017, S. 167).

Mitunter werden Iterationen anhand ihrer möglichen Auswirkungen klassifiziert (Wynn & Eckert, 2017, S. 165). Eine solche Klassifizierung bringt jedoch, ähnlich wie bei Engineering Changes, den Nachteil mit sich, dass zunächst eine Beurteilung möglicher Auswirkungen erfolgen muss und auf diese nicht durch die Klassifikation selbst a priori geschlossen werden kann.

WYNN UND ECKERT merken weiterhin an, dass viele Arbeiten, die Iterationen zum Gegenstand haben, sich nicht explizit auf das Konzept der Iteration beziehen (Wynn & Eckert, 2017, S. 154). Diese Beobachtung kann grundsätzlich in Bezug auf die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen gemacht werden. Im nächsten Abschnitt wird eine Auswahl an Ansätzen vorgestellt, die Beziehungen von zu entwickelnden Systemen zu bestehenden Systemen implizit nutzen oder voraussetzen.

#### **2.4.7 Ansätze, die Beziehungen zu bestehenden Systemen implizit nutzen oder voraussetzen**

Es existieren verschiedene Ansätze in der entwicklungsmethodischen Forschung, die Beziehungen zwischen bestehenden Systemen und zu entwickelnden Systemen implizit nutzen oder voraussetzen. Eine Auswahl wird hier vorgestellt. Bei den Ansätzen können unterschiedlichen originäre Zielsetzungen betrachtet werden, beispielsweise die Bereitstellung einzelner Methoden oder die Erklärung ausgewählter Beobachtungen.

Letzteres ist das Ziel von HENDERSON UND CLARK (1990), die untersuchen, unter welchen Bedingungen Entwicklungsprojekte Unternehmen vor Herausforderungen stellen, die diese leicht unterschätzen. Dafür unterscheiden sie je nachdem wie sehr sich gegenüber bestehenden Systemen einerseits Komponenten und andererseits deren Verknüpfungen ändern, vier Arten von Innovationen<sup>10</sup>. Allerdings bleiben die Kriterien zur Abgrenzung im Detail unscharf.

WHEELWRIGHT UND CLARK (1992) klassifizieren Entwicklungsprojekte anhand der zu erwartenden Änderungen zum einen am Produkt selbst, zum anderen an der zugehörigen Produktionstechnologie. Es ergeben sich daraus insgesamt 5 Projektkategorien, wobei die Einordnung eines Projekts letztlich in einem beschriebenen Beispiel vor allem durch eine Expertendiskussion erfolgt.

ANDREASEN unterscheidet in seinem Buch zu Conceptual Design 3 Arten von Entwicklungssituationen: Neue Produkte, inkrementelles Design und plattformbasiertes Design (Andreasen, Hansen & Cash, 2015, S. 238).

Ausgehend von letztgenanntem sind Zusammenhänge über mehrere Produktgenerationen hinweg auch mindestens implizit Gegenstand von Ansätzen aus den Bereichen Baukastenentwicklung und Variantenmanagement (s. z.B. Fricke & Schulz, 2005; Hooshmand, Köhler & Korff-Krumm, 2014; Otto et al., 2016, S. 8).

HOUDEK (2003) weist auf die Bedeutung existierender Produkte im Anforderungs-

---

<sup>10</sup> Wobei die dortige Begriffsverwendung von Innovation gegenüber dem in Abschnitt 2.1 dargelegten Verständnis eher dem der Invention entspricht.

management hin. Auch bei Modellen, wie beispielsweise dem Münchner Produkt-konkretisierungsmodell, die den Konstruktionsprozess als Konkretisierung über verschiedene Ebenen und Variation innerhalb dieser verschiedenen Ebenen beschreiben (Ponn & Lindemann, 2005), kann mindestens implizit ein Bezug zwischen aufeinander aufbauenden Produktinkrementen erkannt werden.

Gleiches gilt für viele Ansätze, die dem Gebiet des Wissensmanagements zugeordnet werden können (s. auch Abschnitt 2.7). Hierzu können auch integrierte Prozess- und Produktmodelle gezählt werden (ein Überblick hierzu findet sich bei Eckert et al., 2017).

Insgesamt sind in den in diesem Teilkapitel vorgestellten Konzepten verschiedene Facetten bei der Beschreibung der Relation zwischen Referenzen und zu entwickelnden Systemen zu erkennen. Dies ist zum einen die Betrachtung mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden gemäß der Systemtheorie der Technik. Zum anderen ist dies die Darstellung eines zu entwickelnden Systems als Kombination von Elementen, die aus Referenzen übernommen wurden oder gegenüber diesen verändert, neu hinzugefügt oder entfernt wurden. Weiterhin können Referenzen näher charakterisiert werden, beispielsweise hinsichtlich ihrer Herkunft. Diese verschiedenen Facetten sind nach Möglichkeit in einem Konzept zur Beschreibung der Relation zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen zu bündeln. Sie werden in den zuvor vorgestellten Ansätzen jedoch in unterschiedlichem Umfang berücksichtigt. Eine Potenzialanalyse der vorgestellten Ansätze in dieser Hinsicht erfolgt in Abschnitt 2.8.

Für ein Beschreibungskonzept ist außerdem eine ausreichende Formalisierung der verwendeten Modellelemente von Bedeutung. Dieser Aspekt wird in der vorliegenden Arbeit aufbauend auf dem Modell der PGE in Kapitel 5 adressiert.

Bedeutung haben Relationen zwischen Referenzen und zu entwickelnden Systemen auch für die Zieldefinition sowie die Risikoabschätzung im Zuge der Entwicklung eines neuen Systems. Im nächsten Abschnitt werden derartige Ansätze näher betrachtet.

## **2.5 Entwicklungsziele, Lösungsrichtungen und Risiken auf Basis von Referenzen**

In der Entwicklung neuer Systeme werden sowohl Ziele, als auch Lösungsansätze zu deren Realisierung und damit einhergehende Risiken mitunter in Relation zu bestehenden Systemen beschrieben. In allen diesen Bereichen ist im Stand der Forschung in unterschiedlichem Umfang Bezug zu den im vorigen Abschnitt dargestellten Modellen zu finden. Neben expliziten Bezügen und Untersuchungen, die auf den

Modellen und Konzepten des vorigen Abschnitts aufbauen, gibt es verschiedene Ansätze, denen die Betrachtung einer Relation zu bestehenden Systemen zu Grunde liegt, ohne dass diese jedoch durch ein formales Konzept beschrieben ist. Ansätze beider Art werden nachfolgend vorgestellt für die Beschreibung und Definition von Zielen in der Entwicklung eines neuen Systems (Abschnitt 2.5.1), die Ableitung von Lösungsideen zur Realisierung dieser Ziele (Abschnitt 2.5.2) und die Identifikation und Einschätzung von Risiken (Abschnitt 2.5.3). Dabei handelt es sich auch in unterschiedlichem Umfang um die Darstellung von Beobachtungen einerseits sowie methodische Ansätze zur Entwicklungsunterstützung andererseits.

### **2.5.1 Beschreibung und Definition von Zielen in Relation zu Referenzen**

Potenzial für Innovationen kann sich initial sowohl durch Marktbedarf (Market Pull) als auch durch technologische Möglichkeiten (Technology Push) ergeben (Albers & Gausemeier, 2012, S. 23). Die Zieldefinition für die Entwicklung neuer Systeme setzt daher sowohl auf Technologie-Roadmapping auf (Arslan, Haug, Heitger, Kraemer & Albers, 2016, S. 2) als auch der strategischen Produktplanung. Dort werden unter anderem Produktszenarien entwickelt (genauer Marktleistungsszenarien), die „mögliche Angebote (beschreiben), die ein Unternehmen priorisieren und zu einem Produktprogramm zusammenfassen kann.“ (Fink & Siebe, 2016, S. 247) Abbildung 2.29 zeigt beispielhaft Produktszenarien eines Leichtbaufahrzeugs.

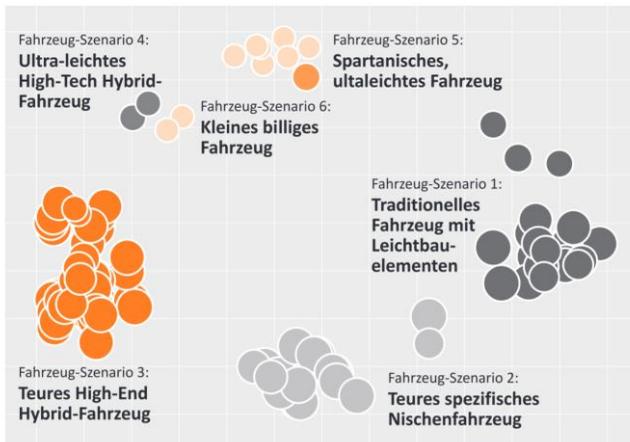


Abbildung 2.29: Produktszenarien eines Leichtbaufahrzeugs (Fink & Siebe, 2016, S. 248).

Ebenfalls zu planen ist die Einführung von Produktvarianten, wobei zum Beispiel in der Automobilindustrie beobachtet werden kann, dass neue Varianten zunehmend schneller aufeinander folgend eingeführt werden (Albers, Haug et al., 2016, S. 234). Die Entwicklung neuer Produktvarianten kann auch Teil des Änderungsmanagements sein, im Rahmen dessen technischen Änderungen (s. Abschnitt 2.4.4) bearbeitet werden (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 8). Weitere Ursachen, Initiatoren und Ziele technischer Änderungen (Engineering Changes) werden im nächsten Abschnitt betrachtet.

### 2.5.1.1 Ursachen, Initiatoren und Ziele von technischen Änderungen (Engineering Changes)

Bei der Untersuchung von Gründen für technische Änderungen (Engineering Changes) kann unterschieden werden zwischen Zielen, Initiatoren und eigentlichen Ursachen im Sinne kausaler Faktoren (Jarratt et al., 2011, S. 109; Langer, Wilberg et al., 2012, S. 14; Langer, Maier et al., 2012, S. 231). Umfangreiche empirische Untersuchungen zu den Gründen für technische Änderungen haben beispielsweise LANGER UND WILBERG ET AL. (2012) durchgeführt.

„Wesentliche Ursachen von Änderungen stellen die unzureichende Klärung von Anforderungen sowie mangelhafte interne und externe Kommunikation dar.“ (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 4). Entsprechend wird häufig Fehlerbereinigung als Ziel von technischen Änderungen gesehen und in der Untersuchung von LANGER UND WILBERG ET AL. (2012) schätzen die Befragten mehr als 20% gemachter Änderungen als unnötig oder vermeidbar ein (Jarratt et al., 2011, S. 112; Langer, Wilberg et al., 2012, S. 8).

Gleichzeitig können technische Änderungen jedoch auch Reaktion auf veränderte Entwicklungsziele sein. Weiter lässt sich beobachten, dass Änderungen sowohl auf Kunden- und Anwendernutzen als auch Anbieternutzen, beispielsweise in Form von Kostenreduktion, abzielen können, wobei mitunter weniger eine Optimierung, sondern eine Verschiebung des Ausgleichs zwischen Zielen stattfindet. (Langer, Wilberg et al., 2012)

Hinsichtlich ihrer Auswirkungen werden kritische Änderungen von Standardänderungen unterschieden (s. Abschnitt 2.5.3.2). Ausgehend von dieser Unterscheidung stellen LANGER UND WILBERG ET AL. fest, dass kritische Änderungen eher der Fehlerbereinigung zuzuordnen sind, während Standardänderungen, ausgedrückt in Elementen des Produktprofils aus Abschnitt 2.1, mit der Generierung von neuem Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen verbunden sind. Zum Beispiel, indem neue Technologien integriert oder neue Produktvarianten entwickelt werden (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 13). Tabelle 3 zeigt die gefundenen 3 Hauptziele von Standardänderungen und kritischen Änderungen.

Tabelle 3: 3 Hauptziele von Standardänderungen und kritischen Änderungen nach Langer und Maier et al. (2012, S. 226), übersetzt.

Rang	Standardänderungen (n = 31)	Kritische Änderungen (n = 27)
1	Produktunzulänglichkeiten verbessern	Produktunzulänglichkeiten verbessern
2	Integration von Innovationen, neuen Technologien oder Trends	Integration von Innovationen, neuen Technologien oder Trends
3	Entwicklung alternativer Produkte oder Varianten	Änderung notwendig auf Grund anderer Änderungen

Hauptinitiatoren technischer Änderungen sind der Erhebung zu Folge in Übereinstimmung mit den Zielsetzungen „Kunden, Endnutzer und Markttrends sowie Forschungs- und Entwicklungsabteilungen“ (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 4).

Die von solchen Initiierungen ausgehende Entwicklung und Konkretisierung von Zielen auf der Basis bereits bestehender Systeme erfolgt in den im nächsten Abschnitt dargestellten Ansätzen der Zielsystembildung auf Basis des Modells der PGE.

### 2.5.1.2 Zielsystembildung auf Basis des Modells der PGE

Bei der Entwicklung von Zielsystemen (s. Abschnitt 2.3.2) neuer Systeme müssen neben strategischen Vorgaben auch konkrete Informationen aus der Analyse bestehender Systeme berücksichtigt werden (Albers, Haug et al., 2016, S. 237–238). Ansätze zur Zielsystembildung auf Basis des Modells der PGE berücksichtigen und integrieren diese beiden Stränge.

Als Grundlage stellen ALBERS, HEITGER ET AL. ein Produktmodell zur Strukturierung von Elementen des initialen Zielsystems bereit (Abbildung 2.30) sowie ein Vorgehensmodell zur Definition des initialen Zielsystems auf Basis des Modells der PGE (Albers, Heitger et al., 2018; Heitger, 2019). Dabei werden sowohl lösungsoffene als auch lösungsspezifische Elemente berücksichtigt.

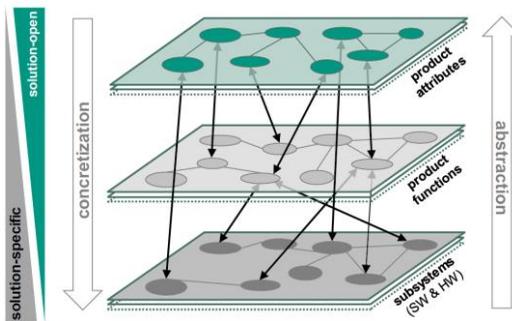


Abbildung 2.30: Produktmodell zur Strukturierung von Elementen des initialen Zielsystems (Albers, Heitger et al., 2018, S. 8).

HIRSCHTER ET AL. (2018) entwickeln anknüpfend daran das Vorgehensmodell in Abbildung 2.31 zur Überführung von Zukunftsszenarien in Produktprofile (s. Abschnitt 2.1).

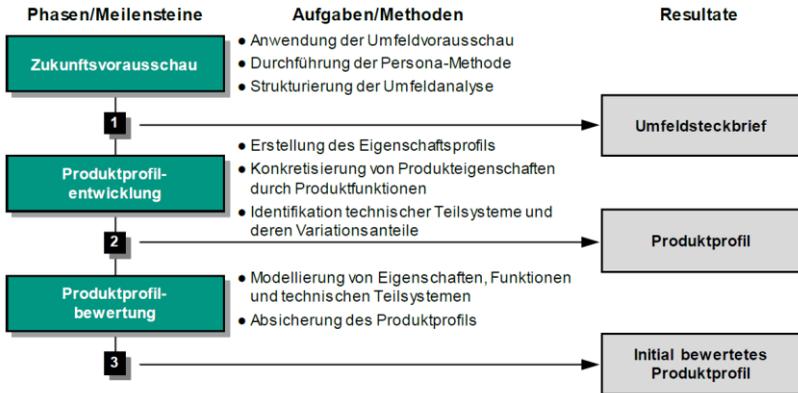


Abbildung 2.31: Vorgehensmodell zur Überführung von Zukunftsszenarien in Produktprofile (Hirschler et al., 2018, S. 9).

Im Eigenschaftsprofil, das im Rahmen des Vorgehens entwickelt wird, werden Referenzprodukte als Bezugspunkt genutzt, um das zu entwickelnde System zu positionieren. Abbildung 2.32 zeigt beispielhaft ein solches Eigenschaftsprofil.

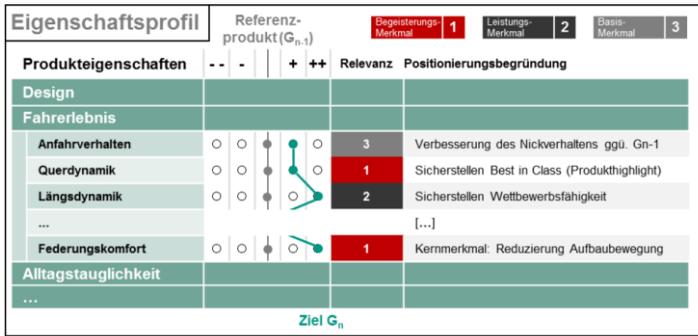


Abbildung 2.32: Im Eigenschaftsprofil wird das zu entwickelnde System gegenüber Referenzen (hier „Referenzprodukt  $G_{n-1}$ “) positioniert (Hirschter et al., 2018, S. 12).

Eine Systematik zur gezielten Ableitung von Produkteigenschaften aus Ergebnissen der Zukunftsvorausschau sowie zu deren Bewertung, Priorisierung und zeitlichen Staffelung für die Entwicklung beschreiben MARTHALER ET AL. (2019).

Aufbauend auf dieser Definition von Eigenschaften ermöglicht das Vorgehensmodell von ALBERS UND FAHL ET AL. (2020) deren Implementierung durch Funktionen und Realisierung durch Variationen von Teilsystemen bestehender Systeme.

Eigenschaften und Funktionen werden dabei über Entwicklungsgenerationen hinweg sukzessive konkretisiert (Albers, Haug et al., 2018, S. 6).

Zielsysteminformationen, die in der Entwicklung derjenigen Produktgeneration, die als nächstes in den Markt kommt, nicht mehr berücksichtigt werden können, gehen in das Zielsystem nachfolgender Produktgenerationen ein (Meboldt, 2009, S. 190–192). Ein denkbare Beispiel sind hier Leichtbaupotenziale durch Ideen für eine weiter verbesserte Bauteilgestaltung, die aber auf Grund zu weit fortgeschrittener Produktionsvorbereitungen (Werkzeugfertigung) oder der Dauer erforderlicher Absicherungsmaßnahmen nicht mehr in der nächsten Produktgeneration berücksichtigt werden können und daher in der übernächsten Produktgeneration implementiert werden.

Die hier beschriebene Rolle bestehender Systeme bei der Definition von Entwicklungszielen kommt auch in Methoden wie QFD und Benchmarking zum Tragen. Diese Ansätze werden im nächsten Abschnitt beschrieben. Gegenüber den oben vorgestellten Ansätzen beziehen sie sich nicht explizit auf eines der Beschreibungsmodelle aus Abschnitt 2.4.

### **2.5.1.3 QFD und Benchmarking**

Quality Function Deployment (QFD) (Akao, 1992) wird den Methoden des Qualitätsmanagements zugerechnet. Ziel ist es, Kundenanforderungen systematisch über Eigenschaften und Merkmale unter Berücksichtigung von deren Wechselwirkungen in Aktivitäten der Entwicklung und Produktion zu übertragen (Feldhusen & Grote, 2013, S. 758). Einen ausführlichen Überblick zu QFD und ihrer Historie gibt SAATWEBER (2016).

Zentrales Element des QFD zur Abbildung und Verknüpfung von Kundenanforderungen, Eigenschaften, Merkmalen und Aktivitäten von Entwicklung und Produktion ist das House of Quality in Abbildung 2.33. Dort wird sowohl aus Kundensicht als auch aus technischer Sicht Bezug zu Wettbewerbsprodukten, also bestehenden Systemen, hergestellt.

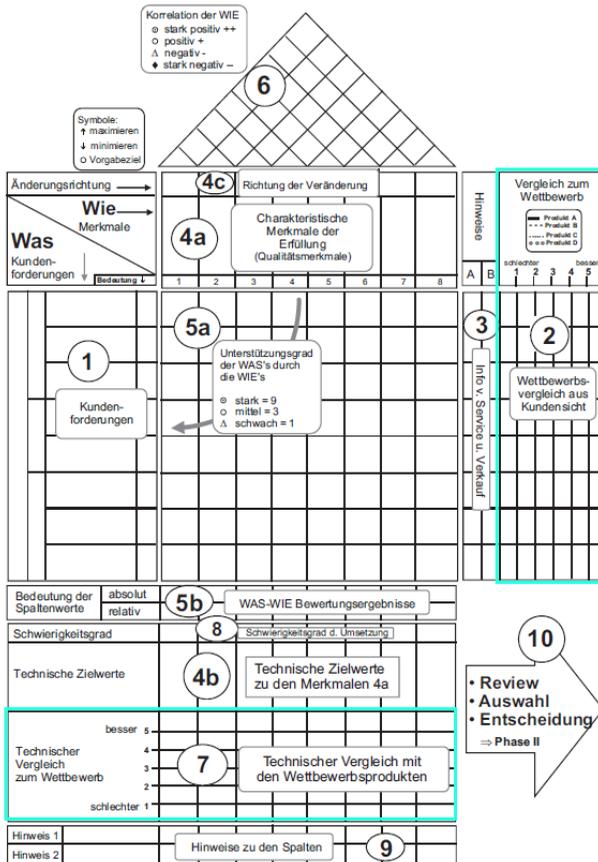


Abbildung 2.33: House of Quality als zentrales Element des QFD (Akao, 1992). Eine Relation zu bestehenden Systemen, namentlich des Wettbewerbs, wird sowohl aus Kundensicht (Bereich 2) als auch aus technischer Sicht (Bereich 7) hergestellt (Darstellung aus Saatweber (2016, S. 635), modifiziert).

Eine entsprechende Analyse eigener Produkte eines Unternehmens sowie von Wettbewerbsprodukten ist auch Gegenstand von Methoden des Reverse Engineering und des Benchmarking (Feldhusen & Grote, 2013, S. 151; Sabisch & Tintelnot, 1997). Im Allgemeinen werden weder bei QFD noch im Benchmarking für die Beschreibung der betrachteten bestehenden Systeme Bezüge zu den Ansätzen aus Abschnitt 2.4 hergestellt. Gleiches gilt für einzelne Beobachtungen zu Zielen von Entwicklungsaktivitäten ohne expliziten Bezug zu bestimmten Methoden, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

#### **2.5.1.4 Bezüge zu bestehenden Systemen in Beobachtungen zu Zielen von Entwicklungsaktivitäten**

Bei verschiedenen Beobachtungen zu Zielen von Entwicklungsaktivitäten mit Bezügen zu bestehenden Systemen können diese Ziele den auch in einem Produktprofil (s. Abschnitt 2.1) beschriebenen Dimensionen Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen sowie Randbedingungen zugeordnet werden.

Beispielsweise wird in der Automobilindustrie versucht, bei der Bereitstellung von kundenerlebbarer Funktionen den Lebenszyklen von Elektronik und Informationstechnik zu folgen, während die Lebenszyklen für Teilsysteme mit mechanischen Anteilen im selben System oder das Gesamtsystem an sich deutlich länger sein können (Albers, Haug et al., 2016, S. 234). Teilweise wird auch innerhalb einer Domäne versucht, künftige Änderungen zu antizipieren und beispielsweise zu erwartende steigende Antriebsmomente in der Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten früh zu berücksichtigen (Albers, Gladysz et al., 2016, S. 8).

Auf die Realisierung von Anbieternutzen zielen in Fallbeispielen beobachtbare und auch als Gründe für Iterationen zu findende Maßnahmen ab, mehrere Systeme und deren Varianten in einem gemeinsamen Produktionssystem herzustellen (Jarratt, Eckert, Clarkson & Schwankl, 2002; Peglow et al., 2017; Wynn & Eckert, 2017).

Bei der Angebotserstellung von Automobil-Zulieferern, die ohne Rückgriff auf bestehende Systeme in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich wäre, kann ein Beispiel für Randbedingungen als Grund für eine Relation zwischen zu entwickelnden Systemen und bestehenden Systemen beobachtet werden (Albers, Walch & Bursac, 2016, s. auch Abschnitt 2.5.3.3).

Insgesamt kann beobachtet werden, dass mit dem Bezug zu bestehenden Systemen bei der Beschreibung und Definition von Entwicklungszielen auch einen Bezug zu bestehenden Lösungen einhergeht. Im nächsten Abschnitt wird auf Ansätze zur Lösungsfindung in der Entwicklung eines neuen Systems eingegangen, die diesen Bezug berücksichtigen.

## **2.5.2 Ableitung von Lösungsansätzen in der Entwicklung neuer Systeme in Relation zu Referenzen**

In Ansätzen zur Lösungsfindung bei der Entwicklung eines neuen Systems werden in unterschiedlichem Umfang Bezüge zu Lösungen in bestehenden Systemen berücksichtigt. Ähnlich wie die Abstraktionsgrade von Produktmodellen (s. Abschnitt 2.2.3) zur produktgenerationsübergreifenden Verwendung sind auch Ansätze zur Lösungsfindung unterschiedlich spezifisch bzw. generisch. Ohne spezifischen Produktbezug sind beispielsweise viele Kreativitätsmethoden. Spezifischer, zumindest in Bezug auf die verfolgte Zielsetzung, sind Ansätze des Design-for-X. Tendenziell generischere Ansätze zur methodischen Unterstützung werden in Abschnitt 2.6 vorgestellt. In den folgenden Abschnitten wird auf Ansätze eingegangen, die dezidiert einen Bezug zwischen verschiedenen Entwicklungsprojekten in Form eines Referenzbezugs aufgreifen.

Die prinzipiellen unterschiedlichen Möglichkeiten zur Modifikation eines Systems sind ausgehend von einer Beschreibung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs mittels des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes (s. Abschnitt 2.2.2) wie folgt (Albers, Burkard & Ohmer, 2004, S. 91):

- Hinzufügen von Wirkflächenpaaren (WFP) oder Leitstützstrukturen (LSS)
- Entfernen von WFP oder LSS
- Ändern der Eigenschaften von WFP, einschließlich deren Relation zu anderen WFP oder LSS
- Ändern der Eigenschaften von LSS

Im nächsten Abschnitt vorgestellte Ansätze zur Ableitung von Lösungen in der Entwicklung eines neuen Systems auf Basis des Modells der PGE bauen entsprechend auf C&C<sup>2</sup>-A-Modellen auf.

### **2.5.2.1 Ableitung von Variationen**

Für die deduktive Ableitung von Gestaltvariationen entwickelt WINTERGERST (2015) unter Einbezug verschiedener Ansätze der qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse eine Vorgehenssystematik. Die Teilschritte des Leitfadens zur Systematik sowie die in der Systematik integrierten Methoden sind in Abbildung 2.34 dargestellt.

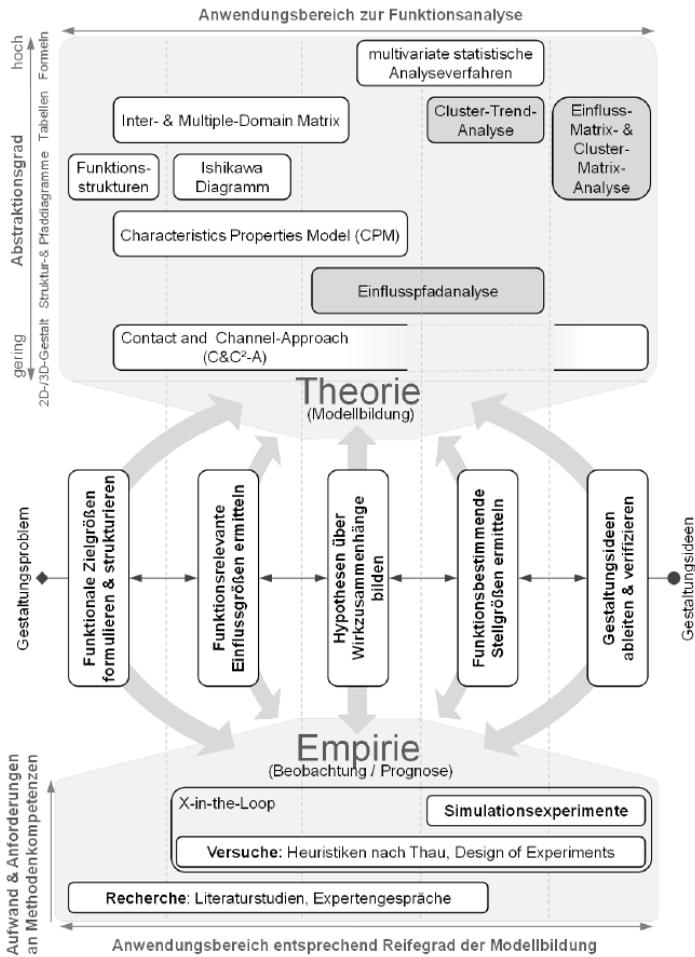


Abbildung 2.34: Teilschritte der Vorgehenssystematik zur deduktiven Gestaltvariation nach WINTERGERST sowie Verortung verschiedener Ansätze der qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse (Wintergerst, 2015, S. 147).

Darauf aufbauend zeigen ALBERS UND GLADYSZ ET AL. (2016) am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems, wie durch die Integration von Versuchsergebnissen in C&C<sup>2</sup>-Modelle Variationen zur Systemoptimierung abgeleitet werden können. Abbildung 2.35 illustriert das Vorgehen anhand eines ausgewählten tribologischen Wirkflächenpaares in einer trockenlaufenden Kupplung.

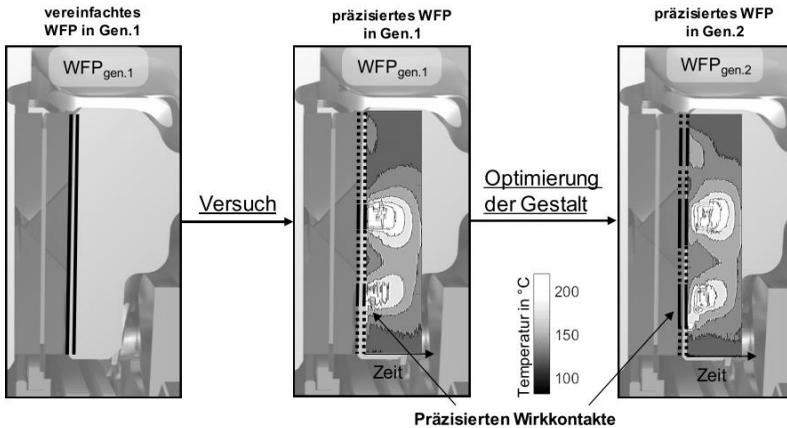


Abbildung 2.35: Beispiel für die Optimierung von Systemen durch Ableitung von Variationen auf Basis von Versuchsergebnissen: Für das funktionserfüllende reibschlüssige Wirkflächenpaar eines trockenlaufenden Kupplungssystems ist in der vertikalen die Temperaturverteilung entlang des Reibkontakts aufgetragen, in der horizontalen deren zeitliche Entwicklung<sup>11</sup>. (Albers, Gladysz et al., 2016, S. 9)

Für die Entwicklung künftiger Systeme ist man bestrebt, das bei derartigem Vorgehen generierte Wissen über den methodischen Aspekt hinaus spezifischer, beispielsweise als Gestaltungsrichtlinie, weiterzugeben. In diesem Zusammenhang wird auch von Lösungsmustern, englisch Design Patterns, gesprochen.

<sup>11</sup> Die Darstellung ist also insbesondere nicht zu verwechseln mit einer Darstellung der örtlichen Temperaturverteilung in der rechts vom Wirkflächenpaar zu sehenden Anpressplatte der Kupplung.

### 2.5.2.2 Design Patterns

Lösungsmuster oder Design Patterns werden oft als Instrument des Wissensmanagements verstanden. Ziel ist die Weitergabe von Wissen über einen Zusammenhang, typischerweise als Lösung eines bestimmten Problems, zur Anwendung auf künftige ähnliche Probleme in der Entwicklung von Systemen (mehr hierzu s. Abschnitt 2.7.4).

Lösungsmuster können sowohl in der Analyse als auch Synthese von Systemen eingesetzt werden. Beispiele für die Analyse mit Hilfe von Lösungsmustern stellen standardisierte Verfahren zur Bauteilauslegung dar. (Weber & Husung, 2016, S. 103)

Bei der Synthese neuer Systeme können Lösungsmuster auf zwei Arten eine Rolle spielen (Weber & Husung, 2016, S. 105):

- Bei einem System, das im Allgemeinen als Kombination aus mehreren Lösungsmustern verstanden werden kann, wird mindestens eines der Lösungsmuster durch ein anderes ausgetauscht
- Es wird ein prinzipiell neues Lösungsmuster generiert

Zur Identifikation potenziell zielführender Lösungsmuster bedarf es Erfahrungen aus früheren Entwicklungsprojekten (Albers, Deigendesch, Turki & Müller, 2010, S. 1541).

### 2.5.2.3 Einzelne Beispiele und Beobachtungen

Beobachtungen zeigen, dass die Wiederverwendung von Design-Lösungen auch unmittelbar, ohne Abstraktion wie bei einem Design Pattern stattfindet. Ein Beispiel sind bereits in bestimmten (geographischen) Märkten erfolgreich eingesetzte Systeme, die für den Einsatz in anderen Märkten mit wenig Aufwand angepasst werden (Heckendorf, 2016).

Ein Ansatz zur Abschätzung erforderlicher Änderungsumfänge, der auf QFD aufbaut, ist in Abbildung 2.36 zu sehen. Dort wird anhand einer Matrix, die Funktionen und Komponenten verknüpft, eingeschätzt, wie hoch der jeweilige Veränderungsbedarf ist.

Requirement	Subsystem										
	Chassis	Battery	Tracks	Communication box	Electronics box	Manipulator	Gripper	Cameras	Payload bay	Antennae	OCU
Range (feet)				6						6	
Slope Climb (deg)	3		3			1					
Maneuver width (in)	3	3									3
On board vol (in <sup>3</sup> )	6				3				6		
On board wt (lb)	6				3				6		
Drag/Roll/Push (lb)	6	3	6			6	6				
Horiz reach (in)	6	3				9	1				
Vert high reach (in)	1					9	1				
Sensing type								3			
Video vert high reach (in)	1					9	1				
Large Obj Pickup (length)						3	6				
Large Obj Pickup (width)						3	6				
Large Obj Pickup (height)						3	6				
Lift capac (lb)	6					9	3				
Tool precision				1		6	1				1
Tool size (in <sup>3</sup> )						3	6				
Tool wt (lb)						3	6				
Comm range (ft)		3		6						6	
<b>GVI Values</b>	<b>38</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>6</b>	<b>58</b>	<b>48</b>	<b>1</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>4</b>

GVI Rating	
Rating	Description
9	Requires major redesign of the component (>50% of initial redesign costs)
6	Requires partial redesign of component (<50%)
3	Requires numerous simple changes (<30%)
1	Requires few minor changes (<15%)
0	No changes required

Abbildung 2.36: Beispiel für Ansatz zur Abschätzung erforderlicher Veränderungsumfänge anhand von Funktion-Komponenten-Matrix am Beispiel eines automatisierten unbemannten Kettenfahrzeugs. GVI = generational variety index (Otto et al., 2016, S. 9 mit Bezug auf Simpson et al., 2012 und auf Basis von Martin & Ishii, 2002).

Sind potenziell zielführende Lösungsansätze in der Entwicklung eines neuen Systems mit Bezug zu bestehenden Systemen abgeleitet, wird versucht, die Auswirkungen in Abhängigkeit von Art und Umfang der Änderungen abzuschätzen. Ansätze für diesen Zweck werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

### 2.5.3 Identifikation und Einschätzung von Risiken in der Entwicklung neuer Systeme in Relation zu Referenzen

Ein Bezug zu bestehenden Systemen als Grundlage zur Risikoabschätzung in der Entwicklung eines neuen Systems lässt sich in verschiedenen Ansätzen beobachten. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.37 dargestellt. Ähnlich wie bei den Ansätzen zur Beschreibung und Definition von Zielen wird dabei zur Beschreibung des Bezugs zu

bestehenden Systemen an sich in unterschiedlichem Umfang auf Ansätze wie die in Abschnitt 2.4 beschriebenen zurückgegriffen.

	Gesamtsystem	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	...
▶ Hoher Neuheitsgrad	●	○	○	○	○
▶ Anderer Anwendungsbereich	○	●	●	○	○
▶ Zielanspruch deutlich über bisherigem Stand	●	○	●	○	●
▶ Mangelnde Erfahrung mit Technologien	●	○	●	○	○
▶ Zeit- oder Kapazitätsengpässe bezüglich Zielerreichung	○	○	●	○	○

● = trifft zu      ○ = trifft nicht zu

Abbildung 2.37: Beispiel: Bei Wißler verwendete Dimensionen zur Einschätzung von Risiken bei einzelnen Komponenten (Wißler, 2006, S. 88). Die ersten vier Dimensionen enthalten Bezüge zu bestehenden Systemen. Zur Beschreibung dieser Bezüge selbst wird allerdings kein Ansatz der Art aus Abschnitt 2.4 genutzt.

Die bisherigen Abschnitte zeigen, dass der Bezug zwischen einem zu entwickelnden und bereits bestehenden Systemen, wenn er konzeptionell erfasst wird, oft als Änderung im weitesten Sinne beschrieben wird. In den nächsten Abschnitten werden verschiedene Ansätze zur Abschätzung von Änderungsauswirkungen, insbesondere Risiken, vorgestellt. Einführend wird ein kurzer Überblick über das Feld des Risikomanagements gegeben.

Bei der Analyse der Auswirkungen von Änderungen ist es notwendig, sowohl Auswirkungen auf das System als auch auf den zugehörigen Entwicklungsprozess zu betrachten (Eckert et al., 2017, S. 3). Dabei ist zu beachten, dass zur Erreichung eines bestimmten Ziels im Allgemeinen unterschiedliche Änderungen mit unterschiedlichen Auswirkungen in Betracht kommen (vgl. auch Alternative Lösungen bei SPALTEN in Abschnitt 2.3.1) (Eckert et al., 2001, S. 149).

Die Auswirkungen von Änderungen sind dabei von weiteren Faktoren abhängig. So können ähnliche Änderungen in verschiedenen Umfeldern unterschiedliche Auswirkungen haben. Beispielsweise können in Unternehmen unterschiedliche Größen

von Fertigungsmaschinen oder Prüfständen dazu führen, dass Herstellung und Test von Bauteilen, die gegenüber früheren Bauteilen vergrößert wurden, entweder noch problemlos möglich sind oder Investitionen in neue Fertigungs- und Testeinrichtungen notwendig machen. Selbst die Übernahme von Elementen aus bestehenden Systemen kann bei der Entwicklung eines neuen Systems herausfordernd sein, wenn das Umfeld sich ändert. (Baxter et al., 2007, S. 37; Ponn & Lindemann, 2005, S. 95)

Auswirkungen von Änderungen in Form von Kosten können danach unterteilt werden, ob sie einmalig anfallen, beispielsweise für notwendige Entwicklungsaktivitäten zur Implementierung der Änderungen, oder kontinuierlich, beispielsweise für Qualitätssicherungsmaßnahmen (Schoeneberg, 2014, S. 175)<sup>12</sup> (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 22)<sup>13</sup>. Im weiteren Sinne können Auswirkungen von Änderungen als Risiken betrachtet werden<sup>14</sup>. Der Umgang mit Risiken ist Gegenstand des Risikomanagements. Der nächste Abschnitt gibt einen Überblick über dieses Themenfeld.

### 2.5.3.1 Überblick Risikomanagement

Risiko wird in der DIN ISO 31000:2018, S. 7 definiert als „Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele“. Darunter wird eine positive oder negative Abweichung von einer Erwartung verstanden. Der Norm zu Folge wird Risiko anhand von Risikoursachen, potenziellen Ereignissen, deren Auswirkungen und Wahrscheinlichkeit dargestellt<sup>15</sup>. Über das Produkt von Wahrscheinlichkeit und einer Quantifizierung möglicher Auswirkungen wird oft versucht, Risiko auch mathematisch greifbar zu machen. Zur Quantifizierung können schlussendlich sowohl Punktwerte als auch Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben werden. Unter anderem auf Grund von Faktoren, die sich nur schwer valide quantifizieren lassen, und der Subjektivität einzelner Bewertungen wird so mitunter allerdings nur eine Scheingenauigkeit erreicht und die Fehleinschätzung, dass Risiko beherrschbar sei. (Gassmann, 2006, S. 10; Oehmen, 2016, S. 75)

---

<sup>12</sup> Dort im Zusammenhang mit Variantenmanagement und Komplexitätskosten betrachtet. Der Entstehung neuer Varianten liegen letztlich auch Änderungen zu Grunde, vgl. z.B. Abschnitt 2.4.4 „Engineering Change (Technische Änderungen)“ und 2.4.5 „Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung“

<sup>13</sup> Dort ähnlich im Zusammenhang mit Auswirkungen von technischen Änderungen

<sup>14</sup> Letztlich können auch die durch Änderungen schlussendlich realisierten Nutzenbündel aus Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen als Auswirkung betrachtet werden. In der vorliegenden Arbeit werden diese Intentionen, die bestehen, bevor konkrete Änderungen zu deren Realisierung feststehen, als Ziel oder Grund für Änderungen verstanden, die mit den Änderungen unweigerlich einhergehenden Risiken als Auswirkungen

<sup>15</sup> Zur spezifischen Definition dieser Bestandteile s. DIN ISO 31000:2018, S. 7–8.

Eine wichtige Form der Unsicherheit in der Entwicklung neuer Systeme ist die technologische Unsicherheit in Folge mangelnden Wissens in Bezug auf technologisch-naturwissenschaftliche Zusammenhänge (Herstatt, Buse & Napp, 2007, S. 11 nach Schoeneberg, 2014, S. 168).

In der Produktentwicklung werden mit Risikomanagement die folgenden vier Ziele verfolgt (Oehmen, 2016, S. 59):

- Transparenz bezüglich Entwicklungsrisiken schaffen
- Kritische Entscheidungsprozesse unterstützen und dabei Berücksichtigung von Risiken sicherstellen
- Wirtschaftliche Auswirkungen von Risiken, soweit bekannt, reduzieren
- Organisation und Produkt robust machen gegenüber verbleibenden und unbekanntem Risiken

Risiken in der Produktentwicklung können sich auf verschiedene Unternehmensbereiche erstrecken. Risikomanagement in der Produktentwicklung muss entsprechend mit nahezu allen anderen Unternehmensbereichen verknüpft sein. (Oehmen, 2016, S. 68; Schoeneberg, 2014, S. 169)

In diesem Sinne kann der Produktentstehungsprozess auch als Risikomanagementprozess verstanden werden (Oehmen, 2016, S. 59). OEHMEN gibt einen Überblick über verschiedene Risikomanagementansätze und lehnt sich selbst vor allem an DIN ISO 31000:2018 an. Diese Norm ist nicht industrie- oder sektorspezifisch (DIN ISO 31000:2018, S. 7). In ihr wird Risikomanagement definiert als „koordinierte Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ (DIN ISO 31000:2018, S. 7). Der Risikomanagementprozess der Norm ist in Abbildung 2.38 dargestellt.

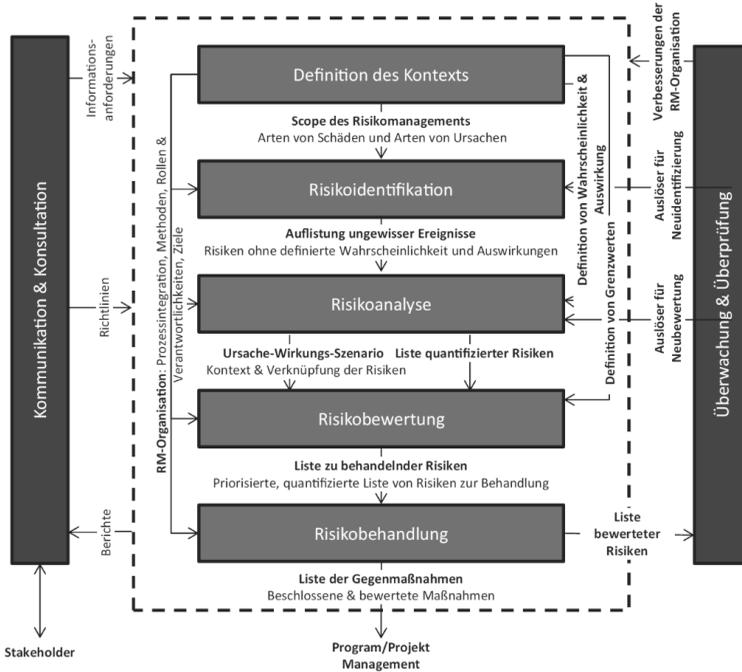


Abbildung 2.38: Risikomanagementprozess nach (DIN ISO 31000:2018) (Oehmen, 2016, S. 61), modifiziert.

Die ab Abschnitt Änderungsmanagement (Engineering Change Management) 2.5.3.2 vorgestellten Ansätze adressieren die einzelnen Schritte in unterschiedlichem Umfang.

Ausgehend vom Risiko-Nutzen-Verhältnis unterscheidet OEHMEN die Kategorien in Abbildung 2.39 sowie die Projektszenarien „Konservatives Projekt“, „Wesentliche aber evolutionäre Weiterentwicklung“ und „Revolutionäre Neuentwicklung“ (Oehmen, 2016, S. 66). Detaillierte Maßstäbe für die verschiedenen Kategorien bzw. Projektszenarien werden allerdings nicht genannt.

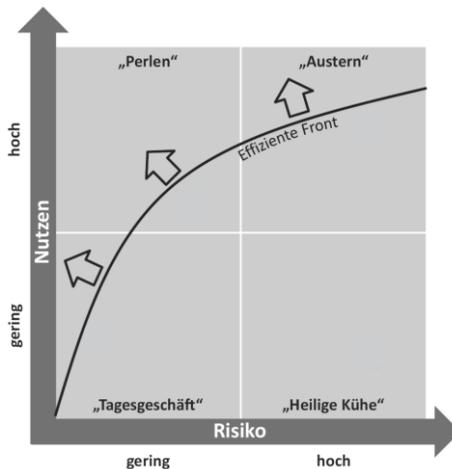


Abbildung 2.39: Kategorien für Entwicklungsprojekte auf Basis des Nutzen-Risiko-Verhältnis (Oehmen, 2016, S. 90), modifiziert.

Als mögliche Auswirkungskategorien von Risiken nennt OEHMEN entsprechend den Zielen der Produktentwicklung die folgenden (Oehmen, 2016, S. 70):

- Kostendimension:
  - Projektkostenrisiko
  - Produktkostenrisiko
- Zeitliche Dimension:
  - Projektzeitplanrisiko
  - Time-to-market-Risiko
- Qualitätsdimension
  - Entwicklungsprojektqualitätsrisiken
  - Produktqualitätsrisiken
- Weitere Zieldimensionen:
  - Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsrisiken
  - Reputationsrisiken

Beispiele für Methoden zur Risikoidentifikation sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Beispiele für Methoden zur Risikoidentifikation (Oehmen, 2016, S. 71).

Deduktive datenbasierte Methoden	Induktive Analysemethoden	Strukturierte kreativ- und teamorientierte Methoden
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokumentenanalyse</li> <li>• Checklisten</li> <li>• Analyse historischer Daten (z. B. aus vergangenen Projekten)</li> <li>• Analyse statistischer Daten (z. B. bzgl. technischer oder menschlicher Zuverlässigkeit)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angepasste HAZOP-, HAZAN- oder HACCP-Methoden</li> <li>• Fault Tree Analysis</li> <li>• Event Tree Analysis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brainstorming</li> <li>• Szenarioentwicklung</li> <li>• Interviews (strukturiert oder halbstrukturiert)</li> <li>• Delphi-Methode</li> <li>• FMEA/FMECA</li> <li>• What-If-Analyse</li> <li>• Ursache-Effekt-Analysen, 5-Why-Analysen, Root Cause Analysis (RCA)</li> </ul>

Ergänzend kann eine generelle Übersicht zur Beurteilung technischer Risiken bei GLADYSZ (2019, S. 21–64) gefunden werden.

Während die Ausführungen zu Risiken und Methoden von OEHMEN (2016) entsprechend der zu Grunde liegenden Norm genereller Natur sind, werden im Folgenden Ansätze vorgestellt, die der Betrachtung von Risiken in der Entwicklung in Verbindung mit Änderungen am System dienen. Aufbauend auf der Beschreibung von technischen Änderungen, englisch Engineering Changes, hat sich dafür das Feld des Änderungsmanagement entwickelt.

### 2.5.3.2 Änderungsmanagement (Engineering Change Management)

Aufgabe des Änderungsmanagements, englisch Engineering Change Management, ist es, die Umsetzung von Engineering Changes (s. Abschnitt 2.4.4) zu koordinieren und zu kontrollieren (Mirdamadi et al., 2018, S. 1). Es ist nicht zu verwechseln mit Change Management in der Management-Literatur, das allgemein die Veränderung von Unternehmensprozessen meint (Jarratt et al., 2011, S. 105). Zur zunehmenden

Bedeutung von Änderungsmanagement und entsprechenden Prozessen haben in der Vergangenheit auch Anforderungen an Prozessdokumentationen im Qualitätsmanagement nach Normen wie ISO 9001 beigetragen (Jarratt et al., 2011, S. 108). HAMRAZ ET AL. organisieren 427 Publikationen zu Engineering Change Management auf Basis früherer Arbeiten in einem umfassenden Framework (Hamraz et al., 2013, S. 6). Insgesamt kommen HAMRAZ ET AL. (2013, S. 20) in ihrer Analyse zu dem Schluss, dass Engineering Change Management nach wie vor ein verhältnismäßig junges Forschungsfeld darstellt.

Als Grundlage für Engineering Change Prozesse kann das sechsstufige Vorgehen in Abbildung 2.40 dienen.

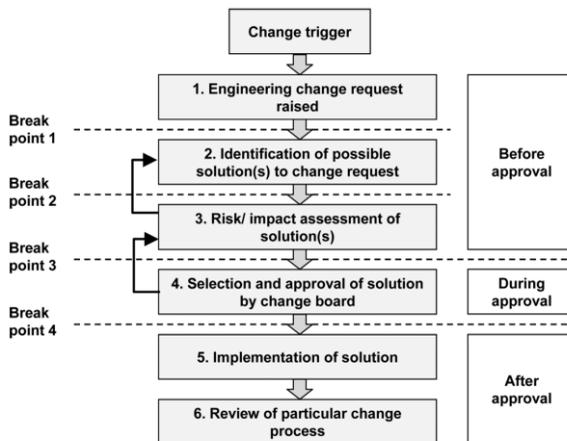


Abbildung 2.40: Engineering Change Prozess (Hamraz et al., 2013, S. 476 auf Basis von Jarratt, Eckert & Clarkson, 2004).

Als mögliche Indikatoren für die Leistungsfähigkeit der Änderungsmanagementprozesse eines Unternehmens nennen JARRATT ET AL. (2011, S. 111) nach HUANG UND MAK (2003) die Anzahl in Bearbeitung befindlicher Änderungen, die Bearbeitungsdauer sowie die notwendigen Kosten oder Personenstunden zur Bearbeitung einer Änderung.

KATTNER, WANG UND LINDEMANN (2016, S. 1183) konstatieren jedoch einen Mangel an Performance-Indikatoren im Feld des Engineering Change Management. Ent-

sprechend der großen Bandbreite möglicher Änderungsumfänge und -auswirkungen schlagen sie ein 4-Ebenen-Modell vor, um die Leistung des Änderungsmanagement von der Gesamtprozessebene bis hin zur Leistung einzelner Teilschritte zu messen (Kattner et al., 2016, S. 1182).

LANGER UND WILBERG ET AL. (2012, S. 25) stellen in ihrer Studie ebenfalls fest, dass „nur 48 % der Unternehmen eine formale Analyse von Risiken und Auswirkungen verschiedener Änderungsmöglichkeiten durchführen.“

Anhand der Auswirkungen von technischen Änderungen werden diese mitunter eingeteilt in kritische Änderungen und Standardänderungen. Als kritische Änderungen gelten dabei solche Änderungen, die den Projekterfolg als Ganzes potenziell gefährden. (Langer, Maier et al., 2012, S. 224) Ob das der Fall ist, muss im Einzelfall analysiert werden, da kaum andere Kriterien angegeben werden, mit Hilfe derer kritische Änderungen als solche identifiziert werden könnten.

Kritikalität sowie Auswirkungen einer technischen Änderungen im Allgemeinen können vom Unternehmenskontext abhängen sowie vom Zeitpunkt des Auftretens im Entwicklungsprozess (Jarratt et al., 2011, S. 111; Langer, Maier et al., 2012, S. 232).

Die Auswirkungen von technischen Änderungen können äußerst vielfältig sein und im Grunde alle Unternehmensbereiche betreffen. Beispiele für Dimensionen und empirische Erhebungen sowie weiterführende Verweise finden sich bei HAMRAZ ET AL., 2013, S. 12; JARRATT ET AL., 2011; KISSEL & LINDEMANN, 2013; LANGER, WILBERG ET AL., 2012; LANGER, MAIER ET AL., 2012. Auf Grund der großen Spannweite möglicher Umfänge technischer Änderungen, die die Definition zulässt, ist die Beobachtung von Mustern in den Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen und deren Auswirkungen allerdings schwierig. In Übereinstimmung damit beobachten LANGER UND WILBERG ET AL. (2012, S. 34–35) stellenweise Kritik an zu starren Änderungsprozessen.

Weitere Herausforderungen in der Folge technischer Änderungen sind schnittstellenübergreifende Kommunikationsprozesse sowie die Konsistenzhaltung der Produktdokumentation (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 35, Wright, 1997 nach Jarratt et al., 2011, S. 107).

Ein wichtiger Teilbereich der Auswirkungen technischer Änderungen an bestimmten Teilsystemen sind Auswirkungen auf andere Teilsysteme. Man spricht hier auch von Änderungsfortpflanzung. Teilsysteme eines Systems können im Rahmen einer entsprechenden Analyse, wie in Abbildung 2.41 dargestellt, danach eingeteilt werden, inwieweit Änderungen an ihnen zu Änderungen an weiteren Teilsystemen führen oder nicht.

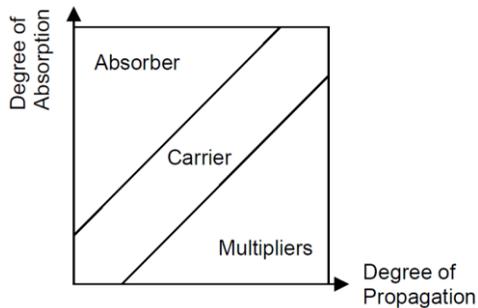


Abbildung 2.41: Mögliche Einteilung von Teilsystemen im Zuge der Analyse von Änderungsauswirkungen auf Basis dessen, inwieweit sie technische Änderungen „weitergeben“ oder „aufnehmen“ (Eckert et al., 2001, S. 152).

Welche der in Abbildung 2.41 gezeigten Rollen ein Teilsystem spielt, kann dabei von Änderung zu Änderung unterschiedlich sein (Eckert et al., 2001, S. 152). Ausgehend von einer initialen Änderung, sind bezogen auf das Gesamtsystem verschiedene Verläufe der Änderungfortpflanzung möglich, je nachdem, wie viele weitere Änderungen von Teilsystemen sich aus einer einzelnen Änderung ergeben. Im Extremfall entsteht, wie in Abbildung 2.42 dargestellt, eine nicht mehr zu kontrollierende „Änderungslawine“.

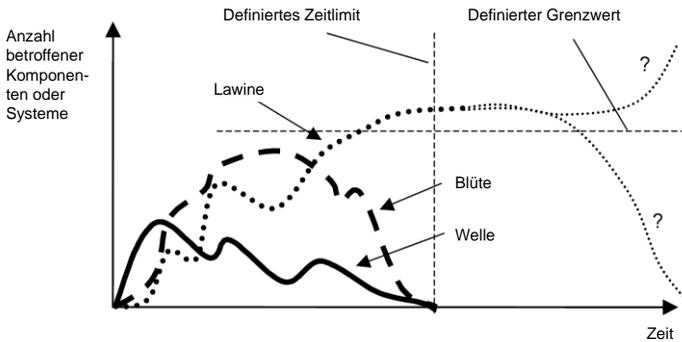


Abbildung 2.42: Unterschiedliche mögliche Entwicklungen der Änderungsfortpflanzung, ausgehend von einer initialen Änderung. Beispielhafte Darstellung auf Basis von Beobachtungen in einer Fallstudie (Eckert et al., 2001, S. 149), übersetzt

Der Umgang mit der Fortpflanzung von Änderungen stellt im Engineering Change Management das Teilgebiet „Change Propagation Management“ dar.

Die Auswirkung einer technischen Änderung auf weitere Teile ist abhängig von der Produktkomplexität, der Produktarchitektur (s. Abschnitt 2.2.1) sowie dem Innovationsgrad<sup>16</sup> des Produkts (Colombo et al., 2015, S. 9; Jarratt et al., 2011, S. 113). Die Ursache der Fortpflanzung von Änderungen sind die Interaktionen von Teilsystemen eines Systems in verschiedenen Bereichen, beispielsweise im Zielsystem in Form wechselwirkender Anforderungen oder beim Gestalt-Funktion-Zusammenhang bei physisch verbundenen Teilsystemen. Verschiedene Ansätze zum Umgang mit Änderungsfortpflanzung fokussieren unterschiedliche dieser Sichten; ein Überblick findet sich bei AHMAD, WYNN UND CLARKSON (2013, S. 220–224). Diese Interaktionen führen nicht nur zur Fortpflanzung von Änderungen, sondern können sich selbst in Folge von Änderungen ändern (Eckert et al., 2001, S. 150). Die wechselseitige Abhängigkeit von Teilsystemen wird dabei oft durch Wahrscheinlichkeiten der Fortpflanzung einer Änderung ausgedrückt (Ahmad et al., 2013, S. 220).

<sup>16</sup> Wobei die Definition des Begriffs dort unscharf bleibt. Es ist anzunehmen, dass letztlich die Kombination aus Anzahl und Umfang an Änderungen an einem Produkt in einer bestimmten Situation gemeint ist.

In Ansätzen zur Abschätzung von Änderungsauswirkungen werden zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen beispielsweise Design Structure Matrices (DSM, s. auch Abschnitt 2.2.1) verwendet. Werden dabei mehrere Sichten auf ein System, zum Beispiel sowohl Anforderungen als auch die Gestalt von Teilsystemen berücksichtigt, spricht man von Multi Domain Matrices (MDM). Abbildung 2.43 zeigt beispielhaft einen DSM-basierten Ansatz zur Abschätzung von Änderungsauswirkungen.

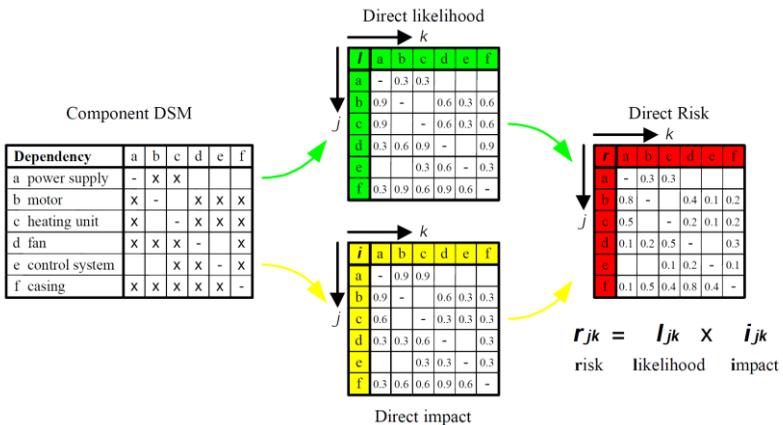


Abbildung 2.43: Beispiel für DSM-basierten Ansatz zur Abschätzung der Fortpflanzung technischer Änderungen. Das Risiko der Fortpflanzung einer Änderung zwischen zwei Teilsystemen wird als Produkt von Wahrscheinlichkeit der Fortpflanzung und Schwere der Auswirkung abgeschätzt (Clarkson, Simons & Eckert, 2001, S. 5).

Der Ansatz beschreibt dabei einen Schritt einer Änderungsförpflanzung. Mehrere Schritte können durch Matrixmultiplikation abgebildet werden, wobei CLARKSON ET AL. (2001, S. 7) eine Begrenzung auf maximal vier Schritte empfehlen. Ausgehend von DSM- oder MDM-basierten Ansätzen kann auch untersucht werden, inwieweit bei Vorliegen mehrerer technischer Änderungen eine kumulierte Bearbeitung auf Grund der damit verbundenen Synergiepotenziale sinnvoll ist (Ahmad, Wynn & Clarkson, 2010). Werden weiterhin Informationen zu Entwicklungsaktivitäten oder -schritten mit Teilsystemen verknüpft, lässt sich für eine technische Ände-

rung anhand der betroffenen Teilsysteme auch ableiten, mit welchen Entwicklungsaktivitäten zu rechnen ist (Ahmad et al., 2013). Die Autoren weisen dabei darauf hin, dass eine präzise Ableitung aller erforderlichen Aktivitäten allerdings nicht möglich ist und der Ansatz eher als Hilfe ähnlich einer Checkliste zur Abschätzung von Aktivitäten zu sehen ist (Ahmad et al., 2013, S. 234–235).

Eine Herausforderung der DSM- und MDM-basierten Ansätze ist die Wahl einer passenden Granularität bei der Unterteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme (Jarratt et al., 2002, S. 77). CLARKSON ET AL. (2001, S. 5) empfehlen beispielsweise weniger als 50 Teilsysteme. Eine weitere Herausforderung ist die Annahme, dass die durch die DSM dargestellte Systemstruktur bei den betrachteten Änderungen erhalten bleibt. Diese Annahme kann vermutlich nur bei begrenzten Änderungsumfängen aufrechterhalten werden.

Andere Ansätze zur Abschätzung der Auswirkungen technischer Änderungen sind Graphen-basiert, wobei Verknüpfungen ebenfalls mit Wahrscheinlichkeiten hinterlegt werden. Abbildung 2.44 zeigt das Modell eines Ansatzes, der die Auswirkungen technischer Änderungen im Detail der konstruktiven Gestalt betrachtet.

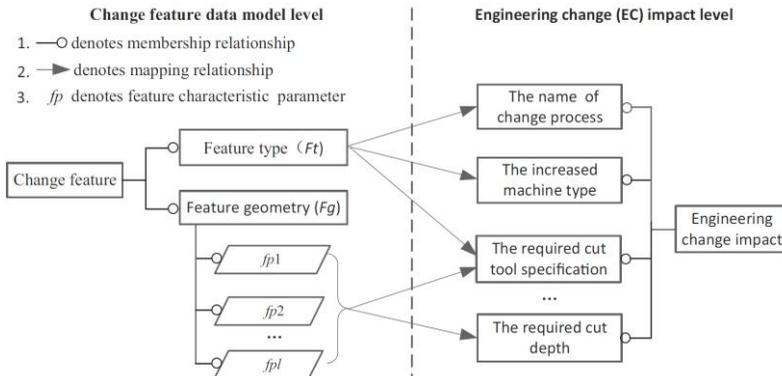


Abbildung 2.44: Graph zur Darstellung der Auswirkungen von konstruktiven Änderungen (modelliert anhand von „Change features“) (Chen, Zhang, Wang & Xu, 2017, S. 136).

Der Ansatz soll bei begrenzten konstruktiven Änderungen eine Tragweitenanalyse in Echtzeit ermöglichen (Chen et al., 2017, S. 141).

Einen ebenfalls Graphen-basierten Ansatz zur Betrachtung der Auswirkung technischer Änderungen und deren Fortpflanzung entwickeln MIRDAMADI ET AL. (2018) auf Basis eines Bayesschen Netzes.

Ein wichtiger Faktor beim Umgang mit technischen Änderungen und deren Auswirkungen sowie Fortpflanzungen innerhalb des Systems sind dort vorhandene Redundanzen oder Auslegungsreserven. ECKERT ET AL. (2001) sprechen hier von "Margins" und beschreiben initial unterschiedliche Strategien zum Umgang mit diesen, die unter anderem den Zielkonflikt zwischen der – im Hinblick auf technische Änderungen – robusten Systemgestaltung durch Margins und der Optimierung von Systemen, beispielsweise hinsichtlich Gewicht umfassen (Eckert et al., 2001, S. 153).

Eine Herausforderung bei Ansätzen und Modellen zur Abschätzung der Auswirkung technischer Änderungen ist der erforderliche Modellierungsaufwand (Ahmad et al., 2013, S. 241; Eckert et al., 2001, S. 150). Potenzial diesen Aufwand zu reduzieren liegt in der Wiederverwendung von Modellen (Albers & Moeser, 2016, 6). Die Nutzung von Informationen bereits vorhandener Modelle aus der Entwicklung früherer Produktgenerationen wird in Ansätzen auf Basis des Modells der PGE (s. Abschnitt 2.4.5) explizit aufgegriffen. Im nächsten Abschnitt werden Ansätze auf Basis des Modells der PGE beschrieben, die sich in verschiedenen Formen mit der Abschätzung der Auswirkungen von Variationen beschäftigen.

### **2.5.3.3 Einschätzung der Auswirkungen von Variationen**

Eine Ausprägung der Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist die Ableitung einer neuen Produktvariante (s. Abschnitt 2.4.5). Die Abschätzung der Auswirkungen von Variationen ergibt dann den geschätzten Aufwand zur Realisierung dieser neuen Produktvariante. Vor diesem Hintergrund entwickeln ALBERS, WALCH UND BURSAC (2016), WALCH (2017) für die Angebotserstellung bei Nockenwellen einen Ansatz, mit Hilfe dessen bei vorliegender Kundenanfrage auf Basis bereits bestehender Objekte alternative Lösungen konzipiert und hinsichtlich Realisierungsaufwand initial bewertet werden können (s. Abbildung 2.45).



Abbildung 2.45: Struktur des Ansatzes von Albers, Walch und Bursac (2016), Walch (2017) zur Abschätzung des Realisierungsaufwands neuer Varianten von Nockenwellen auf Grundlage bestehender Objekte und Anforderungen an die neue Variante. Unten rechts werden die mit den unterschiedlichen Variationsarten zu entwickelnden Teilsystememengen entsprechend der Nomenklatur des Modells der PGE aus Abschnitt 2.4.5 dargestellt (Albers, Walch & Bursac, 2016, S. 5)

Im Fokus der Abschätzung stehen dabei erforderliche Konstruktions- und Validierungsaktivitäten zur Realisierung einer neuen Nockenwellenvariante.

In einem ähnlichen Ansatz zur Bewertung potenzieller neuer Varianten von Hochdruckpumpen berücksichtigen PEGLOW, HEIMICKE UND ALBERS (2019) mögliche Auswirkungen von Variationen aufbauend auf das iPeM (s. Abschnitt 2.3.2) in den Bereichen Produkt, Produktionssystem, Validierungssystem und Strategie. Die Abschätzung möglicher Auswirkungen von Variationen kann dabei mit Hilfe von Leitfragen erfolgen (Peglow et al., 2017, S. 8).

Anhand der möglichen Auswirkungen von Variationen können Entwicklungsaktivitäten in der Realisierung priorisiert werden, beispielsweise bei der Neuvalidierung von Teilsystemen oder Qualitätsmanagement-Aktivitäten wie FMEA-Analysen. Hierzu stellt GLADYSZ (2019) einen Ansatz bereit im Zusammenhang mit Identifikation und Ursachenanalyse von Fehlermechanismen in der Produktentwicklung. Das Vorgehensmodell zur Priorisierung von Funktionsumfängen unter Berücksichtigung der Variationsarten ist in Abbildung 2.46 gezeigt.

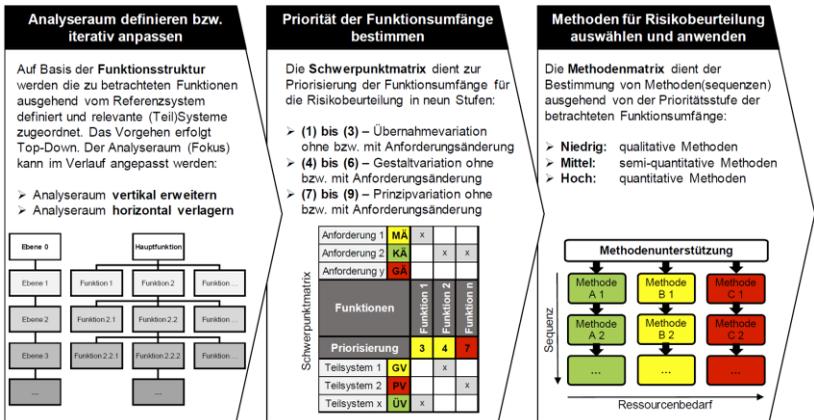


Abbildung 2.46: Vorgehensmodell zur Priorisierung von Funktionsumfängen in der Risikobeurteilung (Gladysz, Waldeier, Jahn & Albers, 2018), Darstellung nach Gladysz (2019, S. 121).

GLADYSZ integriert in seinem Ansatz auch Ansätze zur Systemmodellierung mittels C&C<sup>2</sup>-A (s. Abschnitt 2.2.2) und adressiert so Unzulänglichkeiten der Nachvollziehbarkeit und Informationserfassung bestehender Ansätze zur Fehleranalyse wie FMEA (Gladysz, 2019, S. 139). Nichtsdestotrotz kann die FMEA nach wie vor als weit verbreiteter Ansatz zur Analyse unbeabsichtigter oder unerwünschter Variationen an einem Produkt betrachtet werden und wird daher im nächsten Abschnitt kurz vorgestellt.

### 2.5.3.4 FMEA

Die Failure Mode and Effects Analysis kann als eine der bekanntesten Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse betrachtet werden (Bertsche & Lechner, 2004 nach Lindemann, 2016, S. 203). Zur Analyse und priorisierten Bearbeitung von Fehlern als potenziellen Risiken werden diese in den Dimensionen Schwere, Häufigkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit bewertet, zusammen ausgedrückt in einer Risikoprioritätszahl (RPZ) (DIN EN 60812:2015-08, S. 42). Abbildung 2.47 zeigt ein Beispiel eines Formblatts für diesen Zweck.

Aufbau/ Funktion		Bau- teil/ Funktion	Po- ten- tielle Aus- fall- art	Poten- zielle Auswir- kung(en) des Ausfalls	Schwere	Fehler- ursache(n)	F0	Häufig	Bedenken/ Grund zur Verbesse- rung	Vorgeschla- gene Hand- lung/ Verbesse- rung	Derzeitige präventive Beherr- schung	Derzeitige Auf- deckung durch Beherrschung	Auf- deck	RPZ
Aufbau/ Funktion	Bau- teil/ Funktion		Lokale Auswir- kung (auf die Funktion)	Systemaus- wirkung (auf das System)										
B+(Bat- terie+)														
Verpol- schutz	ZR1	Kurz	B+ Kurz- schluss nach Erde	Systemausfall wenn der Kurzschluss erhalten bleibt, potentielles thermisches Ereignis	8	Zufälli- ger Ausfall der Kompo- nente	6,51E- 004	4	Batterie Kurz- schluss nach Erde	Nicht benötigt	Keine	Keine	4	128

Abbildung 2.47: Auszug eines Formblatts für eine FMEA mit beispielhaften Eintra- gungen (DIN EN 60812:2015-08, S. 72).

Ähnlich zur FMEA ist die VMEA, die an Stelle von Fehlern Variationen betrachtet, die zu unerwünschten Auswirkungen führen können.

### 2.5.3.5 VMEA

Die VMEA – Variation Mode and Effect Analysis wurde von CHAKHUNASHVILI, JOHANSSON UND BERGMAN (2004) entwickelt mit dem Ziel, Größen zu identifizieren, die stark zur unerwünschten Variabilität von Produktcharakteristika beitragen. Ab- bildung 2.48 zeigt die Anbindung an QFD zur Ermittlung der relevanten Produktcha- rakteristika und die Schritte einer VMEA.

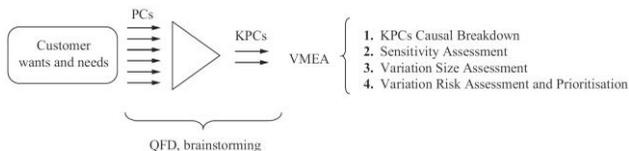


Abbildung 2.48: Ablauf mit Ermittlung von relevanten Produktcharakteristika (KPC) auf Basis einer QFD als Eingangsgröße für eine VMEA und Schritte einer VMEA (Johansson, Chakhunashvili, Barone & Bergman, 2006, S. 867).

Während bei einer FMEA, ggf. in Verbindung mit einer Fehlerbaumanalyse (FTA) die Priorisierung von Risiken im Zentrum steht, zielt eine VMEA auf die Handhabung ungewollter Variationen und eine gesteigerte Systemzuverlässigkeit ab (Pavasson & Karlberg, 2011, S. 258). Gegenüber einer VMEA werden im Ansatz des DRBFM im nächsten Abschnitt die bewusst vorgenommenen Änderungen an einem System als Grundlage für ein Design Review herangezogen.

### 2.5.3.6 DRBFM

Kerngedanke eines Design Review Based on Failure Mode (DRBFM) ist es, als Ansatzpunkt für Analyse und Diskussionen potenzieller Fehler Veränderungen gegenüber einem bestehenden, funktionierenden und bereits im Markt eingesetzten Design zu nutzen. Dabei wird unterschieden zwischen Veränderungen am Produkt („intentional changes“) und Veränderungen in der Einsatzumgebung, die nicht im Designraum der Entwickelnden liegen („incidental changes“). (Shimizu, Otsuka & Noguchi, 2010)<sup>17</sup>

Eine Weiterentwicklung des Ansatzes mit verstärkter System- anstelle einer Komponentenorientierung wird als System-DRBFM bezeichnet. Deren Schritte sind in Abbildung 2.49 dargestellt.

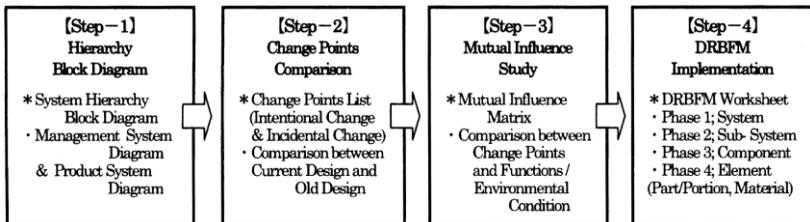


Abbildung 2.49: DRBFM-Prozess (Shimizu & Noguchi, 2005, S. 2023).

Die Struktur des in Schritt 4 zu verwendenden DRBFM Worksheet ist in Abbildung 2.50 zu sehen.

<sup>17</sup> Die ursprüngliche Veröffentlichung zur DRBFM datiert auf 2004, ist jedoch auf Japanisch. In der hier angeführten Referenz ist der Ansatz englischsprachig zugänglich.

Item Name / Change Points	Function	Concern Points regarding Change (Failure Mode)		When and How Concern Points appear		Effect to Customer (System)	Importance
		Potential Failure Mode due to Change	Any Other Concerns? (DRBFM)	Root Cause/ Dominant Cause	Any Other Consideration for Cause? (DRBFM)		

Current Design Steps to avoid Concerns (inc. Design Rule, Design Standard & Check Items)	Recommended Actions ( Results of DRBFM )					Action Results
	Items to reflect in "Design"	Resp. & Dead- line	Items to reflect in "Evaluation"	Resp. & Dead- line	Items to reflect in "Production Process"	

Abbildung 2.50: Struktur eines DRBFM Worksheet (Shimizu & Noguchi, 2005, S. 2022).

### 2.5.3.7 Sensitivitätsanalyse

Ansätze wie die zuvor beschriebene VMEA oder auch die DRBFM folgen im Kern der Idee einer Sensitivitätsanalyse. Dabei wird untersucht, inwieweit Veränderungen von Eingangsparametern eines Systems bestimmte Zielgrößen beeinflussen (Heesen, 2009, S. 114). Sensitivitätsanalysen bieten damit eine prinzipiell mögliche Herangehensweise für Ansätze zur Untersuchung der Auswirkungen von Änderungen an Systemen im weitesten Sinne.

### 2.5.3.8 RQFD

Ein weiterer Ansatz, der unter anderem zur Beurteilung von Projektrisiken genutzt werden kann und auf der QFD (s. Abschnitt 2.5.1.3) aufbaut, ist die RQFD nach REICH (Reich & Levy, 2004; Reich & Paz, 2008). Unter Einbezug von Marktinformationen und organisationsspezifischen Informationen sollen mittels detaillierter mathematischer Berechnungen Produktqualität, Ressourcenallokation und Risiken optimiert werden.

### 2.5.3.9 Analogiebildung

Die Nutzung vorhandenen Wissens aus früheren Entwicklungsprojekten kann auch in Form einer Analogiebildung für die Einschätzung von Entwicklungsrisiken genutzt werden. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zu Grunde, dass ähnliche Projekte

mit ähnlichen Risiken einhergehen (Savci & Kayis, 2006, S. 1747). Zu klären ist jedoch, wie Ähnlichkeit in diesem Zusammenhang gemessen werden kann. In der Fallstudie von SAVCI UND KAYIS wurde hier vor allem auf Expertenwissen aus einer Delphi Studie und Brainstorming-Sitzungen zurückgegriffen.

#### **2.5.3.10 Checklisten**

Eine weitere Möglichkeit, Erfahrungswissen aus früheren Projekten für den Umgang mit Risiken in der Entwicklung eines neuen Systems greifbar zu machen, sind Checklisten. CHAPMAN UND WARD (2003, S. 132–134) geben hier einen Überblick, weisen jedoch auch darauf hin, dass deren Inhalte nur als initiale Orientierung dienen kann, nicht als sichere oder abschließende Auflistung.

Insgesamt kann auf Basis der vorangehenden Abschnitte dieses Teilkapitels festgehalten werden, dass es verschiedene Ansätze gibt, die bei der Zieldefinition in der Entwicklung eines neuen Systems, der Ableitung und Beschreibung möglicher Lösungsrichtungen sowie deren Bewertung hinsichtlich Kosten und Risiken den Bezug zu bestehenden Systemen berücksichtigen. Allerdings wird dabei nur teilweise auf die Konzepte aus Abschnitt 2.4 zur expliziten Beschreibung dieser Relation zurückgegriffen. Daher können Erkenntnisse über die Relation zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen aus Untersuchungen, die auf den Konzepten aus Abschnitt 2.4 fußen, nur bedingt in den Ansätzen im vorliegenden Teilkapitel berücksichtigt werden. Eine Durchgängigkeit in diesem Sinne kann bei den dargestellten Arbeiten am ehesten im Bereich des Änderungsmanagements und in den Arbeiten auf Basis des Modells der PGE beobachtet werden. Ist eine solche konzeptionelle Durchgängigkeit prinzipiell gegeben, ergeben sich Herausforderungen bei der Entwicklung von Ansätzen zur Zieldefinition, Beschreibung von Lösungsrichtungen und Risikobewertung als Konsequenz der in Abschnitt 2.4 beobachteten Herausforderungen bei den Beschreibungskonzepten an sich. Hier ist insbesondere die hinreichende Formalisierung eines Beschreibungskonzepts zu nennen. Dort noch bestehende Potenziale schlagen sich auch in noch zu hebenden Potenzialen bei den Ansätzen im vorliegenden Teilkapitel nieder. In Kapitel 6 der vorliegenden Arbeit wird dieses Potenzial für die Bewertung von Variationen adressiert.

Ausgehend von der Zieldefinition in der Entwicklung eines neuen Systems, der Einschätzung von Risiken, die mit unterschiedlichen Alternativen zur Realisierung der definierten Ziele verbunden sind, und der Auswahl einer Lösung sind anschließende Entwicklungsaktivitäten methodisch zu unterstützen. Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten unterschiedliche Ansätze zur Zieldefinition und Risikoeinschätzung in der Entwicklung eines Systems mit Bezug zu bestehenden Systemen erläutert wurden, wird im nächsten Abschnitt die methodische Unterstützung von

Entwicklungsaktivitäten näher betrachtet. Dabei wird insbesondere auf Ansätze eingegangen, die Bezüge der Entwicklung eines neuen Systems zu bestehenden Systemen berücksichtigen.

## **2.6 Entwicklungsmethoden unter Berücksichtigung des Bezugs zu Referenzen**

Gegenstand der folgenden Abschnitte sind Methoden zur Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten, bei denen der Bezug zwischen der Entwicklung eines neuen Systems und bestehenden Systemen beobachtet werden kann.

Einen Rahmen zur spezifischen Zuordnung von Methoden zu Entwicklungsaktivitäten bietet das iPeM (s. Abschnitt 2.3.2) auf Grundlage der Aktivitäten der Problemlösung nach SPALTEN und den Aktivitäten der Produktentstehung. Methoden können hier zur Unterstützung mehrerer Aktivitäten dienen, beispielsweise im Falle eher unspezifischer Methoden wie Brainstorming. In den folgenden Abschnitten wird daher eine gegenüber der Struktur des iPeM zusammenfassende Gliederung genutzt, in der nach einer kurzen Einführung zur situationsspezifischen Methodenempfehlung Ansätze für folgende Bereiche näher betrachtet werden:

- Prozess- und Projektplanung auf Basis von Referenzen (Abschnitt 2.6.2)
- Lösungsfindung auf Basis von Referenzen, insbesondere Kreativitätsmethoden (Abschnitt 2.6.3)
- Produktmodellerstellung auf der Basis von Referenzen (Abschnitt 2.6.4)
- Validierung auf der Basis von Referenzen (Abschnitt 2.6.5)

Wie bereits in den Ansätzen aus Abschnitt 2.5 werden vorhandene Bezüge zwischen einem zu entwickelnden System und bestehenden Systemen nur teilweise mit den Konzepten aus Abschnitt 2.4 beschrieben.

Die Vielzahl existierender Entwicklungsmethoden stellt Entwickelnde vor die Herausforderung, situationsspezifisch passende Methoden zu identifizieren. Hierbei kann eine situationsspezifische Methodenempfehlung wie im nächsten Abschnitt beschrieben unterstützen.

## 2.6.1 Situationsspezifische Methodenempfehlung mit dem InnoFox

Mit dem InnoFox stellen ALBERS, REIß, BURSAC, WALTER UND GLADYSZ (2015) einen Ansatz zur situationsspezifischen Methodenauswahl in App-Form bereit. Die Oberfläche der App sowie zur Methodenauswahl genutzte Kriterien sind in Abbildung 2.51 zu sehen.

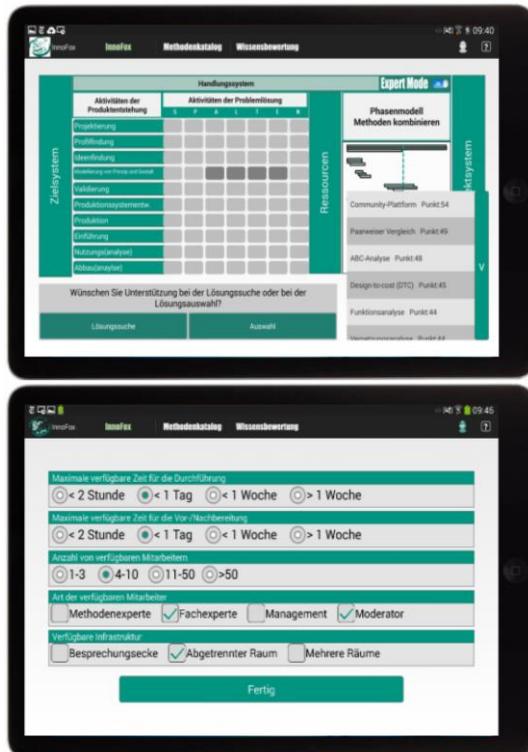


Abbildung 2.51: Situationserfassung (oben) und Ressourcenangabe (unten) im Inno-Fox als Basis für eine Methodenauswahl (Albers, Reiß et al., 2015, S. 8).

Bezüge zwischen neu entwickelten Systemen und bestehenden Systemen sind dort nicht explizit als Einflussfaktor aufgeführt, jedoch denkbare Erweiterungen. Eine Möglichkeit hierfür wäre beispielsweise, die Erfahrung der verfügbaren Personen mit dem zu entwickelnden System zu berücksichtigen. Darüber hinaus können solche Bezüge und die zu Grunde liegenden Referenzen selbst prinzipiell in einer situationsspezifisch unterschiedlichen Methodenausprägung zur Geltung kommen. Im folgenden Abschnitt werden zunächst Methoden und Prozesse zur Projektplanung auf Basis von Referenzen betrachtet.

## **2.6.2 Prozess- und Projektplanung auf Basis von Referenzen**

Wird angenommen, dass unterschiedliche Umfänge und Arten von Veränderungen gegenüber bestehenden Systemen zu unterschiedlichen Risiken führen, kann in Ansätzen, die risikobasiert ein passendes Maß an Agilität anstreben, implizit ein Bezug zu Referenzen gesehen werden. Ein Beispiel im Bereich der Software-Entwicklung ist bei BOEHM UND TURNER zu finden, die auch erkennen, dass unterschiedliche Teile eines Systems mit unterschiedlichen Risiken behaftet sein können (Boehm & Turner, 2003, S. 57–58). Einen expliziten Bezug zu technischen Änderungen stellen Ansätze dar, die sich auf Engineering Change beziehen, auf die nachfolgend eingegangen wird.

### **2.6.2.1 Strategien und Prozesse für Engineering Changes**

Der generische Engineering Change Prozess wurde bereits in Abschnitt 2.5.3.2 vorgestellt. (Jarratt et al., 2011, S. 106) stellen fest, dass dieser Prozess bei detaillierter Betrachtung deutlich unterschiedliche Ausprägungen haben kann. Ein möglicher Grund hierfür liegt in unterschiedlichen und vor allem weit gefassten Definitionen eines Engineering Change (s. Abschnitt 2.4.4). Auch Beobachtungen zur Einbindung von Stakeholdern, der Nutzung formaler Änderungsprozesse sowie zu Strategien des Änderungsmanagements bei Langer und Wilberg et al. (2012) bleiben eher genereller Natur. Befunde zu Strategien des Änderungsmanagements, zum eingeschätzten Nutzen und der tatsächlichen Nutzung sind beispielhaft in Abbildung 2.52 dargestellt.



Abbildung 2.52: Strategien zur Unterstützung des Änderungsmanagements, eingeschätzter Nutzen und tatsächliche Nutzung (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 38).

Innerhalb einzelner Unternehmen können Änderungsmanagementprozesse eventuell auf Grund von Qualitätsmanagement-Richtlinien genormt sein (Jarratt et al., 2011, S. 121). Einen eher generischer Ansatz zur Unterstützung von Engineering Changes in Produktarchitekturen stellen KISSEL UND LINDEMANN (2013) vor, die Ausgestaltung einzelner Teilschritte bleibt dort jedoch eher offen.

Weitere Ansatzpunkte zur Prozess- und Projektplanung im Änderungsmanagement können Ergebnisse von Analysen zu Auswirkungen und Fortpflanzungen von Änderungen (s. Abschnitt 2.5.3.2) darstellen.

### 2.6.2.2 Entwicklungsplanung auf Basis des Modells der PGE

Als einen möglichen Ansatzpunkt zur Prozess- und Projektplanung unterscheiden ALBERS UND HAUG ET AL. (2016, S. 235–236) verschiedene Entwicklungssituationen in der Automobilindustrie, je nachdem, ob in einer bestehenden Produktlinie eine neue Produktgeneration entwickelt wird, eine neue Variante entwickelt wird oder eine neue Produktlinie etabliert wird. Weiter stellen ALBERS, HIRSCHTER ET AL.

(2019) einen Ansatz bereit, um bedarfsgerecht ein passendes Maß an Agilität für einen Entwicklungsprozess zu finden.

Am Beispiel der Entwicklung einer Antriebsstrangkomponenten leitet ALBERS (1994b, S. 100) ab, dass Ansätze wie Kernteam-Management und Simultaneous Engineering unter anderem dann für eine erfolgreiche Entwicklung notwendig sind, wenn sich die Entwicklung auf externe Referenzen bezieht und Variationen am Produkt Auswirkungen auf das zugehörige Produktionssystem haben.

### 2.6.2.3 Planung und Entwicklung von Produktfamiliengenerationen

Wird die Entwicklung und Planung neuer Produkte zusammen mit der Variantenvielfalt innerhalb einzelner Produktgenerationen betrachtet, kann auch von Produktfamiliengenerationen gesprochen werden (s. z.B. (Küchenhof, Schwede & Krause, 2020)). In Abschnitt 2.4.5 wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich die Entstehung neuer Produktvarianten innerhalb einer Produktgeneration gleichermaßen mit dem Modell der PGE beschreiben lässt. Ansätze zur Modularisierung von Produkten (s. Abschnitt 2.2.1) für den Umgang mit Variantenvielfalt haben daher auch für die generationsübergreifende Planung großes Potenzial. Beispiele sind der Ansatz zum Umgang mit Inkonsistenzen in Produktmodellen von HANNA, SCHWENKE UND KRAUSE (2020) oder KÜCHENHOF, TABEL UND KRAUSE (2020) zum Einfluss einer, ggf. auch generationsübergreifend, zunehmenden Angebotsvielfalt auf die Produktstruktur. Explizit adressiert wird die Planung neuer Produktfamiliengenerationen beispielsweise im Ansatz von KÜCHENHOF ET AL. (2020) in Abbildung 2.53.

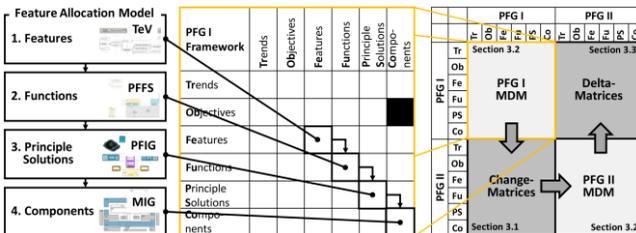


Abbildung 2.53: Ansatz zur Darstellung von Multi-Domain-Matrizen (MDM) zweier Produktfamiliengenerationen (PFG I, II) sowie Änderungs- und Delta-Matrizen als Unterstützung zur Planung von Produktfamilien generationen und Nachverfolgung von Änderungen (Küchenhof et al., 2020, S. 5).

Wie zu erkennen ist integriert der Ansatz dabei auch die Idee der DSM-basierten Analyse von Änderungsauswirkungen (s. Abschnitt 2.5.3.2).

In Fortsetzung solcher Arbeiten an der Schnittstelle mehrerer etablierter Forschungsfelder besteht nach wie vor großer Forschungsbedarf zur zukunftsrobusten Gestaltung von Produktarchitekturen (Albers, Rapp, Krause & Sankowski, 2019).

#### **2.6.2.4 Einzelne weitere Ansätze**

Ohne Zusammenhang zu den Konzepten aus Abschnitt 2.4, die den Bezug zwischen zu entwickelnden Systemen und bestehenden Systemen beschreiben, kann dieser Bezug in verschiedenen Ansätzen eher implizit und mit verschiedenen Detailgraden beobachtet werden. Einzelne werden hier genannt.

WHEELWRIGHT UND CLARK geben ausgehend von ihrer Unterscheidung von 5 Projekttypen auf Basis von Veränderung am Produkt und am zugehörigen Produktionssystem (s. Abschnitt 2.4.7) einzelne Empfehlungen, beispielsweise unerfahrene Ingenieure eher in Projekten mit geringerem Neuentwicklungsanteil einzusetzen (Wheelwright & Clark, 1992, S. 82).

GÄRTNER, ROHLER UND SCHLICK stellen mit DeSIM ein DSM-basiertes Simulationstool vor, um Auswirkungen von Änderungen auf einzelne Projektaufgaben, die Prozessstruktur und das Produkt zu analysieren und damit Projektlaufzeit zu verringern und Prozessrobustheit zu erhöhen (Gärtner et al., 2009, S. 259).

Einen ebenfalls DSM-basierten Ansatz stellen auch EPPINGER, WHITNEY, SMITH UND GEBALA vor. Dort wird mit Hilfe von Prozessabhängigkeiten unter anderem angezeigt, an welcher Stelle Informationen nicht mehr in der laufenden Entwicklung berücksichtigt werden können und daher in die Entwicklung künftiger Produktgenerationen eingehen (Eppinger et al., 1994, S. 15).

Dort, wo gegenüber bestehenden Systemen neue Elemente in der Entwicklung eines neuen Systems hinzukommen, ist die Generierung neuer Lösungen ein wichtiger Bestandteil von Entwicklungsaktivitäten. Ansätze, die darauf abzielen, können im Wesentlichen als Kreativitätsmethoden bezeichnet werden und werden im nächsten Abschnitt betrachtet.

### 2.6.3 Lösungsfindung auf Basis von Referenzen, insbesondere Kreativitätsmethoden

Ein wichtiger Teil von Kreativität ist Bekanntes in neue Funktionszusammenhänge einzubinden (Eckert, 2016). Daraus ergibt sich ein Bezug zwischen neuen Lösungen und bereits Bestehendem. Ähnlich wie in den vorangehenden Abschnitten ist bei Kreativitätsmethoden, sofern ein Bezug zu Referenzen besteht, in sehr unterschiedlichem Umfang eine Beschreibung dieses Bezugs mit Hilfe der Konzepte aus Abschnitt 2.4 zu beobachten.

Ein Beispiel, wo diese Beschreibung explizit erfolgt, ist die Methode InnoBandit nach HEIMICKE ET AL. (2018) auf Basis des Modells der PGE. Durch das gleichzeitige Vorhalten dreier Bilder in der Benutzeroberfläche in Abbildung 2.54, die einen Megatrend, einen Mikrotrend und ein potenzielles Referenzprodukt zeigen, wird der Nutzer zur Generierung neuer Produktprofile oder Produktideen stimuliert.

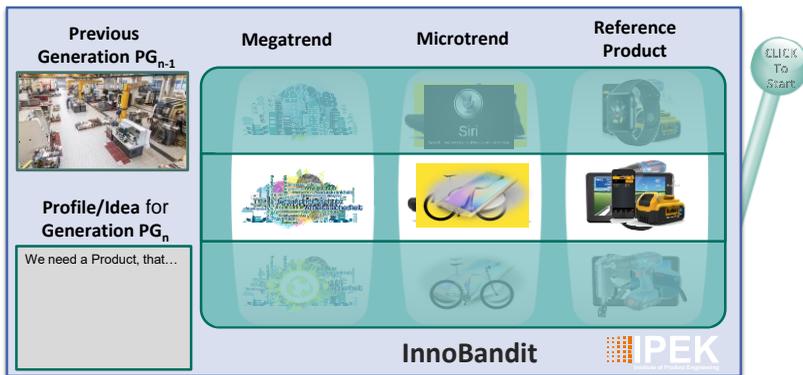


Abbildung 2.54: Benutzeroberfläche des InnoBandit, bei der durch die Verwendung potenzieller Referenzprodukte zusammen mit Mega- und Mikrotrends neue Produktprofile und -ideen stimuliert werden (Heimicke et al., 2018, S. 5, Darstellung nach Vortrag zu Heimicke et al., 2018).

Ein weiterer möglicher Ausgangspunkt für die kreative Suche nach Lösungen können Lösungsmuster (Design Patterns, s. Abschnitt 2.5.2.2 und 2.7.4) sein, die gleichzeitig eine Vereinheitlichung mentaler Modelle unterstützen können (Albers,

Deigendesch et al., 2010, S. 1539–1541). Lösungsmuster stellen dabei stets eine gewisse Abstraktion einer vorhandenen Lösung dar, um deren Übertragbarkeit auf ähnliche Problemstellungen zu ermöglichen.

Werden Referenzen direkt zur kreativen Lösungssuche verwendet, ähnlich den Referenzprodukten im InnoBandit, wird auch von Beispielen bzw. „Examples“ gesprochen, wobei HERRING, CHANG, KRANTZLER UND BAILEY (2009, S. 87) darunter jedes Artefakt verstehen, das direkt oder indirekt zu einem Design beiträgt. HERRING ET AL. (2009, S. 88–90) geben einen Überblick über verschiedene Studien zur Verwendung von Beispielen und verschiedenen Ansätzen zur Einbindung in die kreative Lösungssuche. Beispiele sind die gezielte Zusammenarbeit von Entwickelnden, die Beispiele nutzen und solche, die diese explizit nicht nutzen, um eine Vorfixierung zu vermeiden, sowie die gezielte Suche nach Beispielen aus anderen Produkt- und Marktbereichen.

Zur Ableitung neuer Lösungen ausgehend von Referenzen können Checklisten zum Einsatz kommen sowie Analogiebildung, beispielsweise auch Ansätze der Bionik (Lindemann, 2009, 30; 146; 324; Ponn & Lindemann, 2005, S. 96).

In der Technik bereits vorhandene, konkret ausgestaltete Lösungen werden, beispielsweise mit Hilfe von Konstruktionskatalogen, strukturiert und zusammen mit relevanten Auswahlkriterien als Grundlage zur Lösungsfindung bereitgestellt (Lindemann, 2016, S. 723–725; Roth, 2000). Abbildung 2.55 zeigt ein Beispiel eines Konstruktionskatalogs.

Schluß-Matrix $S_{a,b} =$	Freiheits- sinne	Montierbares Elementenpaar	Ergänzung zur Verbindung durch						
			Normalfächen- Schlüsse	Freiheit	Normalkraft - Schlüsse	Freiheit	Tangentalkraft- Schlüsse	Freiheit	
1	2	3	Nr.	4	5	6	7	8	9
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	Transl. + Rot. 1+0		1		0+0		0+0		0+0
[...]									
$\begin{pmatrix} \delta y & \delta y & \delta y & \delta y \\ 0 & 1 & \delta y & \delta y \\ 0 & 0 & \delta y & \delta y \end{pmatrix}$	5+6		9		2+0		0+0	—	
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \delta y & \delta y \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta y & \delta y \end{pmatrix}$	5+6		10		4+2	wie Feld 9.6	4+2	wie Feld 10.4	0+0

**Bild 6.37.** Überführen üblicher, montierbarer Elementenpaare zu Verbindungen durch Hinzufügen zusätzlicher Sperrungen.

Je mehr Sperrungen schon bei den Elementepaaren vorhanden sind, um so weniger Zusatzsperrungen sind nötig und um so

weniger wird das zusätzliche Glied durch die übertragenen Kräfte belastet. Gleichzeitig vereinfacht sich mit der größeren Anzahl von Sperrungen in der Regel das Fügeverfahren

Abbildung 2.55: Beispiel (Auszug) aus einem Konstruktionskatalog (Roth, 2000, S. 207).

Ähnlich zu einem Konstruktionskatalog und ebenfalls auf Basis von Referenzen möglich sind morphologische Kästen. Morphologische Kästen enthalten verschiedene Lösungsalternativen für Teile eines Problems und können so die Erarbeitung einer Gesamtlösung unterstützen (Lindemann, 2009 nach Lindemann, 2016, S. 496–497). Sowohl Konstruktionskataloge als auch morphologische Kästen setzen das Vorhandensein einer Funktionsstruktur voraus (Lindemann, 2016, S. 697). Hierfür können bestehende Systeme als Referenz dienen.

Eine Systematik zur kreativen Lösungssuche, die ebenfalls auf bestehenden Lösungen und deren Analyse aufbaut, ist die Theorie erfinderischen Problemlösens, kurz TRIZ, nach ALTSHULLER (1984) (Lindemann, 2016, S. 673).

Weniger als Kreativitätsmethoden, aber ebenfalls zur Unterstützung der Ableitung neuer Lösungen können auch Optimierungsmethoden dienen.

Auch in anderen Bereichen außerhalb der Mechatroniksystementwicklung werden Referenzen zur Ableitung neuer Lösungen genutzt. Ein Beispiel aus dem Bereich der Architektur findet sich bei DJARI UND ARROUF (2019), soll jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter vertieft werden.

Sind Lösungsideen für zu entwickelnde Bestandteile eines neuen Systems gefunden und ausgewählt, müssen diese Ideen ausgestaltet und in Form von Produktmodellen spezifiziert werden. Auch die Erstellung von Produktmodellen kann durch Referenzen unterstützt werden.

### 2.6.4 Produktmodellerstellung auf der Basis von Referenzen

Bestehende Produktmodelle können auf unterschiedliche Art und Weise in der Erstellung neuer Produktmodelle eine Rolle spielen. So können bestehende Modelle zunächst lediglich lose als Referenz beim Aufbau neuer Modelle dienen, s. beispielsweise beim Aufbau einer Funktionsstruktur bei OTTO ET AL. (2016, S. 8). In der Entwicklung von Baukästen können darüber hinaus Schnittstellen und Strukturen vordefiniert sein und eine Anforderungen an die Modellerstellung darstellen oder letztlich auch bereits bestehende Modelle direkt wiederverwendet oder als Ausgangsbasis genutzt werden (Fricke & Schulz, 2005). Ein Framework für Produktmodelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Abstraktionsgrade und Domänen als Grundlage für die Entwicklung generationsübergreifender Modelle wurde auf Basis von ALBERS UND MATTHIESEN ET AL. (2015), BURSAC (2016b) in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt.

Bei der Wiederverwendung von Modellen hängt der Umfang notwendiger Anpassungen von den beabsichtigten Änderungen am zugehörigen System ab. Aufbauend auf dem Modell der PGE beschreiben ALBERS UND MOESER (2016) die in Abbildung 2.56 gezeigten unterschiedlichen notwendigen Überarbeitungsumfänge Sichten übergreifender Modelle in Abhängigkeit der Variationsarten.

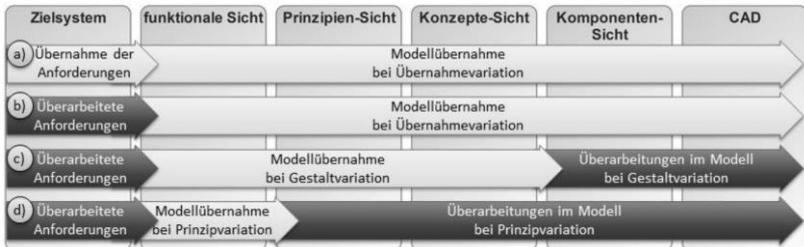


Abbildung 2.56: Notwendige Überarbeitungsumfänge in Sichten übergreifenden Produktmodellen in Abhängigkeit unterschiedlicher Variationsarten (Albers & Moeser, 2016, 6).

Eine weitere wichtige Aktivität in der Entwicklung neuer Systeme ist die Validierung. Ansätze zur Validierung unter Verwendung von Referenzen werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

### **2.6.5 Validierung auf der Basis von Referenzen**

Validierung ist die zentrale Aktivität der Produktentstehung (Albers, 2010, S. 5)<sup>18</sup>. Eine effiziente Validierung erfordert die generationsübergreifende Nutzung und Entwicklung von Validierungssystemen (Albers, Behrendt, Klingler, Reiß & Bursac, 2017; Matthiesen et al., 2017). Generationsübergreifende Validierungsaktivitäten können dabei im iPeM (s. Abschnitt 2.3.2) modelliert werden (Albers, Behrendt et al., 2017). Zur Beschreibung von Validierungssystemen dient das X-in-the-Loop-Framework von ALBERS UND DÜSER (2008); ALBERS, BEHRENDT, KLINGLER UND MATROS (2016).

Für die Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten entwickeln ALBERS, KLINGLER UND WAGNER (2014) den in Abbildung 2.57 gezeigten Ansatz auf Basis des Modells der PGE (s. Abschnitt 2.4.5). Die zu Grunde liegenden Referenzprodukte bestimmen dort, ob Technologie und Anwendungsszenario bekannt sind oder nicht.

---

<sup>18</sup> Dritte zentrale Hypothese nach ALBERS (2010).

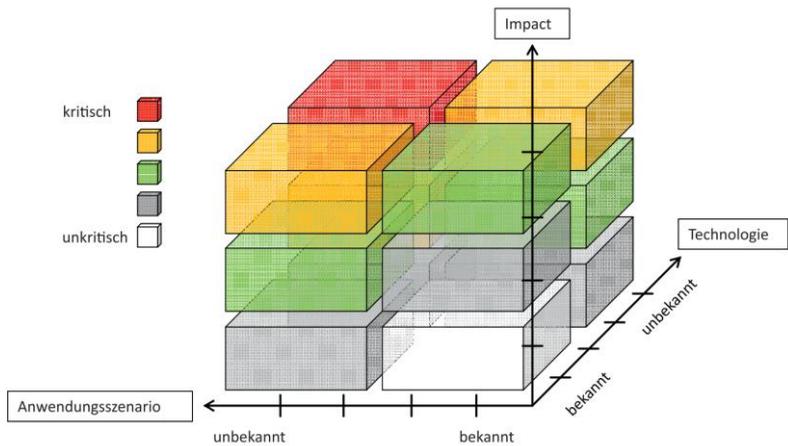


Abbildung 2.57: Ansatz zur Priorisierung von Validierungsumfängen. Ob Technologie und Anwendungsszenario bekannt sind oder nicht wird letztlich durch die zu Grunde liegenden Referenzprodukte bestimmt. (Albers, Klingler & Wagner, 2014, S. 85, übersetzte Darstellung Albers, Behrendt et al., 2016, S. 552).

Auf Grundlage des XiL-Frameworks entwickeln REINEMANN, HIRSCHTER, MANDEL, HEIMICKE UND ALBERS (2018) eine Methodik zur Produktvalidierung in Augmented Reality-Umgebungen (AR-Umgebungen). Dort werden, wie in Abbildung 2.58 zu sehen, Referenzprodukte unmittelbar als Bestandteil physisch-virtueller Prototypen genutzt.



Abbildung 2.58: Referenzprodukt als Bestandteil physisch-virtueller Prototypen bei der Validierung von Lösungskonzepten in einer Augmented-Reality-Umgebung. Das Kochfeld wird physisch dargestellt, verschiedene Abzugsformen werden virtuell modelliert (Reinemann et al., 2018, S. 11).

Ergänzend stellen ALBERS, REINEMANN, HIRSCHTER, FAHL UND HEITGER (2019) einen Ansatz zur Priorisierung, Auswahl und Konkretisierung lösungsoffener Produkteigenschaften in Synthese-Validierungszyklen auf Basis initialer Zielsysteme bereit.

In Summe ist zu erkennen, dass bestehende Systeme in verschiedener Art und Weise für die methodische Unterstützung bei der Entwicklung neuer Systeme relevant sind. Ähnlich wie bei den Ansätzen im Abschnitt 2.5 zur Zieldefinition, Ableitung von Lösungsrichtungen und Bewertung selbiger wird dabei nur teilweise auf die Beschreibungskonzepte aus Abschnitt 2.4 Bezug genommen. Elemente dieser Beschreibungskonzepte spielen mitunter weder als Faktoren für die Methodenauswahl noch für die Methodenausprägung eine Rolle. Ähnlich wie bereits bei den Ansätzen aus Abschnitt 2.5 wird damit die Nutzung von Erkenntnissen aus Untersuchungen auf Basis der Beschreibungskonzepte aus Abschnitt 2.4 für die Erforschung und Entwicklung von Methoden erschwert. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die abgestimmte oder integrierte Verwendung verschiedener Ansätze aus den Abschnitten 2.5 und 2.6 erschwert wird, wenn kein gemeinsames Beschreibungskonzept zu Grunde liegt. Gegenstand von Kapitel 7 der vorliegenden Arbeit sind daher die Entwicklung und Abstimmung von Methoden auf Basis des Modells der PGE. Hierfür werden ausgewählte Beispiele betrachtet.

Um vorhandenes Wissen in Methoden bei der Entwicklung neuer Systems tatsächlich nutzen zu können, muss dieses in geeigneter Art und Weise gespeichert und bereitgestellt werden. Dazu dienen Ansätze des Wissensmanagements, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

## 2.7 Wiederverwendung von Wissen über Referenzen ermöglichen

Die Bedeutung von Wissenstransfer und Wissensmanagement wird immer wieder betont (s. z.B. Ponn & Lindemann, 2005, S. 95; Weber & Husung, 2016, S. 99). Gleichzeitig stellen ALBERS, BURSAC, URBANEC, LÜDCKE UND RACHENKOVA (2014, S. 20) in ihrer Untersuchung zur Nutzung von Wissensmanagement-Systemen fest, dass mehr als 75% der Beschäftigten in Unternehmen mit über 5000 Mitarbeitern keinen guten Überblick über frühere Projekte haben. Bei den eingesetzten Systemen dominieren wie in Abbildung 2.59 zu sehen der Untersuchung zu Folge verschiedene Dateiablagensysteme.

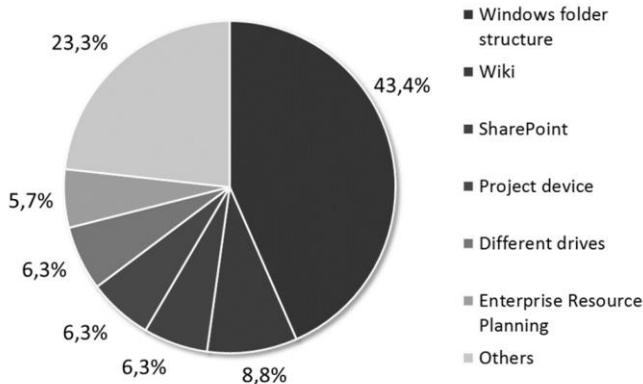


Abbildung 2.59: In Unternehmen genutzte Wissensmanagement-Systeme (Albers, Bursac et al., 2014, S. 21).

Ebenso können ECKERT ET AL. (2017, S. 37) keine empirischen Anhaltspunkte für den Praxiseinsatz von Tools auf Basis integrierter Prozess- und Produktmodelle finden, die ebenfalls das Wissensmanagement unterstützen sollen.

Für den Erfolg von Wissensmanagement-Systemen ist es essenziell, dass diese den Menschen unterstützen. Dessen zentrale Rolle wird im nächsten Abschnitt dargelegt. Insgesamt kann im Folgenden das umfangreiche Feld des Wissensmanagements nur initial betrachtet werden. Dabei werden vor allem auf den Bezug zwischen bestehenden Systemen und zu entwickelnden Systemen eingegangen.

### **2.7.1 Bedeutung des Menschen für Wissenstransfer**

„Der Kernerfolgswert in der Produktentwicklung ist nicht die Methodik, das Management oder die Informationstechnik, sondern der Mensch als Individuum und als Team.“ (Albers, 2003). Diese zentrale Rolle des Menschen schlägt sich auch in den Prinzipien des ASD nieder (s. Abschnitt 2.3.3).

In verschiedenen Fallbeispielen, unter anderem aus dem Bereich des Engineering Change Management wird für den Wissenstransfer aus der Entwicklung bestehender Systeme in die Entwicklung eines neuen Systems die Rolle von direkt Projektbeteiligten hervorgehoben (beispielsweise bei Clarkson et al., 2001; Flanagan, Eckert & Clarkson, 2007; Specht, 2018). Allerdings ist allein schon aus praktischen Gründen dieser personengebundene Wissenstransfer nicht immer möglich. Damit kommt weiteren Ansätzen des Wissensmanagements Bedeutung zu (Albers & Gausemeier, 2012, S. 28).

### **2.7.2 Ansätze im Engineering Change Management**

Die Bedeutung der Wiederverwendung von Modellen und das Potenzial, das die Speicherung abgearbeiteter Engineering Changes bietet, werden im Engineering Change Management erkannt (Ahmad et al., 2013, S. 241; Clarkson et al., 2001, S. 8).

Allerdings stellen LANGER UND WILBERG ET AL. (2012, S. 33) in ihrer Erhebung zum Änderungsmanagement fest, dass Nachbereiten und Lernen noch verhältnismäßig schwach ausgeprägt sind.

Ein hilfreicher Ansatz ist der Untersuchung zu Folge Storytelling, also ein personengebundener Wissenstransfer (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 32).

Ein weiterer, jedoch dokumentenbasierter Ansatz sind „Engineering Checksheets“ (ECS) (Stenholm, Catic & Bergsjö, 2019). Dabei handelt es sich im Wesentlichen um erweiterte Checklisten, die anhand von Wissen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten Informationen dazu enthalten, was zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einer bestimmten Situation zu tun ist, weshalb das zu tun ist und welche alternativen Umsetzungsmöglichkeiten es gibt. Darüber hinaus enthalten ECS Links zu potenziell relevanten bestehenden Artefakten oder Personen. Die Struktur eines ECS ist beispielhaft in Abbildung 2.60 dargestellt. (Stenholm et al., 2019, S. 8)

Status (NVA) Valid for br Valid for sit Revision da		Engineering checklist for: COMPONENT/SYSTEM			
Y/ N	No	Know-what	Know-why	Know-how	References
		Activity/decision/concern/issue	Why?		Links
Define needs and		Define needs and requirements			
		To add rows: select this entire row -> right click -> "insert"			
		Define conceptual solutions and balance toward requirements			
Define conceptual					
		To add rows: select this entire row -> right click -> "insert"			
		Design detailed solution			
Design detailed					
		To add rows: select this entire row -> right click -> "insert"			
		Validate and verify detailed solution			
Validate and verify detailed					
		To add rows: select this entire row -> right click -> "insert"			

Abbildung 2.60: Auszugsweise Struktur eines beispielhaften Engineering Checksheet (Stenholm et al., 2019, S. 13).

Im Rahmen des Model Based Systems Engineering (MBSE) wird der Übergang von dokumentenbasiertem Entwickeln auf modellbasiertes Entwickeln angestrebt (s. Abschnitt 2.2.3). Entsprechende Ansätze auf Basis des Modells der PGE werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

### 2.7.3 Referenzproduktmodelle im Modell der PGE

Modelle mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden entsprechend dem in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Framework können in unterschiedlichem Rahmen – beispielsweise produktgenerations- oder domänenübergreifend – wiederverwendet werden (Albers, Matthiesen et al., 2015, S. 188–191).

Auf dieser Grundlage entwickeln ALBERS UND SCHERER ET AL. (2015); SCHERER (2016) einen Ansatz zur Weitergabe von Lösungswissen in der Baukastenentwicklung mit Hilfe von Referenzmodellen, die den Gestalt-Funktion-Zusammenhang von C&C<sup>2</sup>-A-Modellen in der Modellierungssprache SysML darstellen.

Die Weitergabe von Lösungswissen in weiter abstrahierter Form kann beispielsweise mit Hilfe von Lösungsmustern erfolgen.

#### **2.7.4 Lösungsmuster (Design Patterns, Solution Patterns)**

Die Definition von Lösungsmustern (Design Pattern) geht auf ALEXANDER (Alexander, Ishikawa & Silverstein, 1977; Alexander, 1980) in der Architektur zurück. Dieser Definition folgend sind Lösungsmuster standardisierte, abstrahierte Beschreibungen von wiederkehrenden Problemen und zugehörigen Lösungsansätzen. Die Abstraktion erlaubt die Übertragbarkeit auf ähnliche Problemstellungen und lässt gleichzeitig ausreichend Freiraum, den skizzierten Lösungsansatz auf die spezifischen Aspekte einer bestimmten Situation kreativ zu adaptieren. Über die Weitergabe von Wissen hinaus unterstützen Lösungsmuster auch die Kommunikation in der Entwicklung und die Herausbildung kohärenter mentaler Modelle. (Albers & Deigendesch, 2010, S. 1538–1541)

WEBER UND HUSUNG (2016, S. 103–104) verstehen Lösungsmuster (“solution pattern“) als eine bestimmte Verknüpfung verschiedener Produktmerkmale und -eigenschaften, die in unterschiedlichem Detailgrad vorliegen können. Sie verstehen die meisten Entwicklungsprozesse als Kombination bekannter und bewährter Lösungsmuster (Weber & Husung, 2016, S. 107).

Abbildung 2.61 zeigt auszugsweise das Beispiel eines Lösungsmusters nach dem Vorschlag von ALBERS UND DEIGENDESCH (2010).

**Non-functional surface for injection and ejection**

**Table of Contents**

- Non-functional surface for injection and ejection
- Context
- Problem
- Solution
- Consequences
- Chances & Risks
- Chances
- Risks
- Related patterns
- Examples
- References

---

**Context** [Edit](#)

In microtechnology, the same principles and solution statements cannot be used as in the macroworld due to changed conditions. Many technologies cannot be used in smaller dimensions, or with significant restrictions on the production of microparts or systems. The primary-shaping technology is an economic alternative for manufacturing of microcomponents.

---

**Problem** [Edit](#)

The machines and equipment for injection moulding have mostly macrodimensions. Ejection pins are usually made of hardened steel. When the microcomponent is ejected from the mold, the pin leaves a mark, which is compared to macrocomponents relatively bigger. This leads to malfunction in case the affected surface is a functional one. The injection point (gate) is in macrodimensions negligible, but it is not in microsystems. Injection and subsequent ejection result in elevated or rough gate marks. A subsequent processing of microcomponents (e.g. sanding) is difficult to be realized, because of the minimal dimensions and the materials used (e.g. ceramics).

---

**Solution** [Edit](#)

The problem can be avoided by adding special surfaces to the design, that are reserved to injection or ejection. The part shall be designed in a way, that the ejection pin mark area or the gate mark area are non-functional surfaces (i.e. working surfaces only during manufacturing, but not during operation). The desired functions will not be impaired. Even in the case of a local damage, functional losses can be avoided.

[Edit](#)

Abbildung 2.61: Auszug aus einem Lösungsmuster aus dem Bereich der Mikrotechnologie (Albers & Deigendesch, 2010, S. 1543).

WEBER UND HUSUNG (2016, S. 103) nennen als Beispiele für Lösungsmuster unter anderem auch Eigenschaftsbibliotheken, Maschinenelemente, Kataloge, Diagramme und Tabellen. Im Vergleich zu einem Lösungsmuster wie in Abbildung 2.61 wird damit nicht unbedingt immer das Wissen zur Begründung des gewählten Lösungsansatzes transferiert. Sofern es transferiert wird, geschieht dies in abstrahierter bzw. generalisierter Form.

Im Gegensatz dazu zielt der Ansatz im nächsten Abschnitt darauf ab, Entscheidungen, die zu einer bestimmten Lösung geführt haben, spezifisch für einzelne Projekte nachvollziehbar zu machen.

### 2.7.5 DRed (Design Rationale Editor)

Das Ziel des Design<sup>19</sup> Rational editor (DRed) nach AURISICCHIO UND BRACEWELL (2013), BRACEWELL, AHMED UND WALLACE (2004) ist es, Entscheidungen und den

<sup>19</sup> Bei Aurisicchio und Bracewell (2013, S. 2) auch „**Decision** Rationale editor“

Zusammenhang zwischen verschiedenen Artefakten in einem Entwicklungsprozesse nachvollziehbar zu machen. Hierfür wird eine eigene Software-Oberfläche bereitgestellt, die übliche Tools ergänzt und vorhandene Dateien und Strukturen verlinkt. In diesem Sinne ergibt sich eine Landkarte des Datei-Verzeichnisses einer Entwicklung. (Bracewell et al., 2004, S. 2–6)

Abbildung 2.62 zeigt in DRed verwendete grafische Elemente zur Visualisierung verschiedener Entscheidungen und Abhängigkeiten.

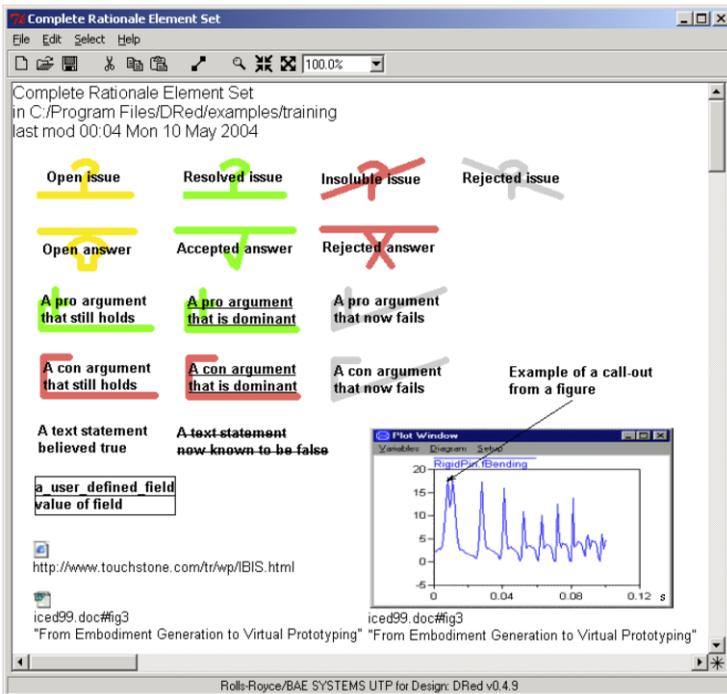


Abbildung 2.62: Elemente zur Dokumentation von Entscheidungsfindungen und Zusammenhängen in DRed (Bracewell et al., 2004, S. 3).

Ein Beispiel einer mit den Elementen aus Abbildung 2.62 aufgebauten Darstellung ist in Abbildung 2.63 zu sehen.

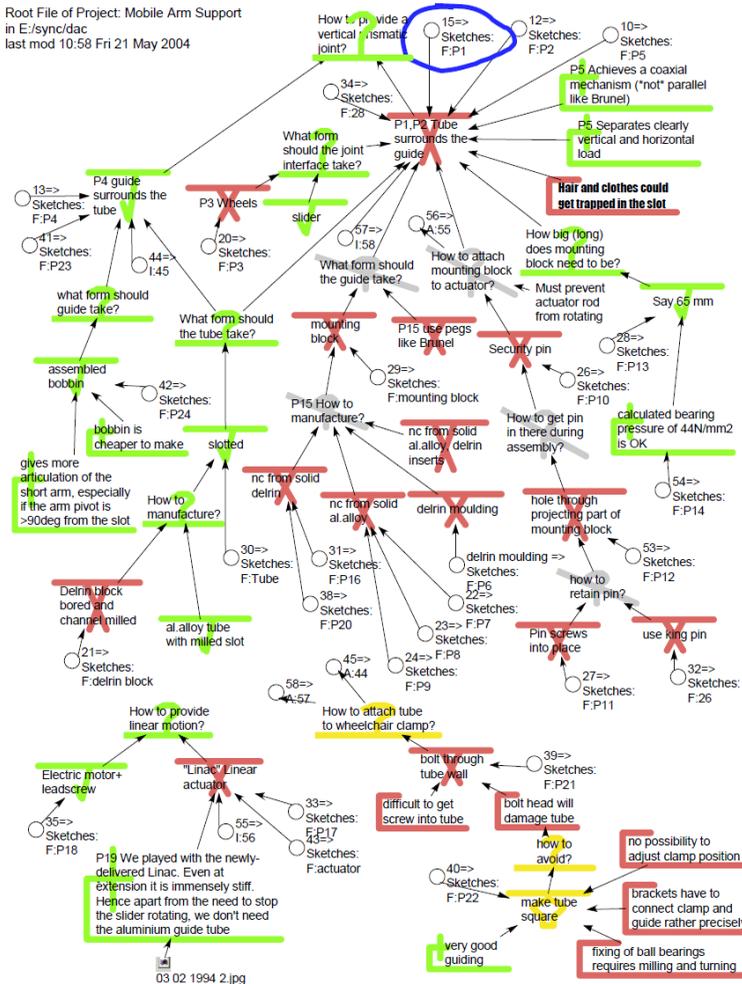


Abbildung 2.63: Beispiel für die Dokumentation von Entscheidungsfindung und Zusammenhängen in der Entwicklung eines Systems mit DRed (Bracewell et al., 2004, S. 9).

Mit DRed dokumentierte Zusammenhänge können prinzipiell auch genutzt werden, um mögliche Auswirkungen von Änderungen zu analysieren (Bracewell et al., 2004, S. 4). Eine zu erwartende Herausforderung dabei ist, dass sich durch Änderungen prinzipiell nicht nur die referenzierten Elemente, sondern auch deren Verknüpfungen auch in größerem Umfang ändern können (vgl. auch die Ausführungen zu Change Propagation in Abschnitt 2.5.3.2).

Die Verknüpfung von Prozess- und Produktwissen wird auch in verschiedenen weiteren Ansätzen aufgegriffen. Eine Auswahl weiterer Ansätze, die dem Wissensmanagement zum Transfer von Wissen über bestehende Systeme in die Entwicklung neuer Systeme zugerechnet werden können, wird im nächsten Abschnitt zum Abschluss dieses Teilkapitels vorgestellt.

## **2.7.6 Beispiele weiterer Ansätze und zunehmend relevanter Themenfelder**

TANG, ZHU, TANG, XU UND HE (2010) schlagen, ähnlich zu Ansätzen des Engineering Change Management (Abschnitt 2.5.3.2) einen DSM-basierten Ansatz zum Wissenstransfer vor, wobei Verknüpfungen zwischen Elementen mit Wissen angereichert werden.

Im Zusammenhang mit Life Cycle Engineering plädieren BERNARD, LABROUSSE UND VÉRON (2002) für die Speicherung verschiedener Modelle in einem generellen Referenzsystem.

Ein weiteres Datenmodell, das ebenfalls die Speicherung von sowohl Elementen des Entwicklungsergebnisses als auch des -prozesses ermöglichen soll, entwickeln ABRAMOVICI UND CHASIOTIS (2002) als Grundlage für den Globalen Informations- und Dokumentations-Assistenten (GIDAS).

In jüngerer Zeit gewinnen auch Konzepte Digitaler Zwillinge an Bedeutung. Ein Digitaler Zwilling ist im Allgemeinen ein „virtuelles Modell z.B. eines Prozesses, eines Produkts oder einer Dienstleistung, welches die reale und virtuelle Welt verbindet.“ (Grösser, 2017). Digitale Zwillinge bieten prinzipiell das Potenzial Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus in die Entwicklung neuer Systeme zu transferieren. Ein weiteres Themenfeld, das sich mit der gezielten Entfernung („Vergessen“) von vorhandenen Wissens-elementen beschäftigt, ist schließlich das Feld des Intentional Forgetting. Ein Beispiel für einen Beitrag aus diesem Gebiet ist KESTEL ET AL. (2017). Dort kann der Aufbau von eigenen Ontologien beobachtet werden, die aber ebenfalls wiederum nur begrenzten oder gar keinen Bezug zu den Konzepten aus Abschnitt 2.4 haben.

## 2.8 Fazit und Auswahl eines Ansatzes für die weitere Arbeit

In den Abschnitten 2.1 bis 2.3 wurden die Grundlagen des Innovationsbegriffs, sowie der System- und Prozessmodellierung beschrieben. Es wurde dargelegt, dass Innovationen und die zu Grunde liegenden Systeme stets neue Elemente beinhalten, gleichzeitig aber auf Bestehendem aufbauen.

In Abschnitt 2.4 wurden verschiedene Konzepte vorgestellt, die darauf abzielen, den Zusammenhang zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen zu beschreiben. In den Abschnitten 2.5 bis 2.7 wurden Ansätze beschrieben für die Zieldefinition in der Entwicklung eines neuen Systems, die Lösungsfindung, die Abschätzung von Risiken, die methodische Unterstützung und Wissensmanagement. Auch in den beschriebenen Ansätzen wird der Zusammenhang zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen berücksichtigt. Allerdings wird dort in unterschiedlichem Umfang und teilweise gar nicht auf die Konzepte zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen aus Abschnitt 2.4 Bezug genommen. Eine durchgängig gemeinsam genutzte Basis begünstigt gleichwohl die abgestimmte und integrierte Verwendung von Ansätzen aus den verschiedenen Gebieten. Hierzu soll mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag geleistet werden.

Dafür muss zunächst untersucht werden, welcher der Ansätze aus Abschnitt 2.4 das größte Potenzial für diese Zielsetzung und damit als Grundlage der weiteren vorliegenden Arbeit bietet. Im Folgenden werden die Dimensionen für diese Analyse abgeleitet und anschließend die Ansätze aus Abschnitt 2.4 entlang dieser Dimensionen eingeordnet. Dabei wird zunächst die Dimension genannt, anschließend erläutert und mögliche Ausprägungen beschrieben:

**Variable Kombination aus Übernahme und Neuem.** Die Ansätze aus Abschnitt 2.4 zeigen in ihrer Gesamtheit, dass ein neues System in einem breiten Spektrum eine variable Kombination von Neuem und Übernommenem sein kann. Diese Variabilität muss durch einen Beschreibungsansatz abgebildet werden können. Bei bestehenden Ansätzen, die sowohl Übernahme als auch Neues berücksichtigen, kann dies der Fall sein; es ist aber auch möglich, dass Ansätze eine feste Kombination aus beidem beschreiben oder einen der beiden Anteile fokussieren.

**Interne und externe Wissens Elemente.** Neu entwickelte Systeme eines Unternehmens können sowohl auf Bestehendem aus demselben Unternehmen als auch externen Elementen aufbauen. Beispiele sind die möglichen Elemente, mit denen in der C-K-Theorie (Abschnitt 2.4.1) Konzepte erweitert werden können oder Wettbewerbsprodukte, die im Modell der PGE (Abschnitt 2.4.5) ebenfalls Referenzprodukte

sein können. Ein geeigneter Beschreibungsansatz muss beide Aspekte berücksichtigen. Es ist jedoch möglich, dass Ansätze nur eines von beidem betrachten, der Fokus also nur auf internen oder externen Wissensselementen liegt.

**Verschiedene Detailgrade der Systembeschreibung.** Neues und die Übernahme von Bestehendem können in der Entwicklung neuer Systeme in unterschiedlichem Detailgrad an deren Elementen verortet werden. Beispiele sind die unterschiedlichen Umfänge und möglichen Betrachtungstiefen bei technischen Änderungen (Abschnitt 2.4.4) oder die teilsystemweise Betrachtung von Variationen im Modell der PGE (Abschnitt 2.4.5). Dort kommen vor allem das strukturelle und das hierarchische Konzept der Systemtheorie der Technik zum tragen (s. Abschnitt 2.2.1). Ein geeigneter Beschreibungsansatz sollte diese unterschiedlichen Detailgrade erfassen können. Bestehende Ansätze beziehen sich womöglich jedoch mitunter auf feste Betrachtungstiefen oder Strukturen.

**Formalisierungsgrad.** Die Modellelemente eines Beschreibungsansatzes können unterschiedlich klar definiert (im Sinne von benannt) und messbar sein. Bei einem geeigneten Beschreibungsansatz ist beides der Fall. Für bestehende Ansätze wird, je nachdem, ob beide, nur eines oder keines der zwei genannten Kriterien gegeben ist, der Formalisierungsgrad als hoch, mittel oder niedrig eingeschätzt.

**Übergreifende Anwendbarkeit.** Im Rahmen der Produktentstehung sind, ausgedrückt in den Modellbestandteilen des iPeM (Abschnitt 2.3.2) die Produkt-, die Produktionssystem-, die Validierungssystem- und die Strategieentwicklung gleichermaßen relevant. Die verschiedenen Ansätze in Abschnitt 2.5 zur Beschreibung und Definition von Zielen sowie Untersuchungen zu Risiken, beispielsweise zu Auswirkungen von technischen Änderungen zeigen, dass alle zuvor genannten Bereiche sowohl im Hinblick auf die Zieldefinition für die Entwicklung eines neuen Systems relevant sein können, als auch hinsichtlich Entwicklungsrisiken. Die Anwendbarkeit vorhandener Beschreibungsansätze kann hier variieren, von der Fokussierung einzelner Bereiche bis hin zur übergreifenden Anwendbarkeit. Gesucht wird ein Ansatz, der nach Möglichkeit eine bereichsübergreifende Anwendbarkeit erwarten lässt. Darüber hinaus wird beispielsweise anhand des Modells der PGE (Abschnitt 2.4.5) oder auch den verschiedenen Skalen für Iterationen (Abschnitt 2.4.6) gezeigt, dass Inkremente innerhalb eines Entwicklungsprojekts prinzipiell mit den gleichen Mechanismen beschrieben werden können wie Bezüge zwischen Entwicklungsprojekten. Ein geeigneter Ansatz kann beides mit den gleichen Elementen abbilden.

**Adressierte Forschungsbereiche.** Die Beschreibungsansätze werden in den Gebieten aus den Abschnitten 2.5 bis 2.7 in unterschiedlichem Umfang aufgegriffen oder fokussieren die verschiedenen Gebiete in unterschiedlichem Umfang. Gesucht

wird ein Ansatz, der die Bereiche Ontologie, Chancen- & Risikomanagement, Methoden und Wissensmanagement möglichst durchgängig adressiert. Bei der Einordnung eines Beschreibungsansatzes ist prinzipiell nicht auszuschließen, dass vorhandene Arbeiten mit Bezug zu dem jeweiligen Beschreibungsansatz in einzelnen Bereichen in den Abschnitten 2.5 bis 2.7 nicht enthalten sind. Als Orientierung zur Einordnung dienen daher im Zweifelsfall Hinweise zur Zielsetzung der Beschreibungsansätze in den zu Grunde liegenden Veröffentlichungen.

**Potenzielle Anwendungsdomänen.** Abschließend erfolgt eine Einschätzung, ob die betrachteten Beschreibungsansätze ausgewählte Domänen, beispielsweise Software oder mechatronische Systeme, fokussieren oder prinzipiell domänenübergreifend anwendbar sind.

In Tabelle 5 und Tabelle 6 werden diejenigen Ansätze aus Abschnitt 2.4, die explizit den Zusammenhang zwischen bestehenden und zu entwickelnden Systemen beschreiben, in die abgeleiteten Dimensionen eingeordnet.

Tabelle 5: Einordnung der Beschreibungsansätze aus Abschnitt 2.4 entlang der abgeleiteten Dimensionen (1/2), in Teilen in Anlehnung an (Pffaff, 2020, S. 35–62).

Gute Übereinst.	C-K-Theorie (Abschnitt 2.4.1)	Design Reuse (Abschnitt 2.4.2)	Techn. Vererbung (Abschnitt 2.4.3)
Teilweise Übereinst.			
Geringe Übereinst.			
<b>Variable Kombination von Übernahme und Neuem</b>	<b>Variable Kombination:</b> Je nach logischem Status in einem der Räume verortet	<b>Fokus Übernahme:</b> Neues implizit, nicht ausgeschlossen	<b>Variable Kombination:</b> Mutation und Selektion in versch. Anteilen
<b>Interne und externe Wissens Elemente</b>	<b>Intern &amp; extern:</b> Neue Elemente zur Konzept- und Knowledge-Erweiterung	<b>Intern &amp; extern:</b> Kompatibilität zu Reuse-System vorausgesetzt	<b>Intern:</b> Datenweitergabe von einer Generation zur nächsten
<b>Verschiedene Detailgrade der Systembeschreibung</b>	<b>Fokus jeweils auf einzelne</b> Konzepte und Knowledge, Hierarchien begrenzt	<b>Variabel:</b> Verschiedene Systemebenen, bis hin zu Datenmodellen	<b>Fest:</b> Übertragene Daten
<b>Formalisierungsgrad</b>	<b>Hoch:</b> Räume und Operatoren als zentrale Modellelemente	<b>Gering:</b> Für Design Reuse keine Definition konstituierender Elemente	<b>Hoch:</b> Definition über Analogie zwischen Natur und Technik
<b>Übergreifende Anwendbarkeit</b> (Produkt, Produktions-, Validierungssystem, Strategie; in und zwischen Projekten)	<b>Fokus auf Produkt; potenziell auf weitere Systeme</b> übertragbar; in und zw. Projekten	<b>Alle:</b> Prinzipiell keine Einschränkung in und zw. Projekten	<b>Fokus Produkt-, Produktionssystem</b> in und zw. Projekten
<b>Adressierte Forschungsbereiche</b> (Ontologie, Chancen- & Risikomanagement, Methoden, Wissensmanagement)	<b>Fokus auf Ontologie:</b> „Universelle Design-Theorie“	<b>Fokus Wissens- bzw. Datenmanagement</b>	<b>Fokus Ontologie, Wissensmanagement</b>
<b>Potenzielle Anwendungsdomänen</b>	<b>Domänenübergreifend</b>	<b>Domänenübergreifend</b>	<b>Fokus Mechatronik</b>

Tabelle 6: Einordnung der Beschreibungsansätze aus Abschnitt 2.4 entlang der abgeleiteten Dimensionen (2/2), in Teilen in Anlehnung an (Pfaff, 2020, S. 35–62).

Gute Übereinst.	<b>Engineering Change (EC)</b> (Abschnitt 2.4.4)	<b>Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung</b> (Abschnitt 2.4.5)	<b>Iterationen</b> (Abschnitt 2.4.6)
Teilweise Übereinst.			
Geringe Übereinst.			
<b>Variable Kombination von Übernahme und Neuem</b>	<b>Variable Kombination:</b> Durch unterschiedlichen EC-Umfang; teilweise aber explizite Abgrenzung zu „new product development“ o.Ä.	<b>Variable Kombination:</b> Verschiedene Variationsarten in versch. Anteilen	<b>Variable Kombination:</b> Verschieden „Iterationsumfänge“ denkbar
<b>Interne und externe Wissensselemente</b>	<b>Intern:</b> Betrachtung von EC ausgehend von vorhandenem Element	<b>Intern &amp; extern:</b> Eigene & externe Referenzprodukte möglich	<b>Intern:</b> Iteration auf Basis von vorliegendem internem Stand
<b>Verschiedene Detailgrade der Systembeschreibung</b>	<b>Variabel:</b> EC kann mit unterschiedlicher Systemgranularität betrachtet werden	<b>Variabel:</b> Systemtheorie als Basis	<b>Variabel:</b> Keine feste Betrachtungsebene definiert
<b>Formalisierungsgrad</b>	<b>Mittel:</b> EC prinzipiell definiert, Definition aber sehr weit gefasst	<b>Hoch:</b> Variationsarten & Referenzprodukte als zentrale Modellelemente, klar definiert	<b>Gering:</b> Zwar Taxonomie, Dimensionen und Kriterien allerdings unscharf
<b>Übergreifende Anwendbarkeit</b> (Produkt, Produktions-, Validierungssystem, Strategie; in und zwischen Projekten)	<b>Fokus auf Produkt;</b> potenziell auf weitere Systeme übertragbar; Auswirkungen werden bereichsübergreifend betrachtet in und zw. Projekten	<b>Fokus auf Produkt;</b> potenziell auf weitere Systeme übertragbar; Auswirkungen werden bereichsübergreifend betrachtet in und zw. Projekten	<b>Fokus auf Produkt;</b> potenziell auf weitere Systeme übertragbar; in und zw. Projekten
<b>Adressierte Forschungsbereiche</b> (Ontologie, Chancen- & Risikomanagement, Methoden, Wissensmanagement)	<b>Potenziell alle:</b> Alle Bereiche werden im Feld adressiert	<b>Potenziell alle:</b> Alle Bereiche werden im Feld adressiert	<b>Potenziell alle</b>
<b>Potenzielle Anwendungsdomänen</b>	<b>Domänenübergreifend</b>	<b>Domänenübergreifend</b>	<b>Domänenübergreifend</b>

Die Tabellen lassen erkennen, dass die gewünschten Ausprägungen in einzelnen Zieldimensionen für sich genommen meist durch mehrere der betrachteten Beschreibungsansätze erfüllt werden. Über alle Dimensionen hinweg sind bei den einzelnen Ansätzen jedoch unterschiedliche Schwerpunkte zu erkennen. So ist die C-K-Theorie sehr formal, fokussiert jedoch die Bereitstellung einer Ontologie. Weniger formal ist die sehr offene Definition eines Engineering Change sowie der Elemente des Design Reuse und die Beschreibung von Iterationen. Beim Konzept des Design Reuse stehen Daten- und Wissensmanagement im Fokus. Ähnlich beim Konzept der technischen Vererbung mit Fokus auf Produkt- und Produktionssystem, wobei variable Detailgrade der Systembeschreibung auf Basis der Analogiebildung zur Genetik herausfordernd sind.

In der Gesamtschau des Ergebnisses wird das Modell der PGE als derjenige Ansatz mit dem höchsten Potenzial als Grundlage für die weitere Arbeit betrachtet und ausgewählt.

Die Grundhypothesen des Modells der PGE wurden darüber hinaus in einer Befragung von ALBERS UND HAUG ET AL. (2016) überwiegend zustimmend beurteilt (s. Abbildung 2.64).

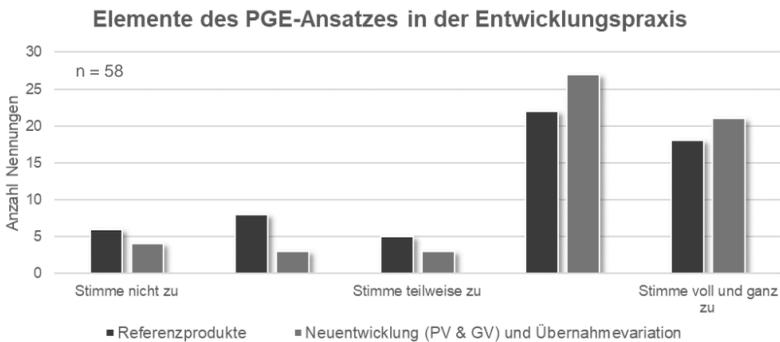


Abbildung 2.64: Evaluation der zwei Grundhypothesen des Modells der PGE durch eine Praxisbefragung (n = 58) (Albers, Haug et al., 2016, S. 232).

Auf Basis des Modells der PGE und dem in diesem Kapitel beschriebenen Stand der Forschung wird im nächsten Kapitel die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit konkretisiert und der Forschungsbedarf wird spezifiziert.



## 3 Forschungsbedarf und Zielsetzung

Für fortdauernden wirtschaftlichen Erfolg sind Unternehmen auf Innovationen angewiesen. Den Innovationen, die für die vorliegende Arbeit von Interesse sind, liegt dabei eine Systementwicklung zu Grunde. Über die verschiedenen Ansätze im Stand der Forschung hinweg ist in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Form die Beschreibung eines Zusammenhangs neuer Systeme zu bereits bestehenden Systemen erkennbar. Dieser Zusammenhang ist dadurch gekennzeichnet, dass die neuen Systeme, ausgehend von den bestehenden Systemen, durch eine Kombination von Übernahme von Elementen und neuen oder neu entwickelten Elementen entstehen. Die bestehenden Systeme dienen so als Referenz.

Für die Planung, Steuerung und methodische Unterstützung der Systementwicklung stellen sich davon ausgehend die Fragen, welche Systeme Ausgangspunkt einer Entwicklung sein sollen, wo in welchem Umfang neu entwickelt werden soll und wie der zugehörige Entwicklungsprozess in Abhängigkeit dieser Faktoren zu gestalten ist.

In der Entwicklungspraxis werden auf diese Fragen gezwungenermaßen Antworten gefunden. Im Hinblick auf systematische und wissenschaftlich fundierte Antworten werden im Stand der Forschung jedoch zahlreiche Bedarfe genannt.

Zur Adressierung dieser Bedarfe bietet das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015), wie in Abschnitt 2.8 dargestellt, das größte Potenzial. Es bildet daher den Rahmen der vorliegenden Arbeit und der folgenden Abschnitte.

### 3.1 Forschungsbedarf

Aus den im Abschnitt 2.4 bis 2.6 beschriebenen Forschungsgebieten heraus werden verschiedene Bedarfe formuliert. Diese Bedarfe lassen sich auf Basis des Modells der PGE nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) im Wesentlichen einem der drei folgenden Punkte zuordnen:

- I. Formalisierte und umfassende Beschreibung der Entwicklung neuer Systeme ausgehend von Referenzen durch Variationen auf Basis des Modells der PGE<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Wird in der vorliegenden Arbeit im Folgenden von „Variationen“ gesprochen, so sind die im Modell der PGE beschriebenen Aktivitäten in Form von Übernahme-,

- II. Bewertung von Variationen auf Basis des Zusammenhangs zwischen Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken einerseits und den zu Grunde liegenden Referenzen und den Variationen andererseits
- III. Abstimmung der methodischen Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten auf die jeweilige Variationsart und die jeweils zu Grunde liegenden Referenzen

Diese Punkte bauen, wie in Abbildung 3.1 dargestellt aufeinander auf: Beobachtungen aus der Praxis werden zunächst durch das Modell der PGE greifbar gemacht. Damit ist die Grundlage gelegt für eine empirische Untersuchung von Variationen auf Basis des Modells der PGE. Notwendig hierfür ist ein formalisiertes Modell. Aufbauend auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen können Variationen bewertet und festgelegt werden. Unterstützung bietet dabei ein Framework zum Vorgehen. Ausgehend von der Festlegung von Variationen kann spezifische methodische Unterstützung geplant werden. Voraussetzung hierfür ist, dass Methoden variations-spezifisch eingesetzt werden können.

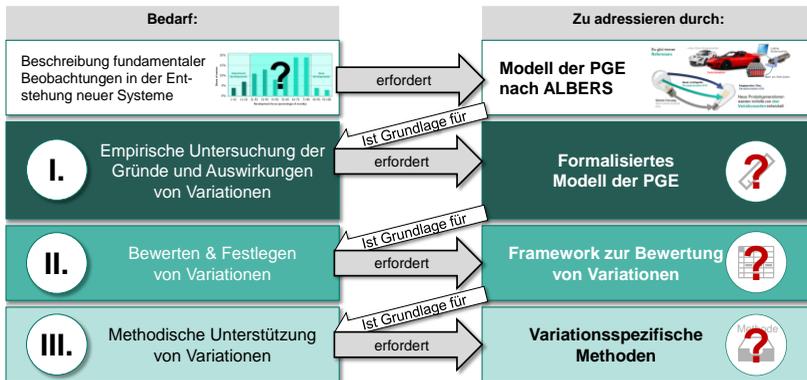


Abbildung 3.1: Bereiche, in denen Forschungsbedarf besteht. Bedarf im Bereich I kann nur auf Grundlage eines passenden Beschreibungsmodells adressiert werden. Bedarfe in den Bereichen II und III ergeben sich aus unzureichenden Lösungsansätzen im Bereich I. Darstellung mit

Gestalt- und Prinzipvariation gemeint. Sofern der Begriffsverwendung an einzelnen Stellen andere Auffassungen zu Grunde liegen, wird dies explizit genannt.

Elementen aus Abbildung 2.26 und Abbildung 2.64 (zu Grunde liegende Referenzen s. dort).

Bedarfe aus Bereich II und III lassen sich oftmals auf Defizite in Bereich I zurückführen. Erfolgsentscheidend in Bereich I ist wiederum ein passendes zu Grunde liegendes Beschreibungsmodell, in der vorliegenden Arbeit das Modell der PGE nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Die Bedarfe in den einzelnen Bereichen werden nachfolgend weiter ausgeführt.

### **Formalisierte und umfassende Beschreibung der Entwicklung neuer Systeme auf der Basis von Referenzen durch Variationen für eine empirische Untersuchung der Gründe und Auswirkungen von Variationen**

Eine formalisierte Beschreibung eines Phänomens, die insbesondere auch die Messung relevanter Einflussgrößen erlaubt, ist eine notwendige Grundlage zur empirischen Untersuchung des Phänomens (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 19–24). Eine auf dem Modell der PGE aufbauende formalisierte Beschreibung der Entstehung neuer Systeme auf der Basis von Referenzen ist notwendig, um die Bedarfe unter Punkt II und III auf empirischer Grundlage adressieren zu können. Gleichzeitig sollte es mit dieser Beschreibung möglich sein, relevante Zusammenhänge für die empirischen Untersuchungen möglichst umfassend abzudecken. Darüber hinaus sollte diese Formalisierung durch die Gültigkeit für verschiedene Branchen der Systementwicklung eine gute potenzielle Übertragbarkeit gewonnener Erkenntnisse gewährleisten.

Fehlt eine gemeinsame ontologische Basis, so lassen sich Erkenntnisse aus verschiedenen Forschungsgebieten nur bedingt zusammenführen. Die Übertragbarkeit und aufeinander abgestimmte Verwendung von Methoden sind außerdem zunächst unklar. So merken OTTO ET AL. für Methoden zur Entwicklung von Produktarchitekturen an: „In the design research community, each method has typically been developed independently of other methods, and it is not clear if and how various methods could be used jointly“ (Otto et al., 2016, S. 1).

ALBERS adressiert im Gegensatz dazu diese grundlegende Herausforderung entwicklungsmethodischer Forschung, indem „eine entsprechende Ontologie und eine ganzheitliche Sicht zur Verfügung zu stellen, (...) seit mehr als zwei Jahrzehnten Forschungskern der von mir definierten KaSPro-Karlsruher Schule für Produktentwicklung (ist)“ (Albers im Vorwort zu (Gladysz, 2019)). Zentrale Modelle der KaSPro sind das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers & Meboldt, 2007; Albers, Reiß et al., 2016), der C&C<sup>2</sup>-Ansatz (Albers & Matthiesen, 2002; Albers & Wintergerst, 2014; Grauberger et al., 2019) sowie das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) als „Kernmodell zur

Beschreibung der Vorgehensweise bei der Definition neuer Produkte“ (ALBERS im Vorwort zu (Gladysz, 2019)).

In Abschnitt 2.4 kann man erkennen, wie ohne eine derartige Ontologie innerhalb einzelner Gebiete bisher auch kaum formalisierte Beschreibungen vorhanden sind. Die Feststellung von (Sivaloganathan & Shahin, 1999), hier in Bezug auf das Feld des Design Reuse, gilt stellvertretend nach wie vor: „little attempt has been made to formalize the elements that constitute design reuse“ (Sivaloganathan & Shahin, 1999, S. 644)

### **Bewertung von Variationen**

Die unterschiedlichen Variationsarten im Modell der PGE – Prinzip-, Gestalt- und Übernahmevariation (PV, GV, ÜV) – bzw. deren Anteile in der Entwicklung einer neuen Systemgeneration sind Planungs- und Steuergrößen zur Realisierung von ausreichendem Innovationspotenzial zu wirtschaftlichen Bedingungen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 6).

Um diese Planungs- und Steuergrößen nutzen zu können, müssen sowohl Gründe für als auch Auswirkungen von Variationen mit Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken verknüpft werden und es muss ein Rahmen zur Bewertung und Festlegung von Variationen gegeben werden. Die Bewertung und Festlegung von Variationen geht mit zwei Herausforderungen einher: Die relevanten Bereiche von Auswirkungen, beispielsweise im Produkt, Produktionssystem und Validierungssystem, müssen erfasst werden. Weiterhin muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass mitunter mehrere solcher Veränderungen zeitgleich in verschiedenen, miteinander wechselwirkenden Teilen des Produkts auftreten können (vgl. (Jarratt et al., 2011, S. 119)). Ansätze wie CLARKSON ET AL. (2001) dienen lediglich der Abschätzung von Auswirkungen einer begrenzten Anzahl an Änderungen in einem begrenzten Bereich, zum Beispiel der Produktstruktur.

Nicht zuletzt als Folge der fehlenden gemeinsamen Ontologie in mehreren Gebieten im Stand der Forschung bestehen dort verschiedene Herausforderungen, die jedoch auf den Bedarf, Variationen zu bewerten und festzulegen, zurückzuführen sind. So stellen beispielsweise LANGER UND WILBERG ET AL. für das Änderungsmanagement fest: „Unterstützungsbedarfe können hier zum einen hinsichtlich der frühen Identifikation von Änderungsbedarfen sowie der Analyse von Ursachen abgeleitet werden. Zum anderen stellen insbesondere die Abschätzung von Änderungsauswirkungen sowie die Unterstützung transparenter Entscheidungen wesentliche Handlungsfelder dar.“ (Langer, Wilberg et al., 2012, S. 36)

Bisherige Arbeiten auf Grundlage des Modells der PGE zeigen das Potenzial, diesen Bedarf auf Basis des Modells zu adressieren, beispielsweise (Albers, Walch &

Bursac, 2016) mit einer Methode zur Bewertung alternativer Lösungen bei der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase eines Automobil-Zulieferers (s. Abschnitt 2.5.3.3).

### **Abstimmung der methodischen Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten auf die jeweilige Variationsart und die zu Grunde liegenden Referenzen**

Durch die Variationsarten im Modell der PGE werden in ihrem Charakter unterschiedliche Aktivitäten bei der Entwicklung einer neuen Systemgeneration explizit differenziert (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 4–5). Weiterhin werden Grundlage und Ausgangspunkt dieser Aktivitäten als Referenzen expliziert.

Methoden zur Entwicklungsunterstützung müssen diesen unterschiedlichen Charakteren von Entwicklungsaktivitäten gerecht werden. Der Grund für den unzureichenden Einsatz von Entwicklungsmethoden ist unter anderem darin zu suchen, „dass die Methoden oft nicht die Realität abbilden und den Bezug zur Produktgenerationsentwicklung mit seinen Referenzprodukten nicht berücksichtigen“ (ALBERS im Vorwort zu Bursac, 2016b).

Bestehende Bedarfe in verschiedenen im Stand der Forschung beschriebenen Gebieten können in diesem Sinne verstanden und eingeordnet werden. So werden im Änderungsmanagement bzw. Engineering Change beispielsweise unter anderem die Effizienz von Änderungsprozessen, die situative Adaption der Prozesse und passende Kommunikation und Koordination zwischen Beteiligten als verbesserungswürdig angesehen (vgl. Langer, Wilberg et al., 2012; Jarratt et al., 2011, S. 112).

Auch Bedarfe aus dem Wissensmanagement, die die Wiederverwendung von Wissen betreffen, lassen sich diesem Themenkomplex zuordnen. Das auszugsweise Ergebnis einer Umfrage unter führenden Forschern der Design Society (n = 15) zeigt in Abbildung 3.2, dass mit der Wiederverwendung von Wissen verschiedene Herausforderungen verbunden sind<sup>2</sup>.

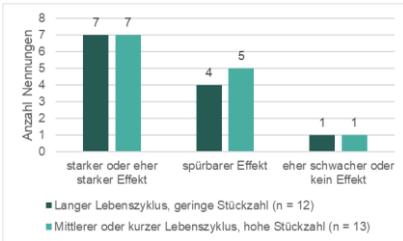
---

<sup>2</sup> Gesamtes Ergebnis der Umfrage im Anhang A

Bitte bewerten Sie, inwieweit die aufgeführten **Faktoren die Effizienz von Entwicklungsprozessen beeinträchtigen**, z.B. in Bezug auf die Gesamtentwicklungszeit, die Anzahl der notwendigen Iterationen oder die (vermeidbaren) Kosten. Berücksichtigt wird die Entwicklung von drei Produktkategorien.

**Bewertung der Auswirkung** (z.B. Risiko,...) **von partiellen Änderungen** im Vergleich zum vorhandenen Informationssatz

Unsicherheit bezüglich des **Gültigkeitsbereichs des Wissens**



(in Diagrammen mittlerer und kurzer Lebenszyklus, sowie bejahende und verneinende Antwortalternativen von fünfstufiger Skala zusammengefasst)

Abbildung 3.2: Auszugsweises Ergebnis einer Umfrage (eigene Erhebung) unter Forschern im Bereich Design Research zu Faktoren, die Effizienz und Effektivität von Entwicklungsprozessen beeinträchtigen (übersetzt).

Die gezeigten Einflussfaktoren „Analyse der Auswirkung partieller Veränderungen“ und „Unsicherheit hinsichtlich des Gültigkeitsbereichs vorhandenen Wissens“ können direkt mit der auf bereits existierenden Systemen basierenden Entwicklung neuer technischer Systeme in Zusammenhang gebracht werden.

ALBERS UND MOESER stellen fest, dass die bisherige Verknüpfung von Informationen in gängigen Werkzeugen und Ansätzen „es insbesondere im Rahmen der Entwicklung einer neuen Produktgeneration [erschwert] die Tragweite von Variationen (PV, GV und/oder ÜV) abzuschätzen, weil die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen die zu der Referenzgestalt geführt haben, nicht direkt zugänglich sind.“ (Albers & Moeser, 2016).

Zusammengefasst führen die unzureichende Übereinstimmung vieler Beschreibungsmodelle zu in der Praxis beobachtbaren Phänomenen bezüglich der Beziehung neuer technischer Systeme zu Referenzen sowie eine unzureichende Formalisierung vorhandener Modelle zu einer unzureichenden empirischen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der genannten Beziehung einerseits mit Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken andererseits. Darüber hinaus führt dies zu einer unzureichenden Berücksichtigung solcher Zusammenhänge in der Entwicklungsplanung und -steuerung sowie einer unzureichenden Berücksichtigung dieser

Zusammenhänge bei der methodischen Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten. Bereits JARRATT ET AL. merken in diesem Sinne an: "Additional methods for engineering change might require a collective shift in the academic community to recognise that change is the predominant paradigm of engineering rather than ab initio design" (Jarratt et al., 2011, S. 121).

## 3.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Variationen auf der Basis von Referenzen zur Realisierung von Innovationspotenzialen mit Ursachen von Entwicklungsrisiken in Beziehung zu setzen und so die Bewertung, Festlegung und methodische Unterstützung von Variationen zu ermöglichen.

Schlüsselfaktor (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 21) ist dabei eine formalisierte Beschreibung auf Basis des Modells der PGE. Sie liefert die messbaren Variablen, um Zusammenhänge zwischen innovationsgetriebenen Entwicklungsaktivitäten und Entwicklungsrisiken empirisch zu untersuchen.

Aufbauend darauf soll gezeigt werden, wie ein Vorgehen zur Planung und Steuerung von Entwicklungsaktivitäten in der PGE aussehen kann, das, ausgehend von den Fallbeispielen der vorliegenden Arbeit, prinzipiell auf die Entwicklung in verschiedenen Branchen adaptiert werden kann. Eine wesentliche Rolle spielen hier die Festlegung und Bewertung von Variationen und Referenzen.

Abschließend soll beispielhaft gezeigt werden, wie die gewonnenen Erkenntnisse zu einer gezielten methodischen Unterstützung bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen beitragen können.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum Modell der PGE, indem eine Formalisierung zentraler Elemente als Grundlage für weitere Forschungsarbeiten vorgeschlagen wird. Darüber hinaus wird durch die beschriebenen Vorgehensweisen zur Planung und Steuerung sowie der methodischen Unterstützung von Variationen auf Basis von Referenzen ein direkter Nutzen für die Entwicklungspraxis erreicht.

## 3.3 Forschungshypothesen und Grundannahme

Grundannahme (Blessing & Chakrabarti, 2009, 239ff.)<sup>3</sup> für die vorliegende Arbeit ist, dass die Grundhypothesen im Model der PGE geeignet sind, wichtige Phänomene

---

<sup>3</sup> Dort wird die Bedeutung von Grundannahmen und Paradigmen sowie deren Explikation in lesenswerter Weise dargestellt

bei der Entwicklung neuer Produkte zu beschreiben. Damit ergeben sich die zentrale Forschungshypothese (Blessing & Chakrabarti, 2009, 92f.) der Arbeit in Abbildung 3.3 sowie die dort gezeigten drei untergeordneten Hypothesen, die mit den drei Bereichen aus Abbildung 3.1 korrespondieren:

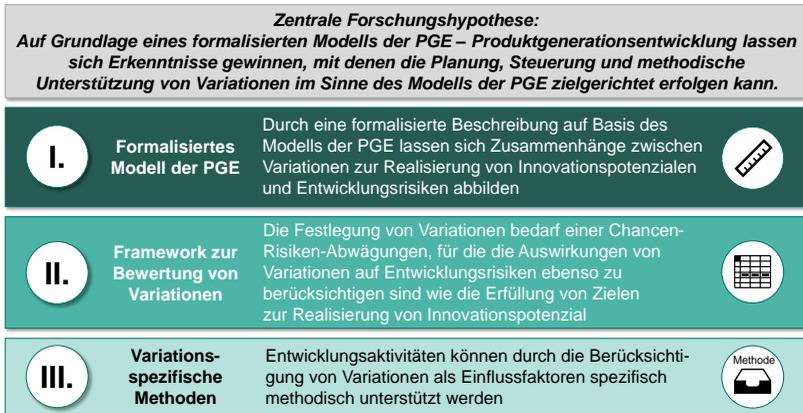


Abbildung 3.3: Zentrale Forschungshypothese der Arbeit sowie untergeordnete Forschungshypothesen für die drei Teilbereiche der Arbeit auf Basis von Abbildung 3.1.

### 3.4 Forschungsfragen

Jede der genannten Forschungshypothesen führt auf mehrere Forschungsfragen (FF). Diese ergeben sich zunächst entsprechend den typischerweise unterscheidbaren Forschungsaktivitäten einer entwicklungsmethodischen Arbeit: Empirische Studie zu einer bestimmten Problemstellung, Entwicklung eines Lösungsansatzes und Evaluation desselben (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18).

Für ein formalisiertes Modell ist zunächst zu klären, welche Zusammenhänge abgebildet werden sollen. Anschließend muss eine passende Formalisierung gefunden werden, die dann evaluiert werden kann. Es ergeben sich so die folgenden Forschungsfragen:

	<b>Formalisiertes Modell der PGE</b>
	FF I.1: Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Variationen sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken?
	FF I.2: Wie kann eine Formalisierung auf Basis der Grundhypothesen der PGE aussehen, die die empirische Untersuchung dieser Zusammenhänge ermöglicht?
	FF I.3: Inwieweit lassen sich mit den vorgeschlagenen Formalisierungen die beobachteten Zusammenhänge zwischen Variationen sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken erfassen?

Aufbauend auf dem entwickelten Modell kann ein Framework zu Bewertung von Variationen entwickelt und evaluiert werden. Dafür werden im ersten Schritt bestehende Ansätze untersucht. Dies schlägt sich in folgenden Forschungsfragen nieder:

	<b>Framework zur Bewertung von Variationen</b>
	FF II.1 Inwieweit werden die Zusammenhänge zwischen Variationen sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken derzeit bei der Festlegung von Variationen berücksichtigt?
	FF II.2 Wie können die Zusammenhänge zwischen Variationen sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken bei der Festlegung von Variationen berücksichtigt werden?
	FF II.3 Inwieweit eignet sich das vorgeschlagene Rahmenwerk für die Festlegung von Variationen?

Sind Variationen bewertet und festgelegt, ist ihre Durchführung spezifisch methodisch zu unterstützen. Soweit dies nicht durch bereits bestehende Ansätze gegeben ist, sind Adaptionen notwendig, die nachfolgend zu evaluieren sind. Für den dritten Bereich der Arbeit ergeben sich daraus die unten gezeigten Forschungsfragen.

	<b>Variationsspezifische Methoden</b>
	FF III.1 Inwieweit ist die Planung und methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten bisher auf unterschiedliche Variationen abgestimmt?
	FF III.2 Wie können Entwicklungsaktivitäten und ihre methodische Unterstützung auf unterschiedliche Variationsarten abgestimmt werden?
	FF III.3 Inwieweit eignen sich die vorgeschlagenen Vorgehensweisen zur zielgerichteten Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten in der PGE?

Im nächsten Kapitel ist das Vorgehen zur Beantwortung der hier entwickelten Forschungsfragen beschrieben.



## 4 Forschungsmethodik

Nachfolgend wird ein Überblick über die Struktur der vorliegenden Arbeit gegeben, die sich aus der forschungsmethodischen Vorgehensweise ergibt. Hierfür wird die Arbeit in 4.1 zunächst in ein Rahmenwerk eingeordnet, das entwicklungsmethodische Forschung<sup>1</sup> projektübergreifend und über einen längeren Zeithorizont strukturiert. In 4.2 wird die Struktur der Arbeit selbst ausgehend vom methodischen Rahmen der Design Research Methodology (DRM) (Blessing & Chakrabarti, 2009) begründet. Abschnitt 4.3 gibt abschließend einen Überblick über die im Einzelnen eingesetzten Forschungsmethoden und -umgebungen.

### 4.1 Einordnung der Arbeit

Das Ziel entwicklungsmethodischer Forschung ist es, zum einen die Entwicklung neuer Systeme zu verstehen und zum anderen diesen Entwicklungsprozess zu unterstützen und zu verbessern (Eckert, Clarkson & Stacey, 2003, S. 1; Blessing & Chakrabarti, 2009, 4f.). Diese beiden Ziele sowie die damit verbundenen Forschungsaktivitäten stehen notwendiger Weise in Wechselwirkung miteinander. Die Aktivitäten von der empirischen Untersuchung eines Phänomens im Entwicklungsprozess bis hin zur Verbesserung des Prozesses können sich über mehrere Forschungsprojekte, wie beispielsweise im Rahmen einer Dissertation, und über einen entsprechend langen Zeithorizont erstrecken. Um einzelnen Forschungsprojekten einen Rahmen zu bieten und den Weg zum Gesamtziel zu strukturieren, haben ECKERT ET AL. (2003) die in Abbildung 4.1 gezeigte „Spiral of Applied Research“ vorgeschlagen. Aus der gezeigten Darstellung ergibt sich eine Spirale unter Berücksichtigung dessen, dass die Einführung einer bestimmten Methode, eines Prozesses oder Ähnlichem zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses auf neue Fragestellungen führen kann und die verschiedenen Stufen mehrfach durchlaufen werden. Die Zeitachse kann als dritte Dimension senkrecht zur Darstellung in Abbil-

---

<sup>1</sup> In der englischsprachigen Literatur wird hier zumeist von „Design Research“ gesprochen (vgl. auch (Eckert, Clarkson und Stacey (2003)); (Blessing und Chakrabarti (2009))). Dabei wird unter „Design“ prinzipiell nicht nur die Entwicklung mechatronischer System-of-Systems verstanden, wie sie im Fokus der vorliegenden Arbeit steht, sondern jegliche gestalterische Tätigkeit, beispielsweise auch Industrie-Design

dung 4.1 somit als die Steigungsrichtung der Spirale angesehen werden. Selbst innerhalb eines Durchlaufes sind Iterationen und ein wiederholtes Durchlaufen der unterschiedlichen Stufen prinzipiell möglich (Eckert et al., 2003, S. 6). Abbildung 4.1 zeigt ausgehend von den Forschungshypothesen aus Abschnitt 3.3 auch, wie die Teile der vorliegenden Arbeit eingeordnet werden können.

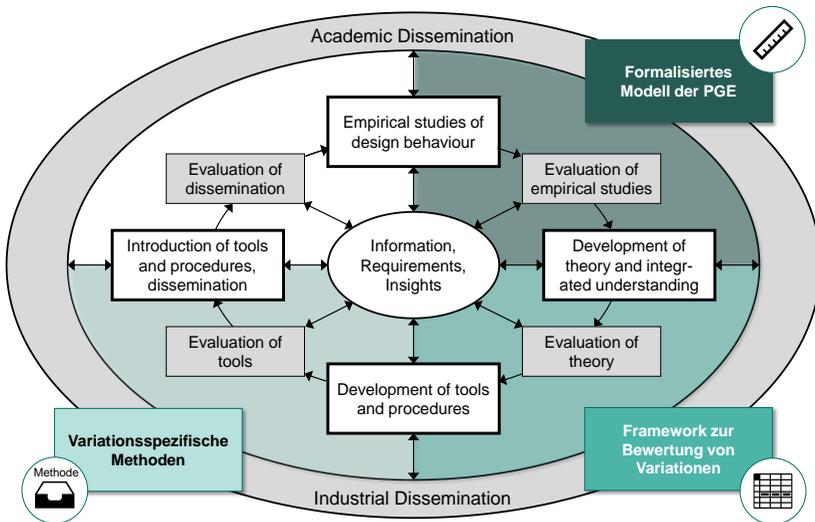


Abbildung 4.1: Spiral of Applied Research nach Eckert et al. (2003, S. 4) mit Verortung der einzelnen Teile der vorliegenden Arbeit.

Die Untersuchungen zum **formalisierten Modell der PGE** (Kapitel 5) mit verschiedenen Fallstudien, der Analyse bestehender Ansätze zur Beschreibung der Beziehung neuer Systeme zu Referenzen sowie der Formalisierung auf Basis der Grundhypothesen des Modells der PGE selbst ist den Aktivitäten „Empirical studies on design behaviour“, „Evaluation of empirical studies“ und „Development of theory and integrated understanding“ wie von ECKERT ET AL. beschrieben zuzuordnen (Eckert et al., 2003, S. 5). Dies gilt auch für die Darstellung des Zusammenhangs von Variationen auf Basis von Referenzen sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken.

Das **Framework zur Bewertung und Festlegung von Variationen** (Kapitel 6) adressiert ebenfalls „Development of theory and integrated understanding“, indem

bestehende Methoden auf die Integration dieser Zusammenhänge hin untersucht werden. Vorschläge für ein Vorgehen zur Berücksichtigung dieser Zusammenhänge bei der Bewertung und Planung von Variationen und dabei zu verwendender Referenzen in Kapitel 6 sind in den Bereichen „Evaluation of theory“ und „Development of tools and procedures“ (Eckert et al., 2003, S. 5) verortet. **Variationsspezifische Methoden** (Kapitel 7) schließlich erfassen „Development of tools and procedures“, „Evaluation of tools“ und „Introduction of tools and procedures, dissemination“ (Eckert et al., 2003, S. 5).

Die Übergänge der einzelnen Bereiche sind nicht immer trennscharf und eine Überschneidung von Themen ist möglich. Die Struktur nach Abbildung 4.1 gibt eine Orientierung, um die Inhalte der Arbeit in einem übergeordneten Rahmen zu verorten.

## 4.2 Forschungsstadien und Struktur der Arbeit

Die Strukturierung der Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit orientiert sich am Rahmenwerk der Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING UND CHAKRABARTI (2009). In Abschnitt 4.2.1 werden Ausprägung und Inhalt der einzelnen Forschungsstadien der vorliegenden Arbeit aufbauend auf der DRM beschrieben. Die Struktur der vorliegenden Arbeit ist anschließend in Abschnitt 4.2.2 dargestellt.

### 4.2.1 Forschungsstadien der Arbeit

Entwicklungsmethodische Forschung ist geprägt durch die Komplexität des Forschungsgegenstandes, die nicht zuletzt auf die Beteiligung vieler verschiedener Disziplinen zurückzuführen ist (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 9). Im Hinblick auf Forschungsmethodik führt dies zu der Frage, ob für entwicklungsmethodische Forschung bedarfsgerecht auf Ansätze aus den unterschiedlichen Disziplinen zugegriffen und diese ggf. in einem passenden Rahmen integriert werden sollen oder ob eine eigenständige Methodik erforderlich ist (Eckert et al., 2003, S. 7). Als Methodik im letztgenannten Sinne kann die Design Research Methodology (DRM) von BLESSING UND CHAKRABARTI betrachtet werden (Eckert et al., 2003, S. 7).

Ziel der DRM ist eine Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Ansätze und Methoden für die „formulation and validation of models and theories about the phenomenon of design, as well as the development and validation of support founded on these models and theories, in order to improve design practice, management, education and their outcomes“ (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 9).

BLESSING UND CHAKRABARTI (2009) unterscheiden zu diesem Zweck die in Abbildung 4.2 gezeigten Forschungsstadien.

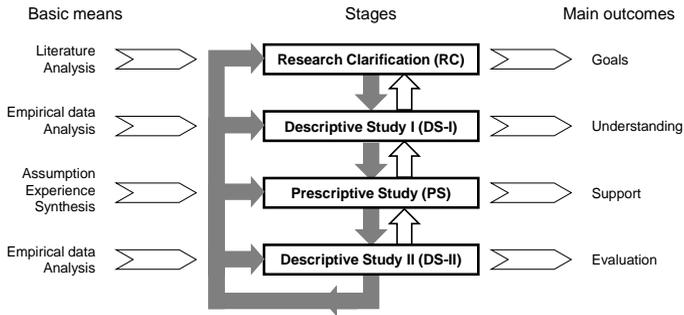


Abbildung 4.2: Forschungsstadien nach der DRM einschließlich Zweck und Hauptergebnissen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15). Abkürzungen für die Stadien wurden ergänzt.

Abbildung 4.3 zeigt die Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit entlang der Stadien aus Abbildung 4.2. Die Stadien sind im Folgenden zusammengefasst beschrieben. Auf die dabei verwendeten Forschungsmethoden wird in Abschnitt 4.3 näher eingegangen.

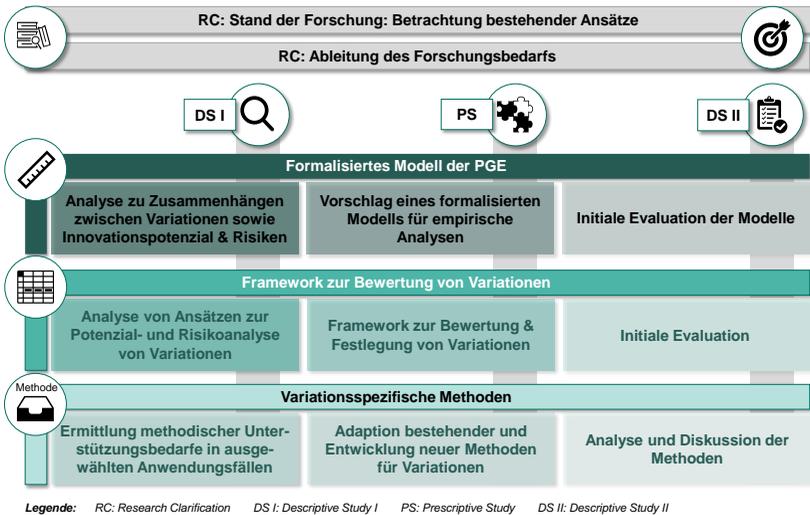


Abbildung 4.3: Einordnung der Forschungsfragen (verkürzt) und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in die Stadien der DRM nach Blessing und Chakrabarti (2009).

Zur **Klärung des Forschungsgegenstands** („Research Clarification“) wurden verschiedene Ansätze gesichtet, die wenigstens teilweise die Entwicklung neuer technischer Systeme auf der Basis von Referenzen durch Variationen zumindest dem Inhalt nach beschreiben, selbst, wenn andere Begrifflichkeiten verwendet werden. Weiterhin wurde untersucht, welche Ansätze zur Zieldefinition in Entwicklungsprojekten, der Bewertung alternativer technischer Lösungen und der methodischen Unterstützung verschiedener Entwicklungsaktivitäten Referenzen und Variationen als Einflussfaktoren berücksichtigen – wiederum zumindest dem Inhalt nach. Ein Ergebnis dieser Aktivitäten ist der Stand der Forschung sowie als Fazit die Auswahl des Modells der PGE als Grundlage für die vorliegende Arbeit. Ein weiteres Ergebnis ist in Kapitel 3 „Forschungsbedarf und Zielsetzung“ das initiale Zielsystem für das Forschungsvorhaben (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 41). Abbildung 4.3 zeigt drei Hauptteile der Arbeit, die wiederum jeweils aus den drei Stadien Deskriptive Studie I (DS I), Präskriptive Studie (PS) und Deskriptive Studie II (DS II) bestehen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 41).

#### Formalisiertes Modell der PGE

Im ersten **DS I**-Teil zu einer **formalisierten Beschreibung** der Zusammenhänge von Variationsarten auf Basis von Referenzen und Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken werden zunächst anhand von selbst untersuchten und in der Literatur beschriebenen Fallbeispielen sowie weiterführender Literatur ebendiese Zusammenhänge analysiert. Es wird so ein vertieftes Verständnis geschaffen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 41). Weiter wird untersucht, welche zusätzlichen Faktoren von Bedeutung sein können.

In einer **PS** wird mit den gewonnenen Erkenntnissen die Beschreibung von Variationen, Referenzsystemelementen sowie deren Ursachen und Auswirkungen formalisiert und in einem Variablenmodell für empirische Untersuchungen zusammengestellt.

In der anschließenden **DS II** wird das vorgeschlagene Modell initial evaluiert. Dabei werden zentrale Modellelemente durch Untersuchungen in weiteren Fallbeispielen sowie den Abgleich mit in der Literatur beschriebenen Zusammenhängen zwischen Variationen auf der Basis eines Referenzsystems und Innovationspotenzial und Risiken, sowohl in Bezug auf Anwendbarkeit als auch Nutzen des Modells evaluiert (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 41).

#### Framework zur Bewertung von Variationen

In der **DS I** zum zweiten Bereich, der **Bewertung und Festlegung von Variationen** auf der Basis von Referenzen, wird zunächst analysiert, inwieweit die im ersten Bereich gefundenen Zusammenhänge bisher in Ansätzen zur Zieldefinition und Risiko einschätzung von Entwicklungsprojekten tatsächlich berücksichtigt sind.

Die **PS** adressiert dabei erkannte Bedarfe durch die Entwicklung von Vorgehensunterstützung für die Planung und Steuerung von Entwicklungsprojekten auf Grundlage der Zusammenhänge aus dem ersten Bereich. Dabei sind Ansätze zur Ableitung und Bewertung alternativer technischer Lösungen eingeschlossen. Wichtig ist hierbei die Übertragbarkeit des Frameworks auf verschiedene Branchen durch Adaption.

Die **DS II** in diesem Bereich enthält initiale Evaluationen der entwickelten Ansätze. Weiter werden dort Hinweise zur künftigen Verwendung abgeleitet.

#### Variationsspezifische Methoden

In der **DS I** im dritten Bereich schließlich wird anhand ausgewählter Anwendungsfälle untersucht, inwieweit die **methodische Unterstützung** von Entwicklungsaktivitäten bisher auf die verwendeten Referenzen und durchzuführenden Variationen abgestimmt ist oder diese als wichtige Einflussfaktoren berücksichtigt sind. Passende Anwendungsfälle für diese Untersuchungen können direkt in der verschränk-

ten System- und Methodenforschung am IPEK gefunden werden. Diese Anwendungsfälle empfehlen sich besonders durch den guten unmittelbaren Zugang zu beteiligten Forschern und Entwicklern<sup>2</sup>.

Im Rahmen der **PS** in den betreffenden Anwendungsfällen werden unter Nutzung der zuvor in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bestehende methodische Ansätze adaptiert oder neue Ansätze entwickelt.

In der **DS II** in diesem Bereich findet eine Evaluation der entwickelten Ansätze vorwiegend initial in Form einer Diskussion der Ansätze und der erwarteten Auswirkungen statt.

Die einzelnen Stadien werden nicht rein sequenziell durchlaufen, sondern auch parallel und in Iterationen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 11). Bei den verschiedenen Stadien unterscheiden BLESSING UND CHAKRABARTI außerdem unterschiedliche Ausprägungen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18): Eine rein literaturbasierte Studie wird als "review-based" bezeichnet, eine "comprehensive study" beinhaltet darüber hinaus durch den Forschenden selbst generierte Ergebnisse. Eine Studie, die am Ende einer Arbeit ein neues Stadium zwar anfänglich betrachtet, dort aber nicht in die Tiefe geht, ist hingegen eine „initial study“. In der vorliegenden Arbeit erlaubt der gegebene Rahmen nach der tiefgehenden Behandlung der Stadien DS I und PS wie oben beschrieben in der Regel nur eine initiale Betrachtung von DS II. Aus der Kombination der unterschiedlichen Stadien in Abbildung 4.2 und den beschriebenen Ausprägungen sowie aus logischen Überlegungen ergeben sich für eine Forschungsarbeit die in Abbildung 4.4 dargestellten möglichen Forschungstypen. Die vorliegende Arbeit ist dort mit den oben beschriebenen Ausprägungen bei Typ 5 einzuordnen.

---

<sup>2</sup> Soweit im Rahmen der Arbeit hier die männliche oder weibliche Form gewählt wird, sind selbstverständlich jeweils beide Geschlechter gemeint.

Research Clarification	Descriptive Study I	Prescriptive Study	Descriptive Study II
1. Review-based	→ Comprehensive		
2. Review-based	→ Comprehensive	→ Initial	
3. Review-based	→ Review-based	→ Comprehensive	→ Initial
4. Review-based	→ Review-based	→ Review-based Initial/ Comprehensive	→ Comprehensive
5. Review-based	→ Comprehensive	→ Comprehensive	→ Initial
6. Review-based	→ Review-based	→ Comprehensive	→ Comprehensive
7. Review-based	→ Comprehensive	→ Comprehensive	→ Comprehensive

Abbildung 4.4: Mögliche Forschungstypen im DRM-Framework basierend auf den unterschiedlichen Forschungsstadien und ihren Ausprägungen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18).

### 4.2.2 Struktur der Arbeit

Abbildung 4.5 zeigt die Struktur der vorliegenden Arbeit entlang den beschriebenen Forschungsstadien. Die Darstellung der Forschungsinhalte der Stadien erfolgt im Text notwendigerweise sequenziell, sie wurden jedoch teilweise parallel und iterativ durchlaufen (vgl. Abschnitt 4.2.1).

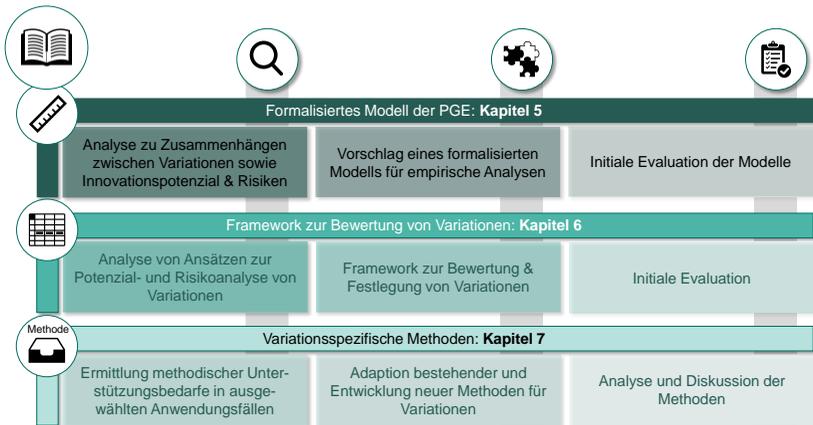


Abbildung 4.5: Struktur der Arbeit mit Verortung der Ergebnisse aus Abbildung 4.3 in den Kapiteln der vorliegenden Arbeit.

Im nächsten Abschnitt wird ein Überblick über die in den einzelnen Stadien eingesetzten Forschungsmethoden und -umgebungen gegeben.

### 4.3 Überblick Forschungsmethoden und -umgebungen

In den einzelnen Stadien der Arbeit werden unterschiedliche Forschungsmethoden eingesetzt, einhergehend mit der Verwendung unterschiedlicher Forschungsumgebungen. Für einzelne Stadien kommt gegebenenfalls eine Kombination verschiedener Methoden zum Einsatz. Abbildung 4.6 gibt einen Gesamtüberblick über die verwendeten Methoden in den jeweiligen Stadien.

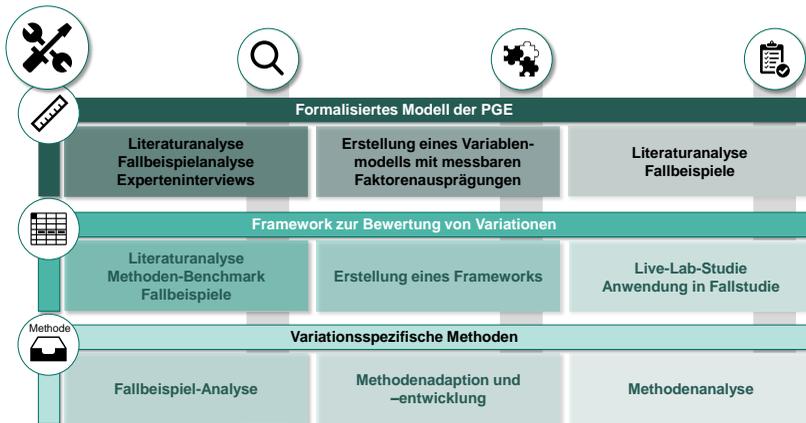


Abbildung 4.6: Überblick zu den Forschungsmethoden in den verschiedenen Stadien der Arbeit.

Die Begründung zur Auswahl der jeweiligen Methode, eine detaillierte Beschreibung des Studiendesigns sowie die Diskussion hinsichtlich Übertragbarkeit und weiterer Validitätsaspekte finden sich im jeweiligen Abschnitt in den Kapiteln 5 bis 7. Verschiedenen Dimensionen der Validität von Studien sind weiterhin – vor dem Hintergrund von Kompetenzmodellen und -tests – bei SCHAPER (2015) dargestellt. Eine ausführliche Übersicht zu Forschungsmethoden enthält darüber hinaus beispielsweise BLESSING UND CHAKRABARTI (2009, S. 239–382). Einen Ansatz zur Auswahl von Forschungsmethoden in Abstimmung auf die zu beantwortenden Forschungsfragen bietet eine Fragen-Methoden-Matrix. Dort erfolgt die Auswahl von Methoden unter Einschätzung der erzielbaren Ergebnislänge sowie des notwendigen Aufwands sowohl für den Forschenden als auch für weitere Involvierte, beispielsweise Befragte einer Interview-Studie. (Blessing & Chakrabarti, 2009, 106-109). Aufbauend auf der DRM und in Anlehnung an die Struktur des iPeM stellt MARXEN ein konkretisiertes Framework zur Erforschung von Methoden zur Konstruktionsunterstützung bereit. Bestandteil des Frameworks ist auch eine Auswahl etablierter Methoden aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, zu denen in der entwicklungsmethodischen Forschung Anknüpfungspunkte bestehen. (Marxen & Albers, 2012; Marxen, 2014)

Eine besondere Forschungsumgebung, die den Herausforderungen entwicklungs-methodischer Forschung Rechnung trägt, einerseits mit ihren Ergebnissen die Unternehmenspraxis mit ihrer naturgemäßen Komplexität zu unterstützen, andererseits Zusammenhänge ausgewählter Faktoren gezielt zu untersuchen, sind Live-Labs. Live-Labs sind Projekt-Formate, in denen möglichst realitätsnahe Bedingungen mit den Kontrollmöglichkeiten reiner Laborstudien für zu untersuchende Faktoren kombiniert werden. (Albers, Walter, Wilmsen & Bursac, 2018; Walter, Albers, Haupt & Bursac, 2016)

Am IPEK bestehen aktuell die folgenden Live-Labs:

- ProVIL – Produktentstehung im virtuellen Ideenlabor (Walter et al., 2016)
- IP – Integrierte Produktentwicklung (Albers, Bursac, Heimicke, Walter & Reiß, 2017)
- Projektarbeit im Rahmen der HECTOR School (Pluto Project, 2020)

In der vorliegenden Arbeit werden sowohl IP als auch die Projektarbeit der HECTOR School genutzt. Abbildung 4.7 zeigt die Phasen des Referenzprozesses von IP.

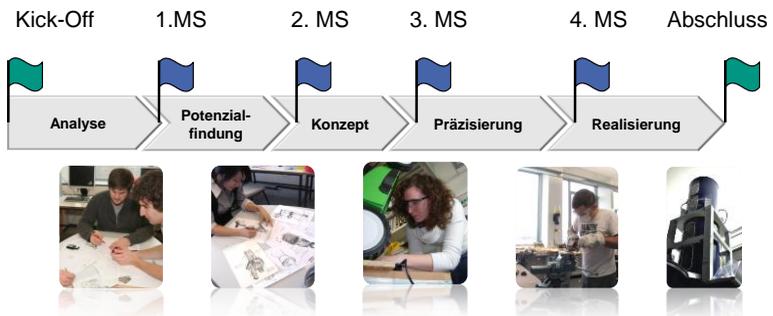


Abbildung 4.7: Phasen des Referenzprozesses im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017).



## 5 Formalisiertes Modell der PGE

Dieses Kapitel fußt auf der ersten Forschungshypothese aus Abschnitt 3.3: „Durch eine formalisierte Beschreibung auf Basis des Modells der PGE lassen sich Zusammenhänge zwischen Variationen zur Realisierung von Innovationspotenzialen und Entwicklungsrisiken abbilden“.

Ziel des Kapitels ist daher ein Variablenmodell, das Variationen im Modell der PGE nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) mit den damit verfolgten Innovations-Zielen<sup>1</sup> und Auswirkungen verknüpft. Wie in Abbildung 5.1 gezeigt, werden dafür durch Beantwortung der Forschungsfragen aus 3.4 zunächst die Modellbestandteile identifiziert, anschließend strukturiert und es werden messbare Indikatoren für die einzelnen Bestandteile vorgeschlagen. Im letzten Schritt wird das vorgeschlagene Modell durch eine initiale Anwendung evaluiert.

Die Ermittlung der notwendigen Modellbestandteile durch Beantwortung von Forschungsfrage I.1 ist in Abschnitt 5.1 dargestellt. In Abschnitt 5.2 wird die Modellstruktur einschließlich der Indikatoren vorgeschlagen und an Beispielen illustriert. In Abschnitt 5.3 erfolgt schließlich die Modellevaluation anhand weiterer Fallbeispiele.

---

<sup>1</sup> Es wird hier dem Kern des ZHO-Modells aus Abschnitt 2.3.2 folgend von Zielen gesprochen. In dem Sinne, wie ein Zielsystem auch Begründungen für Ziele enthält sowie es auch ein Ziel sein kann, bestimmten Randbedingungen, beispielsweise neuen Gesetzen zu genügen, werden diese Ziele auch als Ursachen oder Gründe von Variationen verstanden.

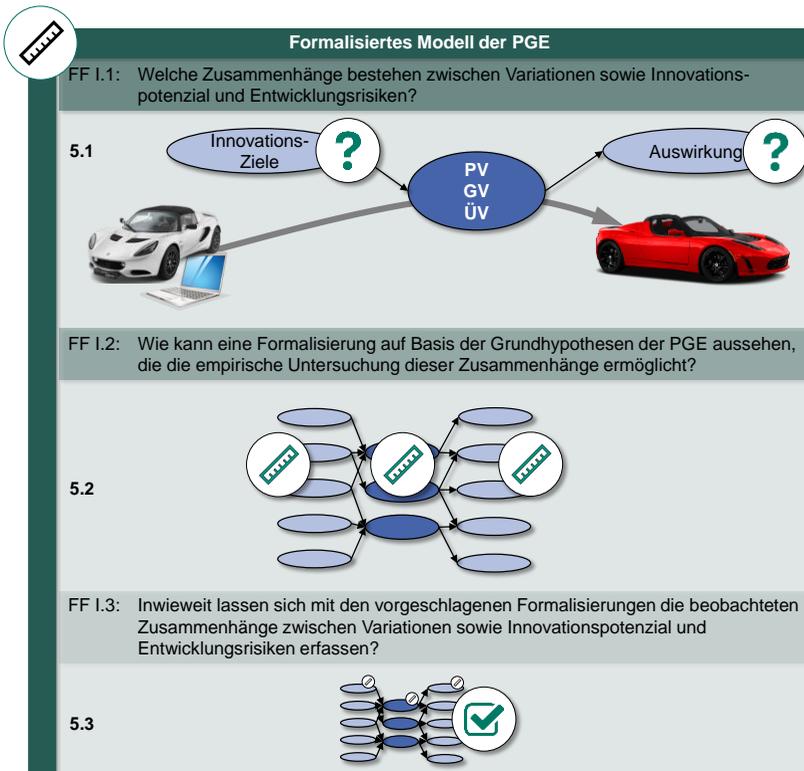


Abbildung 5.1: Abschnittsweise Entwicklung und Evaluation eines Variablenmodells für die empirische Untersuchung der Ziele und Auswirkungen von Variationen im Modell der PGE nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Darstellung mit Bildelementen aus Abbildung 2.26.

## 5.1 Gründe für Variationen und ihre Auswirkungen

Ziel dieses Abschnitts ist es, allgemein Ziele und Auswirkungen von Variationen näher zu betrachten. Damit wird Forschungsfrage 1.1 in Abbildung 5.2 beantwortet, indem die gezeigten Elemente untersucht werden.

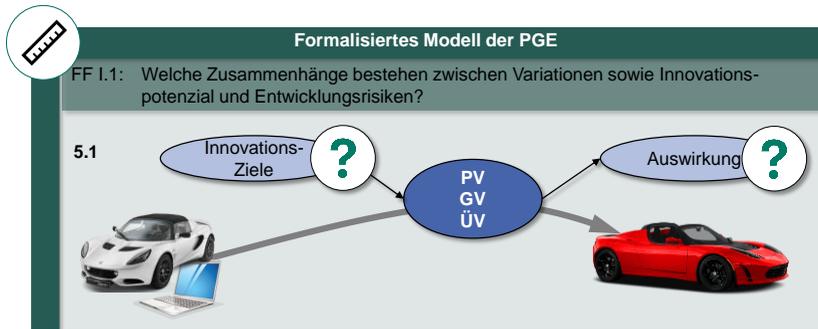


Abbildung 5.2: In diesem Abschnitt werden Variationen sowie die damit verfolgten Ziele als auch damit einhergehende Auswirkungen näher untersucht.

Mit den Variationsarten im Modell der PGE lässt sich prinzipiell jede Entwicklungsaktivität erfassen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Jede Überführung von Zielsystemelementen in Objektsystemelemente durch das Handlungssystem wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, lässt sich also durch die Variationsarten modellieren. Somit kann zunächst grundsätzlich jedes Entwicklungsziel Grund einer Variation sein. Mehr noch als die Kenntnis über Gründe für Variationen im Allgemeinen ist daher Wissen über Gründe für die verschiedenen Variationsarten interessant. Gleiches gilt für die Auswirkungen von Variationen bzw. Variationsarten. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche weiteren Faktoren bestimmte Variationsarten eventuell begünstigen oder verstärkt fördern oder zu unterschiedlichen Formen der Auswirkungen führen.

Ein einfaches Beispiel zeigt, dass vermutlich ein wichtiger Faktor, der die Ursache-Wirkungs-Beziehungen bei Variationen bestimmt, die Branche eines Unternehmens sein kann: So wird im Automobilbereich bei neuen Produktgenerationen typischerweise ein neues Design erwartet. Dies wird durch einen bestimmten Gestaltvariationsanteil der Karosserie realisiert. Gestaltvariation der Karosserieteile macht neue

Presswerkzeuge zur Herstellung notwendig, führt also zu Kosten für das Produktionssystem. Demgegenüber ist zu erwarten, dass bei Produkten wie beispielsweise Werkzeugmaschinen das Design als Grund für Gestaltvariation eine weniger gewichtige Rolle spielt und außerdem zum Beispiel Bleche einer Maschinenverkleidung auch nach Gestaltvariation auf bereits vorhandenen Biegemaschinen hergestellt werden können.

Der Umstand, dass unter anderem die Branche ein Einflussfaktor auf die Ursache-Wirkungsbeziehung bei Variationsarten ist führt auch zu dem Schluss, dass eine vollständige Erfassung kaum möglich ist. Um in der vorliegenden Arbeit mit Beobachtungen mehrere Branchen abzudecken werden mehrere Fallbeispiele betrachtet. Damit werden unter anderem Systeme unterschiedlicher Stückzahl, Größe, Komplexität und Rolle in der Wertschöpfungskette (Zulieferer vs. OEM) erfasst.

In Abschnitt 5.1.1 wird das Vorgehen zur Untersuchung der Fallbeispiele beschrieben. Die dabei gemachten Beobachtungen sind in Abschnitt 5.1.2 dargestellt. In Abschnitt 5.1.3 werden die wichtigsten Erkenntnisse daraus zusammengefasst.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der nachfolgend beschriebenen Forschungsarbeiten wurden mit ALBERS, BURSAC & RAPP, 2016, 2017; ALBERS, RAPP, SPADINGER ET AL., 2019D, 2019C; ALBERS, RAPP, PEGLOW ET AL., 2019; RAPP, MOESER, EICHORN & ALBERS, 2018; WALTER, RAPP, ALBERS & THE DESIGN SOCIETY, 2016 auf Fachkonferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht und sind Gegenstand in studentischen Abschlussarbeiten, die vom Autor der vorliegenden Arbeit co-betreut wurden (Eichhorn, 2017; Erdmann, 2017; Wattenberg, 2018)<sup>2</sup>.

### 5.1.1 Vorgehen

Für die Untersuchung wurden mehrere Fallbeispiele analysiert. Zur Datenerhebung wurden verschiedene Erhebungsmethoden eingesetzt. Zum einen wurden Fallbeispiele von und zusammen mit beteiligten Entwicklern untersucht. Dabei handelt es sich um teilnehmende Beobachtungen (vgl. „Participant Observation“ oder „Observing Participant“ (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 258–260)). Ein auf diese Art und Weise untersuchtes Fallbeispiel sind mehrere Produktgenerationen von Zweimassenschwungrädern (ZMS).

Zweimassenschwungräder dienen unter anderem in Antriebssträngen mit Verbrennungsmotoren der Reduktion von Drehungleichförmigkeiten, die dort durch die Verbrennungstaktzyklen entstehen. In Folge solcher Drehungleichförmigkeiten können sonst beispielsweise NVH<sup>3</sup>-Phänomene wie Getrieberasseln oder Karosseriebrummen entstehen, die die Lebensdauer von Komponenten im Fahrzeug herabsetzen

---

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeiten (co-betreut)

<sup>3</sup> Noise Vibration Harshness

sowie das Komfort-Empfinden von Nutzern beeinträchtigen können. (Albers, 1994a) Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft ein modernes Zweimassenschwungrad sowie den Einbauort im Fahrzeug.

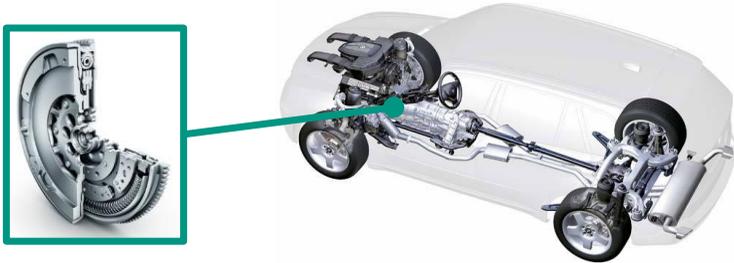


Abbildung 5.3: Beispiel eines modernen Zweimassenschwungrads (Schnittdarstellung) und Darstellung des Einbauorts im Fahrzeug. Darstellung in Anlehnung an Vortragsfolien zu (Albers, Bursac & Rapp, 2017) mit Material von Schaeffler, 2020 und BMW nach auto-motor.at, 2020.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die in Abbildung 5.4 gezeigten Produktgenerationen von Zweimassenschwungradern als Fallbeispiel untersucht.

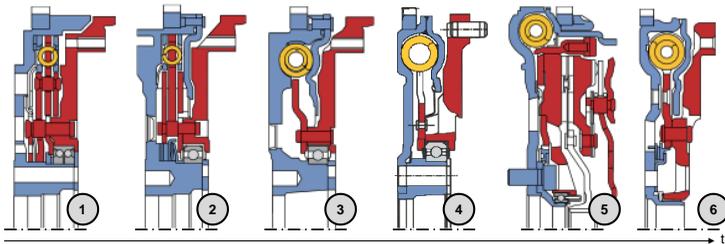


Abbildung 5.4: Als Fallbeispiel im Hinblick auf Ziele und Auswirkungen von Variationen untersuchte Produktgenerationen des Zweimassenschwungrads (Albers, Bursac & Rapp, 2017). Darstellung als Viertelschnitt. Blau Primärseite (mit Motor verbunden), rot Sekundärseite (mit Wirkfläche zur Kupplungsscheibe, Kupplungssystem bei 5. gezeigter Produktgeneration auch dargestellt), gelb Federn, die die zwei Seiten verbinden.

Zweimassenschwungräder sind Torsionsschwingungsdämpfer, wobei keine Bewegung um einen festen Ort stattfindet, sondern eine Schwingung um eine mittlere Antriebsdrehzahl.<sup>4</sup> Zur Realisierung wurde die Schwungmasse konventioneller Schwungräder bei Verbrennungsmotoren in zwei Hälften geteilt (blau und rot in Abbildung 5.4), die durch Federn (gelb in Abbildung 5.4), die anfangs aus konventionellen Torsionsschwingungsdämpfern in Kupplungsscheiben stammten, miteinander verbunden und durch ein Lager gegeneinander abgestützt sind. Bei Drehgeschwindigkeitsspitzen des Motors und der mit ihm verbundenen, in Abbildung 5.4 blauen Primärseite werden die Federn komprimiert. Energie wird so in Form von elastischer Energie zwischengespeichert und die Spitzen gelangen nicht in voller Stärke zur Sekundärseite (rot in Abbildung 5.4), die über die Gegenreibfläche für die Kupplungsscheibe reibschlüssig mit der Kupplung verbunden ist. Bei einem Abfall der Drehgeschwindigkeit geben die Federn die gespeicherte Energie sukzessive ab und beschleunigen so die Sekundärseite, sodass der Abfall und Drehgeschwindigkeitsminima ebenfalls nicht vollständig übertragen werden. Insgesamt werden Drehungleichförmigkeiten aus dem Verbrennungsmotor so auf dem

<sup>4</sup> Auch bei einer auf den ersten Blick ähnlichen Funktion liegen Zweimassenschwungräder im Gegensatz zu einem Schwingungstilger im Haupt-Leistungsfluss.

Weg zur Sekundärseite und der anschließenden Kupplung bzw. dem nachgeschalteten Getriebeeingang reduziert. (Albers, 1994a)

Neben der Untersuchung der ZMS-Produktgenerationen wurden in einer Interviewstudie Entwickler verschiedener Unternehmen zu Projekten befragt. In der Studie (Wattenberg, 2018) wurde mit 11 Entwicklern als Experten aus der Praxis über Systeme gesprochen, an deren Entwicklung die Interviewten, teils in führender Position, beteiligt waren. Die Interviews wurden im Format qualitativer Experteninterviews (Kaiser, 2014) durchgeführt (Wattenberg, 2018). Zur Vorbereitung müssen dafür die zu Grunde liegenden Forschungsfragen in Interviewfragen überführt werden. Abbildung 5.5 zeigt diesen Prozess einschließlich Zwischenstufen.



Abbildung 5.5: Operationalisierung von Forschungsfragen durch die Überführung in Interviewfragen (Kaiser, 2014, S. 57 nach Wattenberg, 2018, S. 82<sup>5</sup>).

Tabelle 7 zeigt die gesammelten Fallbeispiele im Überblick mit Erhebungsmethode und einer Brancheneinordnung.

<sup>5</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Tabelle 7: Übersicht über die untersuchten Fallbeispiele, die zugehörige Branche, die Art der verwendeten Datenerfassung sowie Referenz zu den Einzeldarstellungen (für die Interviews basierend auf Wattenberg, 2018, S. 87<sup>6</sup>).

Fallbeispiel-ID und Branche	Erhebungsmethode	Fallbeispiel-Beschreibung	Publikation/Bericht
<b>ZMS</b> (Automobil)	Teilnehmende Beobachtung	Mehrere Produktgenerationen des Zweimassenschwungrads	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2016); ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017)
<b>Betonpumpe</b> (Baumaschinen)	Teilnehmende Beobachtung	Entwicklung einer neuen Produktgeneration Betonpumpen	ERDMANN (2017)
<b>Interview A</b> (Automobil)	Interview (Audio)	Automatisierung des Bereichs der Simulation von Fahrzeugen auf Prüfständen	WATTENBERG (2018)
<b>Interview B</b> (Entwicklungsdienstleistungen)	Interview (Audio)	Entwicklung und Konstruktion eines mechatronischen Produkts im Medizinbereich	WATTENBERG (2018)
<b>Interview C</b> (Entwicklungsdienstleistungen)	Interview (Audio)	Entwicklung und Konstruktion eines mechatronischen Produkts im Medizinbereich	WATTENBERG (2018)
<b>Interview D</b> (Prüftechnik)	Interview (Audio)	Softwareentwicklung für Prüfstände	WATTENBERG (2018)
<b>Interview E</b> (Produktionstechnik)	Interview (Audio)	Entwicklung neuartiger Roboter für die Industrie	WATTENBERG (2018)
<b>Interview F</b> (Entwicklungsdienstleistungen)	Interview (Audio)	Entwicklung eines Batteriesystems für Elektrofahrzeuge	WATTENBERG (2018)
<b>Interview G</b> (Maschinenbau)	Interview (Handschriftlich)	Vereinheitlichung der Bedienung von Werkzeugmaschinen	WATTENBERG (2018)
<b>Interview H</b> (Werkzeughersteller)	Interview (Handschriftlich)	Entwicklung einer neuen Schraube	WATTENBERG (2018)
<b>Interview I</b> (Maschinenbau)	Interview (Handschriftlich)	Automatisierung eines manuellen Fertigungsprozesses	WATTENBERG (2018)
<b>Interview J</b> (Maschinenbau)	Interview (Handschriftlich)	Entwicklung eines Getriebes für den Industrieinsatz	WATTENBERG (2018)

<sup>6</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

<b>Interview K</b> (Prüftechnik)	Interview (Handschriftlich)	Entwicklung einer Standardstruktur zur Steuerung verschiedener Prüfstände	WATTENBERG (2018)
-------------------------------------	--------------------------------	---	----------------------

Die Ergebnisse aus den Fallbeispielen werden im folgenden Absatz detailliert dargestellt.

### 5.1.2 Fallbeispiel-Beobachtungen zu Gründen und Auswirkungen von Variationen

Nachfolgend sind die Ergebnisse aus den Fallstudien geordnet nach den Variationsarten aufgeführt. Außerdem werden Beobachtungen in Bezug auf Referenzen aufgeführt. Es wird jeweils weiter unterschieden zwischen

- Gründen
- Auswirkungen
- Begünstigenden Faktoren
- Hemmenden Faktoren

Die Einordnung als Grund oder Auswirkung ist nicht immer trennscharf: Eine beabsichtigte oder erwartete Auswirkung einer Variation kann deren Grund sein. Als Anhaltspunkt wurden davon ausgehend, dass Variationen als Entwicklungsaktivitäten der Erfüllung eines Zielsystems dienen, beabsichtigte Effekte, beispielsweise ein bestimmter Nutzen, und Randbedingungen, eher den Gründen zugeordnet. Unvermeidbare Folgen einer Variation, beispielsweise Kosten für einen Prototypenaufbau, wurden eher den Auswirkungen zugeordnet.

Bei jedem Befund sind zu Grunde liegendes Fallbeispiel, Branche und Referenz angegeben. In den referenzierten Arbeiten finden sich weiterführende Darstellungen zu den einzelnen Fallbeispielen. Wurden in einem Fallbeispiel mehrere Produktgenerationen betrachtet, wird angegeben, auf welche Produktgeneration sich die angeführte Beobachtung bezieht, beispielsweise „ $G_1^{ZMS}$ “ für die 1. ZMS-Produktgeneration.

Die nachfolgenden Abschnitte fassen die Kernergebnisse zusammen. Soweit direkt möglich, wurden hinreichend ähnliche Ergebnisse gruppiert. Weiterführende Vorschläge zu einer systematischen Strukturierung der Ergebnisse aus den Fallstudien als Ausgangspunkt eines Gerüsts für weitere empirische Erhebungen zu Variationen folgen in Abschnitt 5.2.

Abschließend sei angemerkt, dass die Befunde bei keinem der Fallbeispiele die tatsächliche Entwicklung vollumfänglich abdecken können. Vielmehr kann hier nur das

aufgeführt werden, was in den Erhebungen explizit festgehalten wurde. Beispielsweise ist aber davon auszugehen, dass Validierung in der Folge von Variationen häufiger und bei allen Fallbeispielen auftrat, auch, wenn dies nur für einen Teil der Fallbeispiele vermerkt ist.

Tabelle 8 bis Tabelle 12 beinhalten die Gründe für Übernahmevariationen in den Fallbeispielen, deren Auswirkungen sowie begünstigende Faktoren. Hemmende Faktoren wurden in den Fallbeispieluntersuchungen nicht explizit benannt.

### Gründe für Übernahmevariationen

Tabelle 8: Gründe für Übernahmevariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Grund für Übernahmevariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Teilsysteme haben sich bewährt und zunächst ist kein Anlass für andere Variation vorhanden	Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ ) (ZMS, $G_3^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 22); ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 24)
Aktueller Stand der Technik erfüllt die Anforderungen an die neue Produktgeneration	Automobil (A)	WATTENBERG (2018, S. 90)
Kosten- und Zeitersparnis	Automobil (A)	WATTENBERG (2018, S. 95)
Verfügbarkeit von fertig entwickelten Referenzen am Markt und Entwicklung des Teilsystems passt nicht zu Unternehmenskompetenzen	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. IV)
Kunden sind mit Teilsystemen bisher zufrieden	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 19)

## Auswirkungen von Übernahmevariationen

Tabelle 9: Auswirkungen von Übernahmevariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Auswirkungen von Übernahmevariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Funktionserfüllung beeinträchtigt auf Grund anderer Randbedingungen in der neuen Produktgeneration	Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23)
Gestaltvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Wälzlagerfett), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen	Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23)
Prinzipvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Federschmierung), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen	Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23)
Bei Übernahmevariation von externer Referenz Kosten für Beschaffung (Lieferantenfindung, Spezifikation, Prüfung)	Entwicklungs- dienstleistung (B, C) Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 96)
Aufwände für genaue Abgrenzung der Referenz in der bisherigen Verwendung und Integration in neue Produktgeneration	Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 96)
Erhöhte Abhängigkeit von Zulieferer	Entwicklungs- dienstleistung (F) Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 98); (WATTENBERG, 2018, S. 110)
Risiko: Integration von Referenzen verschiedener Hersteller	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 98)

## Begünstigende Faktoren für Übernahmevariationen

Tabelle 10: Begünstigende Faktoren für Übernahmevariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Begünstigende Faktoren für Übernahmevariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Potenzielle Referenzen sind unternehmensintern verfügbar und werden bereits genutzt	Automobil (A)	WATTENBERG (2018, S. 90)
Teilsysteme, die sicherheitskritisch sind, werden bevorzugt übernommen	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 90)
Teilsystem kommt von Zulieferer, der dadurch für Validierung und Haftung verantwortlich ist	Entwicklungsdienstleistung (F)	(WATTENBERG, 2018, S. 90)

Tabelle 11 bis Tabelle 13 führen die Gründe für Gestaltvariationen auf, deren Auswirkungen sowie begünstigende Faktoren, die in den Fallbeispielen beobachtet wurden. Auch bei den Gestaltvariationen wurden keine hemmenden Faktoren explizit benannt. Abbildung 5.6 zeigt eine der beobachteten Gestaltvariationen im Fallbeispiel Zweimassenschwungrad.

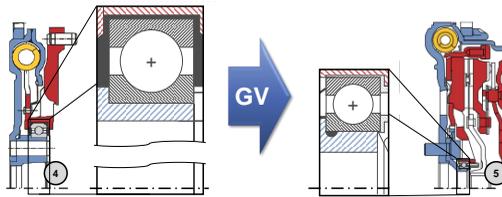


Abbildung 5.6: Beispiel einer Gestaltvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der vierten auf die fünfte untersuchte Produktgeneration. Der Durchmesser des ZMS-Lagers wurde so stark reduziert, dass die Tragzahl des Lagers auf etwa 20% des bisherigen Wertes reduziert wurde (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.

## Gründe für Gestaltvariationen

Tabelle 11: Gründe für Gestaltvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Grund für Gestaltvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Gestaltvariation von angrenzendem Teilsystem	Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ ) Prüftechnik (K) Werkzeughersteller (H)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 27); WATTENBERG (2018, ANHANG, S. IV)
Gestaltvariation wird notwendig (Wälzlagerfett), um Betrieb eines anderen, übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen	Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23)
Verbesserung der Funktionserfüllung	Automobil (ZMS, $G_3^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 24)
Strukturprobleme von Bauteilen im Einsatz	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 19)

Beibehaltung des Lösungsprinzips ermöglicht die Nutzung bestehenden Erfahrungswissens als guten Ausgangspunkt der Entwicklung	Automobil (A) Entwicklungsdienstleistung (C) Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 90); (WATTENBERG, 2018, ANHANG, S. V)
Nutzung bzw. Realisierung von Gleichteilstrategien und Baukastensystemen	Automobil (A) Baumaschinen (Betonpumpe) Maschinenbau (J)	WATTENBERG (2018, S. 90); ERDMANN (2017, S. 43–44); WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Assoziiertes Risiko ist geringer als bei einer Prinzipvariation	Entwicklungsdienstleistung (B, C, F)	WATTENBERG (2018, S. 91); WATTENBERG (2018, S. 98)
Kunde stellt Anforderungen an die Produktgestaltung, die eine Übernahmevariation ausschließen, ist technisch jedoch wenig versiert	Entwicklungsdienstleistung (B)	WATTENBERG (2018, S. 91)
Explizite Vorgabe des Lösungsprinzips durch den Kunden (technisch versierter Kunde, B2B-Bereich)	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 91)
Betrachtung einer für das Unternehmen neuen Thematik oder Technologie, wobei Prinzipvariation vermieden werden soll	Prüftechnik (K) Werkzeughersteller (H)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. IV)
Bedienerschnittstelle soll nicht zu große Veränderungen im Vergleich zu bisherigen Produkten aufweisen	Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Marketing-Entscheidung	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, IV)

## Auswirkungen von Gestaltvariationen

Tabelle 12: Auswirkungen von Gestaltvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Auswirkung von Gestaltvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Vorübergehend wieder exklusiver Anbieter von Ersatzteilen (kann auch bei Prinzipvariation gelten)	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 49)
Bereits vorhandene Lagerbestände von Bauteilen können womöglich nicht mehr verwendet werden und müssen entsorgt werden (kann auch bei Prinzipvariation gelten)	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 50)
Neue Verträge mit Zulieferern zu überwiegend günstigeren Konditionen	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 50)
Gestaltvariation angrenzender Teilsysteme wird notwendig	Automobil (ZMS, $G_3^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 25)
Produktionssystementwicklung wird notwendig	Automobil (ZMS, $G_3^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 24)
Herausforderung Produktionsanlauf	Werkzeughersteller (H)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Beanspruchbarkeit des Teilsystems nimmt ab	Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 27)
Validierung wird notwendig	Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ ) Entwicklungsdienstleistung (B) Maschinenbau (I, J)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 27); WATTENBERG (2018, S. 96–97); WATTENBERG (2018, S. 110)
Aufwand für Erstellung alternativer Lösungen	Entwicklungsdienstleistung (C)	WATTENBERG (2018, S. 96)
Ausarbeiten der neuen Lösung, insbesondere Konstruktion	Entwicklungsdienstleistung (B, F)	WATTENBERG (2018, S. 96);

	Prüftechnik (D) Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Aufwände für Aufbau von Entwicklungsgenerationen (Prototypen, Funktionsmuster) (auch Risiko/ Herausforderung)	Entwicklungsdienstleistung (B, C, F) Maschinenbau (I) Werkzeughersteller (H)	WATTENBERG (2018, S. 96); WATTENBERG (2018, S. 99); WATTENBERG (2018, S. 110)
Vertragsstrafen bei Zeitverzug	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 97)
Abstimmungen zur Systemintegration	Prüftechnik (D) Prüftechnik (K) Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 97); WATTENBERG (2018, S. 110)
Kompatibilität von Teilsystemen	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Abhängigkeit von Zulieferer, Steuerung der Zusammenarbeit	Entwicklungsdienstleistung (B, F) Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 98); WATTENBERG (2018, S. 110)
Kundenzufriedenheit erfordert womöglich mehrere Änderungen, viel Validierung und führt so zu Zeitdruck	Entwicklungsdienstleistung (B, C)	WATTENBERG (2018, S. 99)
Risiko: Erzielbare Nutzensteigerung reicht nicht aus, um Anforderungen an die neue Produktgeneration zu erfüllen	Automobil (A) Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 99); WATTENBERG (2018, S. 110)
Verhalten für manche Gestaltparameterwerte unbekannt	Werkzeughersteller (H) Maschinenbau (J)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Risiko Datensicherheit bei IoT	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, S. 110)

## Begünstigende Faktoren für Gestaltvariationen

Tabelle 13: Begünstigende Faktoren für Gestaltvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Begünstigende Faktoren für Gestaltvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Kostenabschätzung ist zu einem frühen Zeitpunkt einfach(er)	Automobil (A)	WATTENBERG (2018, S. 91)
Potenzial, den voraussichtlichen Aufwand für weitere Gestaltvariationen in künftigen Produktgenerationen zu reduzieren	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 91)

In Tabelle 14 bis Tabelle 17 sind für Prinzipvariationen die in den Fallbeispielen benannten Gründen, Auswirkungen, begünstigenden und hemmenden Faktoren aufgeführt. Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 zeigen beobachtete Prinzipvariationen im Fallbeispiel Zweimassenschwungrad.

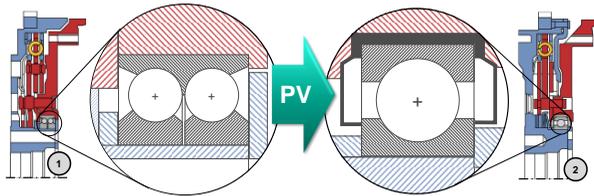


Abbildung 5.7: Beispiel einer Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der ersten auf die zweite untersuchte Produktgeneration. Es wurde von einer statisch bestimmten zu einer statisch unbestimmten Lagerung gewechselt, da bei der statisch bestimmten Lagerung im Betrieb auftretende Coriolis-Kräfte der Schwungradhälften zu Lebensdauerproblemen beim Lager geführt hatten (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.

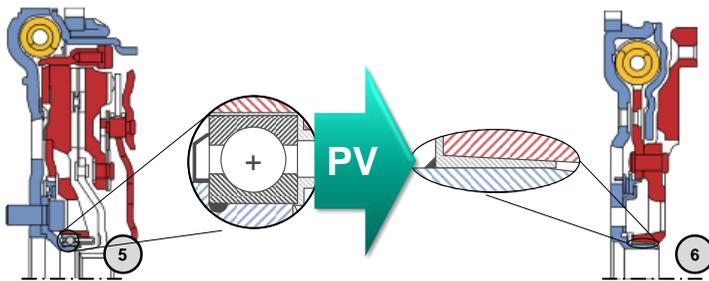


Abbildung 5.8: Beispiel einer Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der fünften auf die sechste untersuchte Produktgeneration. Durch Verwendung eines Gleit- an Stelle eines Wälzlagers wurden Kosteneinsparungen erwartet (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.

### Gründe für Prinzipvariationen

Tabelle 14: Gründe für Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Grund für Prinzipvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Funktionsintegration bei Teilsystemen zur Reduktion der Bauteil- und Schnittstellenanzahl im Gesamtsystem	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 92)
Bewusste Funktionsintegration	Entwicklungsdienstleistung (C, F)	WATTENBERG (2018, S. 92)
Funktion (Schwingungsisolation) kann in der gewünschten Ausprägung nicht durch eine Gestaltvariation verfügbarer Referenzen realisiert werden	Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 20–21)
Funktion eines anderen, übernommenen Teilsystems (Federn) unter anderen Randbedingungen erzwingen (Einführung Schmierung)	Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23)

Prinzipvariation (Schwungradteilung und Integration von Wälzlager) erfordert weitere Teilsysteme (Wärmeschutzkappe, ebenfalls Prinzipvariation), um zu funktionieren	Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 24)
Strukturprobleme von Bauteilen im Einsatz	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 19)
Senkung von Stückkosten in der Fertigung	Automobil (ZMS, $G_4^{ZMS}$ , ZMS, $G_5^{ZMS}$ , ZMS, $G_6^{ZMS}$ ) Maschinenbau (I)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 25); ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 27); ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 28); WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Bereits vorhandene Lösungen in Referenzen sind durch Patente geschützt und können nicht übernommen werden	Automobil (ZMS)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 25)
Keine Referenz verfügbar, von dem ausgehend eine Gestalt- oder gar Übernahmevariation möglich wäre	Automobil (A) Produktionstechnik (E) Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 92); WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Lösung in der Referenz ist technisch veraltet oder neue Technologie bietet verhältnismäßig große Vorteile	Entwicklungsdienstleistung (B) Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 92); WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Potenziell bessere Wiederverwendbarkeit von Teilsystemen in künftigen Produktgenerationen	Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 93)
Nutzung bzw. Realisierung von Gleichteilstrategien und Baukastensystemen	Baumaschinen (Betonpumpe) Maschinenbau (J)	ERDMANN (2017, S. 43–44); WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Funktionsintegration mit einer Prinzipvariation an Stelle von zwei Gestaltvariationen	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 95)

Schaffung von Alleinstellungsmerkmal	Maschinenbau (J)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Neuheitsgrad Kundenanforderung	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Strategische Entscheidung bzgl. Marktausrichtung	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)
Verfügbarkeit neuer Technologien	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. V)

### Auswirkungen von Prinzipvariationen

Tabelle 15: Auswirkungen von Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Auswirkung von Prinzipvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Konstruktion von Funktionsmuster/ Aufbau von Prototypen	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Lebensdauerprobleme (in anderem Teilsystem)	Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ ) Maschinenbau (I)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23); WATTENBERG (2018, S. 110)
Validierung ist notwendig	Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ , ZMS, $G_2^{ZMS}$ , ZMS, $G_5^{ZMS}$ , ZMS, $G_6^{ZMS}$ ) Prüftechnik (D) Produktionstechnik (E) Maschinenbau (J)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 22); ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 23); ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 26); ALBERS,

		BURSAC UND RAPP (2017, S. 28); WATTENBERG (2018, S. 97); WATTENBERG (2018, S. 110)
Prinzipvariation (Schwungradteilung und Integration von Wälzlager) erfordert weitere Teilsysteme (Wärmeschutzkappe, ebenfalls Prinzipvariation), um zu funktionieren	Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 24)
Produktionssystementwicklung wird notwendig	Automobil (ZMS, $G_4^{ZMS}$ ) Produktionstechnik (E) Entwicklungsdienstleistung (F)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 25); WATTENBERG (2018, S. 97)
Beeinträchtigung der Funktionserfüllung	Automobil (ZMS, $G_6^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 28)
Änderung von Systemstruktur und Zuordnung von Funktionen zu Teilsystemen	Entwicklungsdienstleistung (C, F)	WATTENBERG (2018, S. 92)
Konstruktionsaufwände	Prüftechnik (D) Produktionstechnik (E) Maschinenbau (G, I)	WATTENBERG (2018, S. 97); WATTENBERG (2018, S. 110)
Erstellung alternativer Lösungen	Produktionstechnik (E) Entwicklungsdienstleistung (F) Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 97); WATTENBERG (2018, S. 110)
Aufwand für Patentierung	Produktionstechnik (E)	WATTENBERG (2018, S. 98)
Kunde oder Anwender muss in der Bedienung der neuen Produktgeneration geschult werden	Prüftechnik (D) Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 98); WATTENBERG (2018, S. 111)

Formalisiertes Modell der PGE

Folgen schwer abzusehen, starke Abhängigkeit von Expertenwissen	Produktionstechnik (E) Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 99)
Herausforderung/ Risiko: Lieferantenfindung und -integration mit zufriedenstellenden Ergebnissen	Entwicklungsdienstleistung (C)	WATTENBERG (2018, S. 99)
Grenze zwischen Erfüllung von Kundenwunsch und Überschreiten von Kundenakzeptanz schwer abzusehen	Entwicklungsdienstleistung (C) Produktionstechnik (E)	WATTENBERG (2018, S. 99–100)
Integration neuer Lösung in bestehendes Produktportfolio	Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Software-Programmierung	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Anfängliche Probleme bei der Funktionserfüllung	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Risiko: Erzielbare Nutzensteigerung reicht nicht aus, um Anforderungen an die neue Produktgeneration zu erfüllen	Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Es liegt wenig Erfahrung vor	Maschinenbau (G)	WATTENBERG (2018, S. 110)
Bereitstellung neu notwendig werdender Infrastruktur für Systembetrieb bei Kunde ist unklar	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 111)
Risiko: Entwicklung dauert zu lang, um rechtzeitig im Markt zu sein	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, S. 111)
Risiko: Marktentwicklung schwer abzusehen, Aufwand für Prinzipvariation lohnt sich dann womöglich nicht (mehr)	Maschinenbau (I) Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, S. 111)
Risiko technische Sicherheit	Prüftechnik (K)	WATTENBERG (2018, S. 111)

## Begünstigende Faktoren für Prinzipvariationen

Tabelle 16: Begünstigende Faktoren für Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Begünstigende Faktoren für Prinzipvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Produkt-Design spielt eine wichtige Rolle und kann womöglich nur durch Prinzipvariation technisch realisiert werden	Entwicklungsdienstleistung (C) Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 92)
Gesonderte Durchführung zugehöriger Entwicklungsaktivitäten, sodass sie nicht unmittelbar an ein Kundenprojekt gekoppelt sind (Technologie-Vorentwicklung)	Produktionstechnik (E)	WATTENBERG (2018, S. 93)
Bestehende Lösungen sind patentrechtlich geschützt	Automobil (ZMS)	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 20)

## Hemmende Faktoren für Prinzipvariationen

Tabelle 17: Hemmende Faktoren für Prinzipvariationen in den betrachteten Fallbeispielen.

Hemmende Faktoren für Prinzipvariation	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Hohes assoziiertes Risiko auf Grund mangelnder Erfahrung	Entwicklungsdienstleistung (B)	WATTENBERG (2018, S. 91)
Herausforderung: Entwicklung für potenzielle Verwendung in mehreren Produktgenerationen erhöht den Aufwand weiter	Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 97)

Tabelle 18 bis Tabelle 21 enthalten Gründe und Auswirkungen für bestimmte Eigenschaften gewählter Referenzen, die in den Fallstudien beobachtet werden konnten sowie begünstigende oder hemmende Faktoren für deren Verwendung.

## Gründe für gewählte Referenzen

Tabelle 18: Grund für gewählte Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen.

Grund für gewählte Referenzen	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Verwendung externer Referenzen auf Grund von Kundenanforderungen in Bezug auf Design, Benutzeroberfläche oder Funktionen	Entwicklungsdienstleistung (B) Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 93)
Verwendung von unternehmensexternen Referenzen, da Eigenentwicklung nicht zu Kompetenzen des Unternehmens passt	Maschinenbau (I)	WATTENBERG (2018, ANHANG, S. IV)

## Auswirkungen von gewählten Referenzen

Tabelle 19: Auswirkungen gewählter Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen.

Auswirkungen gewählter Referenzen	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Auf Grund des Alters muss die Produktdokumentation in aktuelle Formate überführt werden	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 48)
Auf Grund des Alters ist der Zugang zu Trägern impliziten Wissens erschwert	Baumaschinen (Betonpumpe)	ERDMANN (2017, S. 48)
Fehlendes Erfahrungswissen bei der Verwendung unternehmensexterner Referenzen	Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ )	ALBERS, BURSAC UND RAPP (2017, S. 26)
Bei unternehmensexternen Referenzen Herausforderungen bei der Zusammenarbeit mit Lieferanten	Entwicklungsdienstleistung (B)	WATTENBERG (2018, S. 95)
Bei unternehmensexternen Referenzen Aufwände für Beschaffung und Prüfung	Entwicklungsdienstleistung (B, C) Prüftechnik (D)	WATTENBERG (2018, S. 96)

## Begünstigende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen

Tabelle 20: Begünstigende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen.

Begünstigende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Unternehmensexterne Referenzen aus der eigenen Branche sind Entwickler geläufig	Entwicklungsdienstleistung (F)	WATTENBERG (2018, S. 93)
Betrachtung unternehmensexterner Referenzen aus anderen Branchen und der Forschung in Bereichen, die von direkten Kundenprojekten entkoppelt sind (Technologie-Vorentwicklung)	Produktionstechnik (E)	(WATTENBERG, 2018, S. 94)

## Hemmende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen

Tabelle 21: Hemmende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen in den betrachteten Fallbeispielen.

Hemmende Faktoren für die Wahl bestimmter Referenzen	Branche (Bsp.-ID)	Quelle
Akzeptanzrisiko bei Betrachtung unternehmensexterner Referenzen aus anderen Branchen und der Forschung in Bereichen, die von direkten Kundenprojekten entkoppelt sind (Technologie-Vorentwicklung)	Produktionstechnik (E)	WATTENBERG (2018, S. 100)

### 5.1.3 Zwischenfazit

Zu allen Variationsarten sowie zu den zu Grunde liegenden Referenzen konnten in den Fallbeispielen Gründe und Auswirkungen identifiziert werden, darüber hinaus meist auch Faktoren, die diese begünstigen oder hemmen.

Die dargestellten Ergebnisse sind dabei qualitativer Natur. Es kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden und es können keine verlässlichen Aussagen zur Häufigkeit oder Bedeutung der Befunde gemacht werden. Dass ein großer Anteil der Nennungen sich auf Gestalt- und Prinzipvariation bezieht, kann mindestens teilweise auch dem Forschungsdesign mit einer stärkeren Fokussierung auf neu entwickelte Teilsysteme geschuldet sein. Gleiches gilt für fehlende Nennungen von hemmenden Faktoren bei Übernahme- und Gestaltvariation.

Detaillierte Aussagen zu einzelnen Branchen sind ebenso wenig möglich. Jedoch kann festgehalten werden, dass die gewonnenen Ergebnisse mit den zu Grunde liegenden Fallbeispielen verschiedene Branchen abdecken und mehrere ähnliche Beobachtungen in verschiedenen Branchen gemacht werden konnten.

Bei manchen Informationen aus den Fallbeispielen ist davon auszugehen, dass sie sich eher auf Entwicklungsgenerationen als auf Produktgenerationen beziehen, beispielsweise, wenn Entwicklung und Aufbau von Prototypen beschrieben werden. Da Entwicklungsgenerationen jedoch ebenfalls durch die Variationsarten entwickelt werden, kann dieser Umstand für eine qualitative Betrachtung zu Auswirkungen von Variationen vernachlässigt werden.

Im Fall aller drei Variationsarten können Variationen eines bestimmten Teilsystems Variationen weiterer Teilsysteme notwendig machen. Forschungsarbeiten zur Fortpflanzung von Änderungen (s. Abschnitt 2.5.3.2) werden dadurch einerseits bestätigt. Andererseits kann in Frage gestellt werden, inwieweit in diesen Arbeiten auch Übernahmevariationen als Auslöser für Variationen weiterer Teilsysteme erfasst werden würden.

In Bezug auf die Ergebnisse kann zu Variationen, Referenzen sowie deren Gründen und Auswirkungen folgendes Fazit gezogen werden:

- **Variationen:** Hier unterliegt die Zuordnung aus verschiedenen Gründen einer gewissen Unschärfe. Die Zuordnung hängt zum einen vom jeweils befragten Experten ab, ist also potenziell personenabhängig und subjektiv. Eine systematische und eindeutige Zuordnung von Variationen, wie sie für die Entwicklung übertragbarer methodischer Ansätze notwendig ist, ist dadurch nur bedingt gegeben. Die Unschärfe kann noch größer werden, wenn die Zuordnung, retrospektiv erfolgt und somit der Wissensstand zum Zeitpunkt der Zuordnung vom Wissensstand während der Entwicklung abweicht. Zusätzlich bedingt jede Prinzipvariation in der Ausarbeitung auch

eine Gestaltvariation (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 18), was eine eindeutige Zuordnung ebenfalls erschweren kann. Um dem zu begegnen, werden formale Indikatoren für die einzelnen Variationsarten benötigt.

- **Referenzen:** Die Beobachtungen zeigen, dass Referenzen nicht nur als Grundlage für die Variationen relevant sind, sondern als eigenständiger Einflussfaktor in Erscheinung treten. Dies muss im angestrebten Modell durch entsprechende Variablen abgebildet werden.
- **Ziele und Auswirkungen von Variationen:** Insgesamt zeigt sich, dass jede Variationsart ein breites Spektrum an Auswirkungen haben kann, die Zuordnung von Zielen für Variationen zu einer bestimmten Variationsart nicht zwingend eindeutig sein muss und dass mitunter vermutlich ähnliche Beobachtungen durch unterschiedliche Formulierungen beschrieben werden. Für empirische Erhebungen auf Grundlage eines Modells der PGE ist daher ein Ansatz zur einheitlichen Strukturierung möglicher Gründe und Auswirkungen notwendig.

Die dargestellten Bedarfe zur Formalisierung und Strukturierung der Beschreibung von Variationen, Referenzen sowie deren Gründen und Auswirkungen werden nachfolgend im Abschnitt 5.2 adressiert.

## 5.2 Formalisiertes Modell der PGE

In diesem Abschnitt werden ausgehend von den in Abschnitt 5.1 gesammelten Beobachtungen für die einzelnen Bestandteile eines formalisierten Modells der PGE messbare Indikatoren und Ansätze zur generalisierten und damit übertragbaren Strukturierung vorgeschlagen. Dadurch wird Forschungsfrage I.2 in Abbildung 5.9 beantwortet.

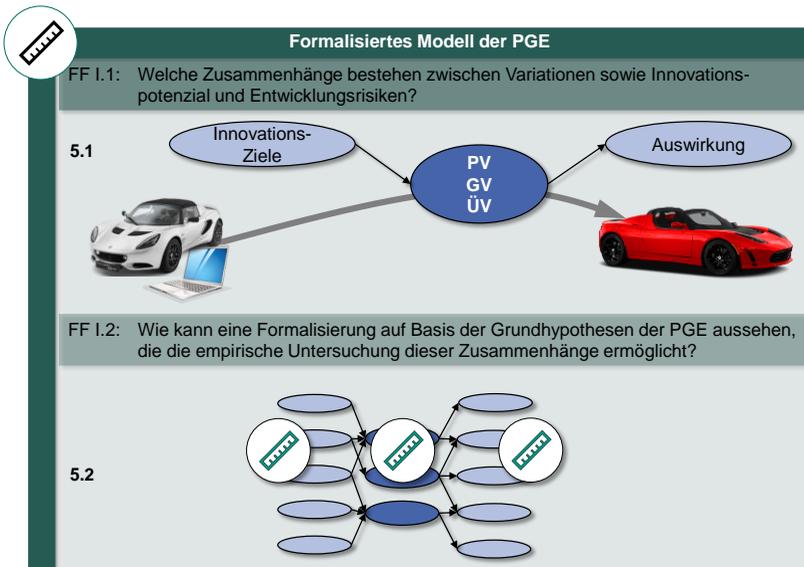


Abbildung 5.9: In diesem Abschnitt wird ein Ansatz zur Formalisierung und Strukturierung der Beobachtungen aus Abschnitt 5.1 vorgeschlagen.

So entsteht ausgehend vom Modell der PGE eine Basis für empirische Erhebungen zu Innovationspotenzialen und Entwicklungsrisiken bei der Entstehung neuer Produktgenerationen. Die Bestandteile des Modells sind die Variationsarten, die zu Grunde liegenden Referenzen sowie die Ziele und Auswirkungen von Variationen. Abschnitt 5.2.1 enthält die Beschreibung des gewählten Vorgehens. Die so erarbeiteten Formalisierungen sind in Abschnitt 5.2.2 dargestellt. In Abschnitt 5.2.3 werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und wesentliche Punkte für die Modellevaluation identifiziert.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Abschnitts wurden wie angegeben auch auf Fachkonferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht (Albers, Bursac & Rapp, 2016, 2017; Albers, Rapp, Heitger, Wattenberg & Bursac, 2018; Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, 2019c; Rapp, Barg, Klotz, Birk & Albers, 2020) und waren

Gegenstand von durch den Autor der vorliegenden Arbeit co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten (Barg, 2019; Wattenberg, 2018)<sup>7</sup>.

### **5.2.1 Vorgehen**

Für die Entwicklung des angestrebten Modells sind drei Teilbereiche zu betrachten: Variationen, die zu Grunde liegenden Referenzen sowie die Ziele und Auswirkungen von Variationen.

Zunächst werden Variationen im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf den Gestalt-Funktion-Zusammenhang der jeweils variierten Systeme bzw. Teilsysteme hin untersucht. Als Metamodell wird hierfür der C&C<sup>2</sup>-A-Ansatz genutzt, für den 20 Jahre Anwendungserfahrung vorliegen (s. Abschnitt 2.2.2). Das Ergebnis dieser Analysen ist in Abschnitt 5.2.2.1 beschrieben.

Anschließend werden Referenzen näher betrachtet. Dabei wird in Abschnitt 5.2.2.2 ein Element im Modell der PGE zur konkretisierten Beschreibung der Rolle von Referenzprodukten vorgeschlagen. Von diesem Modellelement ausgehend werden Faktoren vorgeschlagen, um den Einfluss von Referenzen auf Innovationspotenzial und Risiken in der Entwicklung zu erfassen.

Abschließend werden die Ziele und Auswirkungen von Variationen näher betrachtet und strukturiert. Da Variationen Aktivitäten zur Realisierung von Innovationszielen sind, wird hierfür zunächst das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell nach ALBERS (Albers, Reiß et al., 2016) (s. Abschnitt 2.3.2) als Analyserahmen verwendet.

### **5.2.2 Elemente und Struktur eines formalisierten Modells der PGE**

Im Folgenden werden Bestandteile des formalisierten Modells vorgestellt und auf die Beobachtungen aus Abschnitt 5.1 angewandt.

#### **5.2.2.1 C&C<sup>2</sup>-A-basierte Indikatoren für Variationen**

Es kann festgestellt werden, dass bei den Gründen für und Auswirkungen von Variationen in Abschnitt 5.1.2 wiederholt auf den Gestalt-Funktion-Zusammenhang der technischen Systeme Bezug genommen wird. So wird als Grund für Übernahmevariation genannt, dass eine gewünschte Funktion bereits ausreichend erfüllt ist (Tabelle 8). Eine Verbesserung der Funktionserfüllung, beispielsweise auf Grund von

---

<sup>7</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeiten (co-betreut)

Problemen mit Bauteilen im Einsatz, oder eine explizite Vorgabe des Lösungsprinzips können hingegen Gründe für Gestaltvariationen sein (Tabelle 11). Notwendige Konstruktionsaufwände zur Ausarbeitung einer angepassten Gestalt werden in Tabelle 12 als eine Auswirkung von Gestaltvariationen benannt. Als Gründe für Prinzipvariation wird weitergehend als bei der Gestaltvariation unter anderem Funktionsintegration als Grund genannt sowie die fehlende Möglichkeit, eine hinreichende Funktionsverbesserung allein mit Gestaltvariation zu erzielen (Tabelle 14). Auch bei einer Prinzipvariation werden Konstruktionsaufwände nötig. Weiter kann sich die Systemstruktur ändern, beispielsweise, weil neue Teilsysteme hinzukommen (Tabelle 15).

Aufbauend auf diesen Beobachtungen zeigt eine Analyse des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz am Beispiel der untersuchten ZMS-Generationen, dass die prinzipielle Wirkstruktur bei Gestaltvariationen unverändert bleibt „und die neuen Lösungen durch eine mehr oder weniger starke Variation der Gestalt von Komponenten gefunden (wird). Auch die Anordnung der Komponenten wurde variiert, allerdings nur insoweit, als dass die bestehenden WFP und Strukturen erhalten blieben und weder Elemente entfernt noch neue ergänzt wurden“ (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 30). Abbildung 5.10 zeigt die C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung für die Gestaltvariation aus Abbildung 5.6.

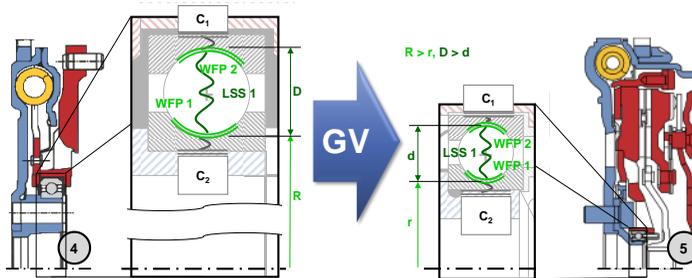


Abbildung 5.10: C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung für die Gestaltvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der vierten zur fünften Produktgeneration aus Abbildung 5.6: LSS und WFP bleiben erhalten, ändern sich aber in ihrer Gestalt, hier insbesondere den Abmaßen. Die starke Reduktion des Lagerdurchmessers führt zu einer Reduktion der Tragzahl um ca. 80% (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.

Die C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung der Prinzipvariationen aus Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8, im Ergebnis dargestellt in Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12, lässt erkennen, dass die Prinzipvariationen immer mit einer Veränderung der Anzahl an WFPen und Tragstruktur(en) einher (gingen)“ (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 30).

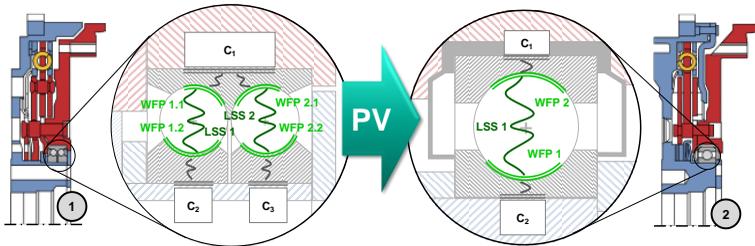


Abbildung 5.11: C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung der Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der ersten zur zweiten Produktgeneration aus Abbildung 5.7: Beim Übergang von der statisch bestimmten zur statisch unbestimmten Lagerung werden LSS und WFP entfernt (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.

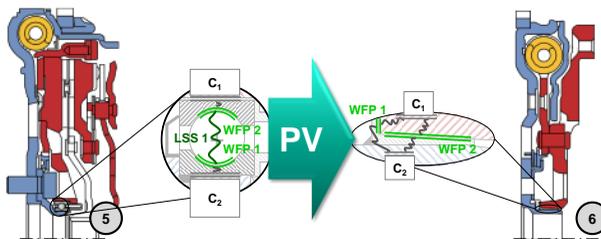


Abbildung 5.12: Prinzipvariation am ZMS-Lager beim Übergang von der fünften zur sechsten Produktgeneration aus Abbildung 5.8: Hier fall die LSS und WFP des Wälzlagers weg, LSS und WFP des Gleitlagers kommen neu hinzu (Albers, Bursac & Rapp, 2017), modifiziert.

Schließlich kann für die beobachteten Übernahmevariationen festgehalten werden: „Bei Übernahmevariation(en) blieben Tragstruktur und WFP weitestgehend unverändert. Variationen erfolgten nur im Bereich derjenigen WFP zu den angrenzenden Teilsystemen hin (Konnektoren)“ (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 30–31). Das Innere des betreffenden Teilsystems wird im Grunde als „Blackbox“ betrachtet. Diese Beobachtungen können als Indikatoren für die verschiedenen Variationsarten genutzt werden. Von Vorteil ist dabei, dass die Systemsubstanz als Bezugsbasis prinzipiell eindeutig ist. Damit ergeben sich für die drei Variationsarten die in Abbildung 5.13 genannten Indikatoren (Albers, Bursac & Rapp, 2017).

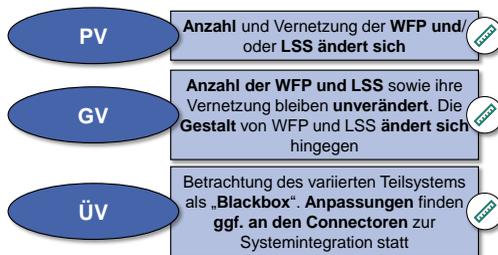


Abbildung 5.13: C&C²-A-basierte Indikatoren für die Variationsarten im Modell der PGE auf Basis der Fallbeispielbeobachtungen (Albers, Bursac & Rapp, 2017).

### 5.2.2.2 Charakteristika von Referenzsystemelementen als Einflussfaktoren

Die Beobachtungen in den Fallbeispielen entsprechen der Erkenntnis von ALBERS, BURSAC UND WINTERGERST (2015), dass Referenzprodukte neben Vorgängerprodukten beispielsweise auch Wettbewerbsprodukte sein können. Weiter zeigt sich, dass mitunter mehrere Produkte gleichzeitig als Referenz für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration dienen können, im Allgemeinen auch nur Teile bestehender Produkte als Referenz relevant sein können und dass es sich nicht zwangsläufig um Produkte in dem Sinne handeln muss, dass diese bereits am Markt verfügbar sind. Vergleichbare Beobachtungen lassen sich auch in weiteren Fallbeispielen machen (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019c). Um die genannten Aspekte der Rolle von Referenzprodukten adäquat abzubilden, wird das Modell der PGE durch die

Einführung des Modellelements „Referenzsystem“ konkretisiert. Das Referenzsystem im Modell der PGE ist nach ALBERS wie folgt definiert (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, 2019c):

**Definition Referenzsystem:**

„Das Referenzsystem für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist ein System, dessen Elemente bereits existierenden oder bereits geplanten sozio-technischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation entstammen und Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung der neuen Produktgeneration sind.“

(Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d)

Abbildung 5.14 zeigt beispielhaft, wie das Beschreibungsmodell der PGE durch das Modellelement Referenzsystem konkretisiert wird.

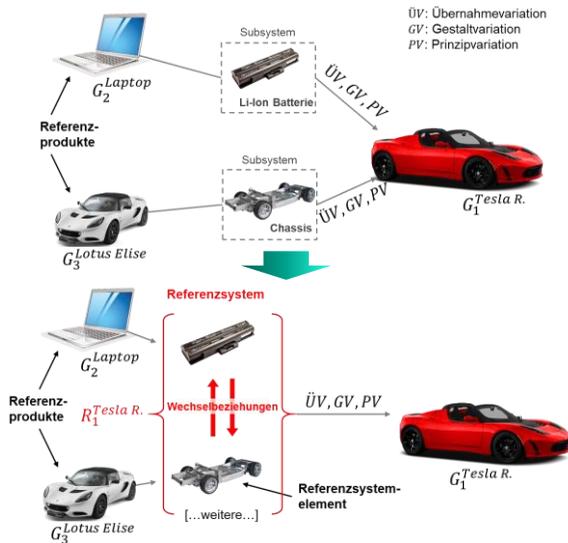


Abbildung 5.14: Erweiterung des Modells der PGE durch das Modellelement „Referenzsystem“ am Beispiel des Tesla Roadster (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, S. 11), modifiziert.

Die Beobachtungen aus den Fallbeispielen in Bezug auf die verwendeten Referenzen können mit der konkretisierten Modellbildung einzelnen Elementen des Referenzsystems bzw. deren Charakteristika zugeordnet werden. Tabelle 22 und Tabelle 23 zeigen diesem Ansatz folgend die Einordnung von Beobachtungen aus Abschnitt 5.1.

Tabelle 22: Relation zwischen Gründen für die Wahl bestimmter Referenzsystemelemente und dabei als Einflussfaktor in Erscheinung tretendes Charakteristikum des Referenzsystemelements.

Grund für die Wahl eines bestimmten Referenzsystemelements	Charakteristikum des Referenzsystemelements als Einflussfaktor	Fallbeispiel und Verweis
Kundenanforderung in Bezug auf Design, Benutzeroberfläche oder Funktion	Unternehmensextern	Entwicklungsdienstleistung (B) Prüftechnik (D) (s. Tabelle 18)
Fehlende spezifische Entwicklungskompetenz im eigenen Unternehmen	Unternehmensextern	Maschinenbau (I) (s. Tabelle 18)
Potenzielle Referenzen sind unternehmensintern verfügbar und werden bereits genutzt	Unternehmensintern	Automobil (A) (s. Tabelle 10)

Tabelle 23: Charakteristika gewählter Referenzelemente und beobachtete Auswirkungen in den Fallbeispielen.

Charakteristikum des Referenzelementes als Einflussfaktor	Folge der Wahl eines bestimmten Referenzelementes	Fallbeispiel und Verweis
Hohes Alter <sup>8</sup>	Produktdokumentation muss in aktuelle Formate überführt werden	Baumaschinen (s. Tabelle 19)
Hohes Alter	Zugang zu Trägern impliziten Wissens erschwert, da teilweise nicht mehr im Unternehmen	Baumaschinen (s. Tabelle 19)
Unternehmensextern	Fehlendes Erfahrungswissen	Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ ) (s. Tabelle 19)
Unternehmensextern	Herausforderung Zusammenarbeit mit Lieferanten / Aufwände für Prüfung & Beschaffung	Entwicklungsdienstleistung (B, C) Prüftechnik (D) (s. Tabelle 19)
Unternehmensextern	Akzeptanzrisiko bei Betrachtung von Referenzelementen aus anderen Branchen und der Forschung in gesondertem Bereich losgelöst von Tagesgeschäft	Produktionstechnik (E) (s. Tabelle 21)

Abbildung 5.15 zeigt die Überführung der Zusammenhänge aus Tabelle 22 und Tabelle 23 in die angestrebte Modellstruktur.

<sup>8</sup> Ein absolutes Maß ist hier schwierig anzugeben. Im betrachteten Fallbeispiel ein Vielfaches der typischen Time-to-market des Systems.

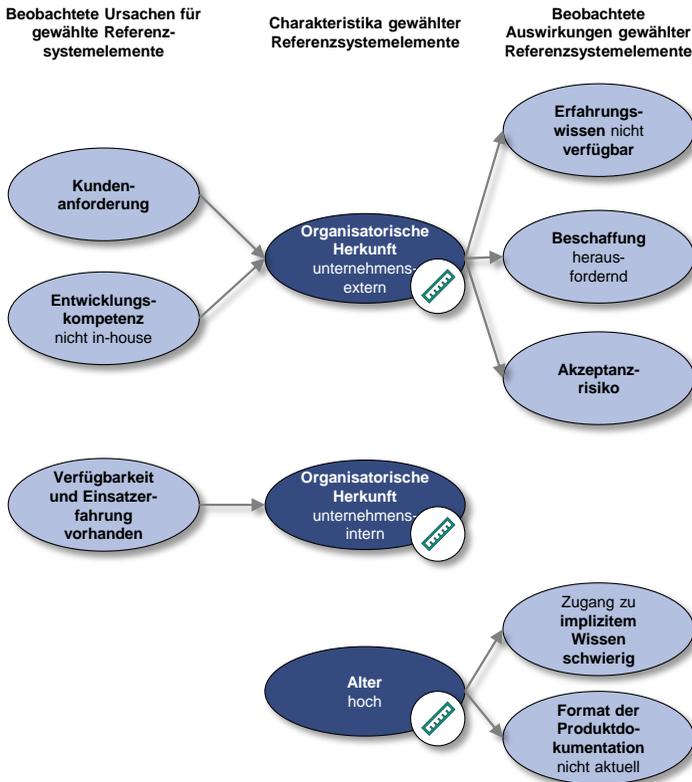


Abbildung 5.15: Modellierung des Zusammenhangs zwischen gewählten Referenzelementen und Innovationspotenzial sowie Risiken durch Verwendung von Referenzelement-Charakteristika als eigenständige, messbare Faktoren.

Es ist zu erkennen, dass sich mehrere der gemachten Beobachtungen mit denselben Referenzelement-Charakteristika abdecken lassen. Mit der vorgeschlagenen Strukturierung treten Charakteristika von Referenzelementen als messbare Faktoren zur Abbildung des Einflusses der gewählten Referenzen in Bezug auf Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken neben die Variationsarten.

### 5.2.2.3 Innovationspotenzial und Risiken durch Variationen und Variationen als Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung

Eine notwendige Grundlage einer Innovation ist das Produktprofil als besondere Ausprägung des Zielsystems in der Entwicklung einer neuen Systemgeneration (s. Abschnitt 2.1). Durch die Realisierung des Nutzens, der in einem validierten Produktprofil beschrieben ist, entsteht Innovationspotenzial. Die Realisierung des Nutzens geschieht durch die Variationen. Die Bestandteile eines Produktprofils, insbesondere Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen sowie Randbedingungen, wie in Abbildung 5.16 hervorgehoben, werden daher nachfolgend verwendet, um die in Abschnitt 5.1 beobachteten Gründe für Variationen zu ordnen.

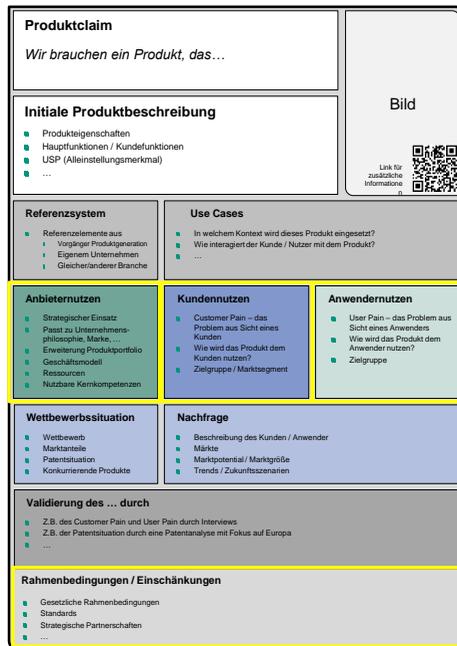


Abbildung 5.16: Dimensionen des Produktprofils (s. Abschnitt 2.1, Abbildung 2.3), anhand derer die beobachteten Ziele von Variationen in Abschnitt 5.1 geordnet werden.

Das Ergebnis der vorgenommenen Zuordnung ist in Tabelle 24 zu sehen, wobei im ersten Schritt nach den Produktprofil-Dimensionen sortiert wurde, im zweiten Schritt innerhalb dieser jeweils nach den Variationsarten. Zusätzlich ist aufgeführt, welche Ziele für Variationen nicht direkt zugeordnet werden konnten.

Tabelle 24: Verortung von Gründen für Variationen entlang von Produktprofil-Dimensionen. Die Zuordnung für die Beobachtungen in den mittels Interview untersuchten Fallbeispielen stützt sich auch auf (Wattenberg, 2018, S. 102)<sup>9</sup>.

Beobachteter Grund für Variation	Zuordnung im Produktprofil	Variationsart & Fallbeispiel
Funktionsintegration bei Teilsystemen zur Reduktion der Bauteil- und Schnittstellenanzahl im Gesamtsystem	Anbiaternutzen	PV, Entwicklungsdienstleistung (F) (Tabelle 14)
Senkung von Stückkosten in der Fertigung	Anbiaternutzen	PV, Automobil (ZMS, $G_4^{ZMS}$ , ZMS, $G_5^{ZMS}$ , ZMS, $G_6^{ZMS}$ ) Maschinenbau (I) (Tabelle 14)
Potenziell bessere Wiederverwendbarkeit von Teilsystemen in künftigen Produktgenerationen	Anbiaternutzen	PV, Prüftechnik (D) (Tabelle 14)
Nutzung bzw. Realisierung von Gleichteilstrategien und Baukastensystemen	Anbiaternutzen	PV, Baumaschinen (Betonpumpe) Maschinenbau (J) (Tabelle 14)
Beibehaltung des Lösungsprinzips ermöglicht die Nutzung bestehenden Erfahrungswissens als guten Ausgangspunkt der Entwicklung	Anbiaternutzen	GV, Automobil (A) Entwicklungsdienstleistung (C) Maschinenbau (G) (Tabelle 11)

---

<sup>9</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Nutzung bzw. Realisierung von Gleich- teilstrategien und Baukastensystemen	Anbiaternutzen	GV, Automobil (A) Baumaschinen (Betonpumpe) Maschinenbau (J) (Tabelle 11)
Assoziiertes Risiko ist geringer als bei einer Prinzipvariation	Anbiaternutzen	GV, Entwicklungs- dienstleistung (B, C, F) (Tabelle 11)
Teilsysteme haben sich bewährt und zunächst kein Anlass für andere Vari- ation vorhanden	Anbiaternutzen	ÜV, Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ ) (ZMS, $G_3^{ZMS}$ ) (Tabelle 8)
Aktueller Stand der Technik erfüllt die Anforderungen an die neue Produkt- generation	Anbiaternutzen	ÜV, Automobil (A) (Tabelle 8)
Kosten- und Zeitersparnis	Anbiaternutzen	ÜV, Automobil (A) (Tabelle 8)
Verfügbarkeit von fertig entwickelten Referenzen am Markt und Entwick- lung des Teilsystems passt nicht zu Unternehmenskompetenzen	Anbiaternutzen	ÜV, Maschinenbau (I) (Tabelle 8)
Funktion (Schwingungsisolation) kann in der gewünschten Ausprägung nicht durch eine Gestaltvariation verfügbarer Referenzen realisiert werden	Kundennutzen	PV, Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ ) (Tabelle 14)
Neuheitsgrad Kundenanforderung	Kundennutzen	PV, Prüftechnik (K) (Tabelle 14)
Kunde stellt Anforderungen an die Produktgestaltung, die eine Übernah- mevariation ausschließen, ist tech- nisch jedoch wenig versiert	Kundennutzen	GV, Entwicklungs- dienstleistung (B) (Tabelle 11)
Explizite Vorgabe des Lösungsprinzips durch den Kunden (technisch versier- ter Kunde, B2B-Bereich)	Kundennutzen	GV, Entwicklungs- dienstleistung (F) (Tabelle 11)
Kunden sind mit Teilsystemen bisher zufrieden	Kundennutzen	ÜV, Baumaschinen (Betonpumpe) (Tabelle 8)

Bedienerschnittstelle soll nicht zu große Veränderungen im Vergleich zu bisherigen Produkten aufweisen	Anwendernutzen	GV, Maschinenbau (G) (Tabelle 11)
Bereits vorhandene Lösungen in Referenzen sind durch Patente geschützt und können nicht übernommen werden	Rahmenbedingungen	PV, Automobil (ZMS) (Tabelle 14)
Keine Referenz verfügbar, von dem ausgehend eine Gestalt- oder gar Übernahmevariation möglich wäre	Rahmenbedingungen	PV, Automobil (A) Produktionstechnik (E) Maschinenbau (I) (Tabelle 14)
Bewusste Funktionsintegration	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	PV, Entwicklungsdienstleistung (C, F) (Tabelle 14)
Strukturprobleme von Bauteilen im Einsatz	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	PV, Baumaschinen (Betonpumpe) (Tabelle 14)
Lösung in der Referenz ist technisch veraltet oder neue Technologie bietet verhältnismäßig große Vorteile	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	PV, Entwicklungsdienstleistung (B) Maschinenbau (G) (Tabelle 14)
Funktionsintegration mit einer Prinzipvariation an Stelle von zwei Gestaltvariationen	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	PV, Entwicklungsdienstleistung (F) (Tabelle 14)
Schaffung von Alleinstellungsmerkmal	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	PV, Maschinenbau (J) (Tabelle 14)
Verbesserung der Funktionserfüllung	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	GV, Automobil (ZMS, $G_3^{ZMS}$ ) (Tabelle 11)
Strukturprobleme von Bauteilen im Einsatz	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	GV, Baumaschinen (Betonpumpe) (Tabelle 11)
Betrachtung einer für das Unternehmen neuen Thematik oder Technologie, wobei Prinzipvariation vermieden werden soll	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	GV, Prüftechnik (K) Werkzeughersteller (H) (Tabelle 11)

Marketing-Entscheidung	Nutzen, Zuordnung nicht eindeutig gegeben	GV, Prüftechnik (K) (Tabelle 11)
Funktion eines anderen, übernommenen Teilsystems (Federn) unter anderen Randbedingungen ermöglichen (Einführung Schmierung)	Nicht in den obigen Dimensionen enthalten	PV, Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ ) (Tabelle 14)
Prinzipvariation (Schwungradteilung und Integration von Wälzlager) erfordert weitere Teilsysteme (Wärmeschutzkappe, ebenfalls Prinzipvariation), um zu funktionieren	Nicht in den obigen Dimensionen enthalten	PV, Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ ) (Tabelle 14)
Strategische Entscheidung bzgl. Marktausrichtung	Nicht in den obigen Dimensionen enthalten	PV, Prüftechnik (K) (Tabelle 14)
Verfügbarkeit neuer Technologien	Nicht in den obigen Dimensionen enthalten	PV, Prüftechnik (K) (Tabelle 14)
Gestaltvariation von angrenzendem Teilsystem	Nicht in den obigen Dimensionen enthalten	GV, Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ ) Prüftechnik (K) Werkzeughersteller (H) (Tabelle 11)

Die Zuordnung zeigt, dass sowohl auf Seiten des Anbieternutzens als auch bei Anwender- und Kundennutzen zusammen jede Variationsart auftritt. Insgesamt können die meisten genannten Gründe für Variationen den Nutzendimensionen oder Rahmenbedingungen zugeordnet werden.

Bei den erfassten Gründen für Variationen, die nicht direkt diesen Dimensionen zugeordnet wurden, werden häufig andere Variationen als Grund genannt. Dies deckt sich mit Phänomenen, die im Stand der Forschung zur Änderungsförderung beschrieben werden (s. Abschnitt 2.5.3.2).

Übrige beobachtete Gründe für Variationen, beispielsweise in Zusammenhang mit Marketing oder Nutzung neuer Technologien, würden mit einem nun konkretisierten Erhebungsschema womöglich ebenfalls in die Nutzendimensionen passen.

Mit den Verknüpfungen zwischen Variationen und ihren Zielen aus Tabelle 24 ergibt sich für die linke Seite des angestrebten Modells schematisch die Struktur in Abbildung 5.17.

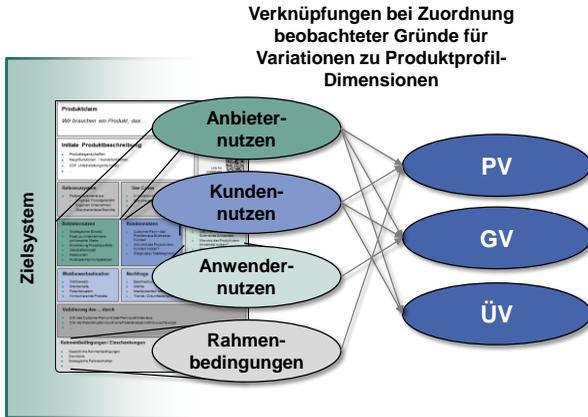


Abbildung 5.17: Verknüpfungen, die sich bei der Zuordnung von Gründen für Variationen zu Produktprofildimensionen gezeigt haben. Hier ohne die Gründe, die nicht spezifisch einer einzelnen Dimension zugeordnet werden konnten sowie Variationen als Gründe für Variationen.

Variationen werden in Form von Aktivitäten der Produktentstehung im Sinne des iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell – durchgeführt. Abbildung 5.18 zeigt die Aktivitäten der Produktentstehung im iPeM hervorgehoben. Im Folgenden wird untersucht, mit welchen der Aktivitäten der Produktentstehung die beobachteten Auswirkungen von Variationen assoziiert werden können und welche weiteren Auswirkungen zu beobachten sind.

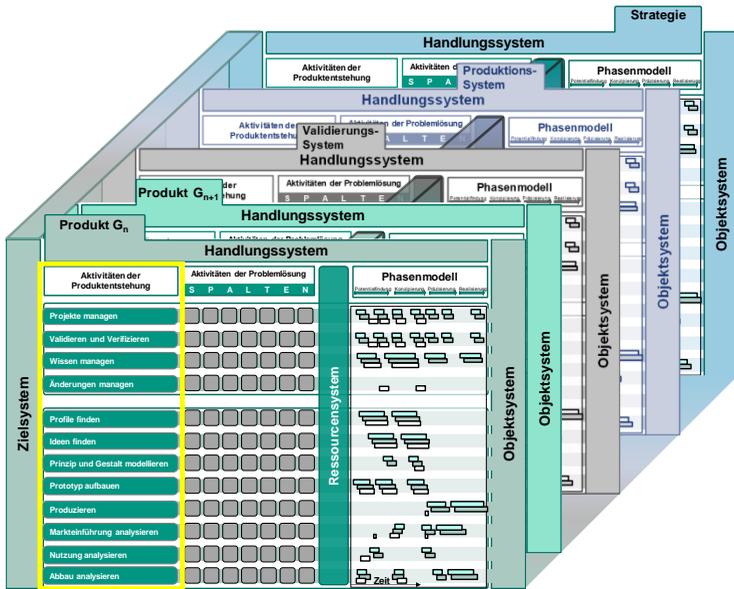


Abbildung 5.18: Variationen werden durch die Aktivitäten der Produktentstehung im iPeM realisiert. Die Aktivitäten der Produktentstehung werden daher genutzt, um die Auswirkungen von Variationen zu strukturieren.

In Tabelle 25 bis Tabelle 28 werden die beobachteten Auswirkungen von Variationen aus Abschnitt 5.1 mit den Aktivitäten der Produktentstehung in den unterschiedlichen Ebenen des iPeM assoziiert. Dabei können manche Beobachtungen auch mit mehreren Aktivitäten in Verbindung gebracht werden und sind daher mehrfach aufgeführt. Es handelt sich also um eine 1:n-Zuordnung von Beobachtungen über die Folgen von Variationen zu Aktivitäten der Produktentstehung.

Weiterhin sind Aktivitäten der Produktentstehung als „Folge von Variationen“ nicht so zu verstehen, dass sie zeitlich nach der Variation kommen. Vielmehr sind die beobachteten Aktivitäten der Produktentstehung, die zur Entwicklung eines bestimmten Teilsystems erforderlich sind, zusammen genommen jeweils als konkrete Ausprägung der betreffenden Variation zu verstehen und in diesem Sinne deren Folge. Die Art der Variation charakterisiert insofern die Entwicklungsaufgabe in Bezug auf das jeweils betrachtete Teilsystem grundlegend, die jeweils erforderlichen

Aktivitäten der Produktentstehung spezifizieren die Implementierung einer Variation im Entwicklungsprozess näher.

Für die Fallbeispiele können jeweils nur die gemachten Beobachtungen eingeordnet werden. Diese Beobachtung decken mitunter nur die Entwicklungsaktivitäten für ausgewählte Teilsysteme einer neuen Produktgeneration ab. Es ist damit jedoch nicht ausgeschlossen, dass in den Fallbeispielen weitere Aktivitäten stattgefunden haben. In mehreren Fällen erscheint dies im Gegenteil naheliegend. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass bei einer Produktionssystementwicklung neben den Aktivitäten „Ideen finden“ und „Prinzip und Gestalt modellieren“ auch entsprechende Validierungsaktivitäten stattgefunden haben, selbst, wenn die aufgeführten Auswirkungen von Variationen nicht direkt darauf hindeuten<sup>10</sup>.

Tabelle 25: Aktivitäten der Produktentstehung in der Entwicklung von  $G_n$ , die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018)<sup>11</sup>, modifiziert.

Produkt $G_n$	
Variationsart & Fallbeispiel	Beobachtete Auswirkung & assoziierte Aktivität der Produktentstehung (mehrere für 1 Variation möglich)
	<b>Projekte managen</b>
PV, Produktionstechnik (E) (Tabelle 15)	Aufwand für Patentierung
PV, Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Risiko: Entwicklung dauert zu lang, um rechtzeitig im Markt zu sein
	<b>Validieren und Verifizieren</b>
PV, Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ ), Maschinenbau (I), (Tabelle 15)	Lebensdauerprobleme (in anderem Teilsystem)

<sup>10</sup> s. auch Abschnitt 2.6.5 zur zentralen Bedeutung von Validierung

<sup>11</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit

<b>PV</b> , Produktionstechnik (E) Entwicklungs-dienstleistung (F) (Tabelle 15)	Folgen schwer abzusehen, starke Abhängigkeit von Expertenwissen
<b>PV</b> , Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ , ZMS, $G_2^{ZMS}$ , ZMS, $G_5^{ZMS}$ , ZMS, $G_6^{ZMS}$ ) Prüftechnik (D), Produktionstechnik (E), Maschinenbau (J) (Tabelle 15)	Validierung ist notwendig
<b>PV</b> , Entwicklungsdienstleistung (C), Produktionstechnik (E) (Tabelle 15)	Grenze zwischen Erfüllung von Kundenwunsch und Überschreiten von Kundenakzeptanz schwer abzusehen
<b>PV</b> , Maschinenbau (G) (Tabelle 15)	Es liegt wenig Erfahrung vor
<b>GV</b> , Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ ), Entwicklungsdienstleistung (B), Maschinenbau (I, J) (Tabelle 12)	Validierung wird notwendig
<b>GV</b> , Entwicklungs-dienstleistung (B, C) (Tabelle 12)	Kundenzufriedenheit erfordert womöglich mehrere Änderungen, viel Validierung und führt so zu Zeitdruck
<b>GV</b> , Werkzeughersteller (H), Maschinenbau (J) (Tabelle 12)	Verhalten für manche Gestaltparameterwerte unbekannt
<b>ÜV</b> , Prüftechnik (D) (Tabelle 9)	Aufwände für genaue Abgrenzung der Referenz in der bisherigen Verwendung und Integration in neue Produktgeneration
	<b>Wissen managen</b>
<b>PV</b> , Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F), Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Erstellung alternativer Lösungen
<b>PV</b> , Produktionstechnik (E) (Tabelle 15)	Aufwand für Patentierung
<b>PV</b> , Prüftechnik (D) Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Kunde oder Anwender muss in der Bedienung der neuen Produktgeneration geschult werden

<b>PV</b> , Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F) (Tabelle 15)	Folgen schwer abzusehen, starke Abhängigkeit von Expertenwissen
<b>PV</b> , Maschinenbau (G) (Tabelle 15)	Es liegt wenig Erfahrung vor
<b>GV</b> , Prüftechnik (D), Prüftechnik (K), Maschinenbau (I) (Tabelle 12)	Abstimmungen zur Systemintegration
<b>ÜV</b> , Prüftechnik (D) (Tabelle 9)	Aufwände für genaue Abgrenzung der Referenz in der bisherigen Verwendung und Integration in neue Produktgeneration
<b>ÜV</b> , Maschinenbau (I) (Tabelle 9)	Risiko: Integration von Referenzen verschiedener Hersteller
	<b>Änderungen managen</b>
<b>PV</b> , Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ ) (Tabelle 15)	Prinzipvariation (Schwungradteilung und Integration von Wälzlager) erfordert weitere Teilsysteme (Wärmeschutzkappe, ebenfalls Prinzipvariation), um zu funktionieren
<b>PV</b> , Entwicklungsdienstleistung (C, F) (Tabelle 15)	Änderung von Systemstruktur und Zuordnung von Funktionen zu Teilsystemen
<b>PV</b> , Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F) (Tabelle 15)	Folgen schwer abzusehen, starke Abhängigkeit von Expertenwissen
<b>GV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, C) (Tabelle 12)	Kundenzufriedenheit erfordert womöglich mehrere Änderungen, viel Validierung und führt so zu Zeitdruck
<b>ÜV</b> , Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ ) (Tabelle 9)	Gestaltvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Wälzlagerfett), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen

<p><b>ÜV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_2^{ZMS}</math>) (Tabelle 9)</p>	<p>Prinzipvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Federschmierung), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen</p>	
	<p><b>Profile finden</b></p>	
	<p><b>Ideen finden</b></p>	
<p><b>PV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_2^{ZMS}</math>) (Tabelle 15)</p>	<p>Prinzipvariation (Schwungradteilung und Integration von Wälzlager) erfordert weitere Teilsysteme (Wärme-schutzkappe, ebenfalls Prinzipvariation), um zu funktionieren</p>	
<p><b>PV</b>, Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F), Maschinenbau (I) (Tabelle 15)</p>	<p>Erstellung alternativer Lösungen</p>	
<p><b>GV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_3^{ZMS}</math>), (Tabelle 12)</p>	<p>Gestaltvariation angrenzender Teilsysteme wird notwendig</p>	
<p><b>GV</b>, Entwicklungsdienstleistung (C) (Tabelle 12)</p>	<p>Aufwand für Erstellung alternativer Lösungen</p>	
<p><b>ÜV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_2^{ZMS}</math>) (Tabelle 9)</p>	<p>Gestaltvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Wälzlagerfett), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen</p>	
<p><b>ÜV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_2^{ZMS}</math>) (Tabelle 9)</p>	<p>Prinzipvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Federschmierung), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen</p>	
	<p><b>Prinzip und Gestalt modellieren</b></p>	
<p><b>PV</b>, Maschinenbau (I) (Tabelle 15)</p>	<p>Konstruktion von Funktionsmuster/ Aufbau von Prototypen</p>	
<p><b>PV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_1^{ZMS}</math>), Maschinenbau (I) (Tabelle 15)</p>	<p>Lebensdauerprobleme (in anderem Teilsystem)</p>	

<p><b>PV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_2^{ZMS}</math>) (Tabelle 15)</p>	<p>Prinzipvariation (Schwungradteilung und Integration von Wälzlager) erfordert weitere Teilsysteme (Wärmeschutzkappe, ebenfalls Prinzipvariation), um zu funktionieren</p>
<p><b>PV</b>, Entwicklungsdienstleistung (C, F) (Tabelle 15)</p>	<p>Änderung von Systemstruktur und Zuordnung von Funktionen zu Teilsystemen</p>
<p><b>PV</b>, Prüftechnik (D), Produktionstechnik (E), Maschinenbau (G, I) (Tabelle 15)</p>	<p>Konstruktionsaufwände</p>
<p><b>PV</b>, Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F), Maschinenbau (I) (Tabelle 15)</p>	<p>Erstellung alternativer Lösungen</p>
<p><b>PV</b>, Maschinenbau (I) (Tabelle 15)</p>	<p>Software-Programmierung</p>
<p><b>GV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_3^{ZMS}</math>) (Tabelle 12)</p>	<p>Gestaltvariation angrenzender Teilsysteme wird notwendig</p>
<p><b>GV</b>, Entwicklungsdienstleistung (C) (Tabelle 12)</p>	<p>Aufwand für Erstellung alternativer Lösungen</p>
<p><b>GV</b>, Entwicklungsdienstleistung (B, F), Prüftechnik (D), Maschinenbau (G) (Tabelle 12)</p>	<p>Ausarbeiten der neuen Lösung, insbesondere Konstruktion</p>
<p><b>GV</b>, Entwicklungsdienstleistung, (B, C, F), Maschinenbau (I), Werkzeughersteller (H) (Tabelle 12)</p>	<p>Aufwände für Aufbau von Entwicklungsgenerationen (Prototypen, Funktionsmuster) (auch Risiko/ Herausforderung)</p>
<p><b>ÜV</b>, Automobil (ZMS, <math>G_2^{ZMS}</math>) (Tabelle 9)</p>	<p>Gestaltvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Wälzlagerfett), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen</p>

<b>ÜV</b> , Automobil (ZMS, $G_2^{ZMS}$ ) (Tabelle 9)	Prinzipvariation anderer Teilsysteme wird notwendig (Federschmierung), um Betrieb des übernommenen Teilsystems (Federn) unter veränderten Randbedingungen zu ermöglichen
<b>ÜV</b> , Prüftechnik (D) (Tabelle 9)	Aufwände für genaue Abgrenzung der Referenz in der bisherigen Verwendung und Integration in neue Produktgeneration
<b>ÜV</b> , Maschinenbau (I) (Tabelle 9)	Risiko: Integration von Referenzen verschiedener Hersteller
<b>Prototyp aufbauen</b>	
<b>PV</b> , Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Konstruktion von Funktionsmuster/ Aufbau von Prototypen
<b>GV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, C, F), Maschinenbau (I), Werkzeughersteller (H) (Tabelle 12)	Aufwände für Aufbau von Entwicklungsgenerationen (Prototypen, Funktionsmuster) (auch Risiko/ Herausforderung)
<b>Produzieren</b>	
<b>PV</b> , Entwicklungsdienstleistung (C) (Tabelle 15)	Herausforderung/ Risiko: Lieferantfindung und -integration mit zufriedenstellenden Ergebnissen
<b>GV</b> , Werkzeughersteller (H) (Tabelle 12)	Herausforderung Produktionsanlauf
<b>GV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, F), Maschinenbau (I) (Tabelle 12)	Abhängigkeit von Zulieferer, Steuerung der Zusammenarbeit
<b>Markteinführung analysieren</b>	
<b>PV</b> , Prüftechnik (D) Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Kunde oder Anwender muss in der Bedienung der neuen Produktgeneration geschult werden
<b>PV</b> , Maschinenbau (G) (Tabelle 15)	Integration neuer Lösung in bestehendes Produktportfolio

<b>PV</b> , Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Bereitstellung neu notwendig werden- der Infrastruktur für Systembetrieb bei Kunde ist unklar	
		<b>Nutzung analysieren</b>
<b>PV</b> , Prüftechnik (D) Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Kunde oder Anwender muss in der Be- dienung der neuen Produktgeneration geschult werden	
		<b>Abbau analysieren</b>

Tabelle 26: Aktivitäten der Produktentstehung in der Produktionssystementwicklung, die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018)<sup>12</sup>, modifiziert.

		<b>Produktionssystem</b>
<b>Variationsart &amp; Fallbeispiel</b>	<b>Beobachtete Auswirkung &amp; assoziierte Aktivität der Produktentstehung</b> (mehrere für 1 Variation möglich)	
		<b>Projekte managen</b>
<b>PV</b> , Entwicklungsdienstleistung (C) (Tabelle 15)	Herausforderung/ Risiko: Lieferanten- findung und -integration mit zufrieden- stellenden Ergebnissen	
<b>GV</b> , Baumaschinen (Betonpumpe) (Tabelle 12)	Neue Verträge mit Zulieferern zu über- wiegend günstigeren Konditionen	
<b>GV</b> , Entwicklungs- dienstleistung (B, F), Maschinenbau (I) (Tabelle 12)	Abhängigkeit von Zulieferer, Steuerung der Zusammenarbeit	
		<b>Validieren und Verifizieren</b>

<sup>12</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

<b>PV</b> , Entwicklungsdienstleistung (C) (Tabelle 15)	Herausforderung/ Risiko: Lieferantenfindung und -integration mit zufriedenstellenden Ergebnissen	
<b>GV</b> , Werkzeughersteller (H) (Tabelle 12)	Herausforderung Produktionsanlauf	
<b>ÜV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, C), Prüftechnik (D) (Tabelle 9)	Bei Übernahmevariation von externer Referenz Kosten für Beschaffung (Lieferantenfindung, Spezifikation, Prüfung)	
	<b>Wissen managen</b>	
	<b>Änderungen managen</b>	
<b>GV</b> , Werkzeughersteller (H) (Tabelle 12)	Herausforderung Produktionsanlauf	
	<b>Profile finden</b>	
	<b>Ideen finden</b>	
<b>PV</b> , Automobil (ZMS, $G_4^{ZMS}$ ), Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F) (Tabelle 15)	Produktionssystementwicklung wird notwendig	
<b>GV</b> , Automobil (ZMS, $G_3^{ZMS}$ ) (Tabelle 12)	Produktionssystementwicklung wird notwendig	
	<b>Prinzip und Gestalt modellieren</b>	
<b>PV</b> , Automobil (ZMS, $G_4^{ZMS}$ ), Produktionstechnik (E), Entwicklungsdienstleistung (F) (Tabelle 15)	Produktionssystementwicklung wird notwendig	
<b>GV</b> , Automobil (ZMS, $G_3^{ZMS}$ ) (Tabelle 12)	Produktionssystementwicklung wird notwendig	
<b>GV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, F), Maschinenbau (I) (Tabelle 12)	Abhängigkeit von Zulieferer, Steuerung der Zusammenarbeit	
<b>ÜV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, C), Prüftechnik (D) (Tabelle 9)	Bei Übernahmevariation von externer Referenz Kosten für Beschaffung (Lieferantenfindung, Spezifikation, Prüfung)	

		<div style="background-color: #8090a0; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; display: inline-block;">Prototyp aufbauen</div>
		<div style="background-color: #8090a0; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; display: inline-block;">Produzieren</div>
<b>PV</b> , Entwicklungsdienstleistung (C) (Tabelle 15)	Herausforderung/ Risiko: Lieferantenfindung und -integration mit zufriedenstellenden Ergebnissen	
<b>GV</b> , Baumaschinen (Betonpumpe) (Tabelle 12)	Neue Verträge mit Zulieferern zu überwiegend günstigeren Konditionen	
		<div style="background-color: #8090a0; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; display: inline-block;">Markteinführung analysieren</div>
		<div style="background-color: #8090a0; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; display: inline-block;">Nutzung analysieren</div>
		<div style="background-color: #8090a0; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; display: inline-block;">Abbau analysieren</div>

Tabelle 27: Aktivitäten der Produktentstehung in der Validierungssystementwicklung, die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018)<sup>13</sup>, modifiziert.

Variationsart & Fallbeispiel	Beobachtete Auswirkung & assoziierte Aktivität der Produktentstehung (mehrere für 1 Variation möglich)	
	<div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 2px;">Projekte managen</div> <div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 2px;">Validieren und Verifizieren</div> <div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 2px;">Wissen managen</div> <div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 2px;">Änderungen managen</div> <div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 2px;">Profile finden</div> <div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 2px;">Ideen finden</div> <div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;">Prinzip und Gestalt modellieren</div>	
<b>PV</b> , Maschinenbau (I) (Tabelle 15)	Konstruktion von Funktionsmuster/ Aufbau von Prototypen	
<b>GV</b> , Entwicklungsdienstleistung (B, C, F), Maschinenbau (I), Werkzeughersteller (H) (Tabelle 12)	Aufwände für Aufbau von Entwick- lungsgenerationen (Prototypen, Funkti- onsmuster) (auch Risiko/ Herausforde- rung)	

<sup>13</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

	Prototyp aufbauen
	Produzieren
	Markteinführung analysieren
	Nutzung analysieren
	Abbau analysieren

Tabelle 28: Aktivitäten der Produktentstehung in der Strategieentwicklung, die mit den beobachteten Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen assoziiert werden. Für die Beobachtungen aus den mit Interviews untersuchten Fallbeispielen basierend auf ALBERS, RAPP UND PEGLOW ET AL. (2019), WATTENBERG (2018)<sup>14</sup>, modifiziert.

	Beobachtete Auswirkung & assoziierte Aktivität der Produktentstehung (mehrere für 1 Variation möglich)	
Variationsart & Fallbeispiel	Beobachtete Auswirkung & assoziierte Aktivität der Produktentstehung	
	Projekte managen	
PV, Maschinenbau (I), Prüftechnik (K) (Tabelle 15)	Risiko: Marktentwicklung schwer abzu-sehen, Aufwand für Prinzipvariation lohnt sich dann womöglich nicht (mehr)	
	Validieren und Verifizieren	
PV, Maschinenbau (I), Prüftechnik (K) (Tabelle 15)	Risiko: Marktentwicklung schwer abzu-sehen, Aufwand für Prinzipvariation lohnt sich dann womöglich nicht (mehr)	

<sup>14</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

	<b>Wissen managen</b>	
	<b>Änderungen managen</b>	
<b>PV, Maschinenbau (I), Prüftechnik (K)</b> (Tabelle 15)	Risiko: Marktentwicklung schwer abzusehen, Aufwand für Prinzipvariation lohnt sich dann womöglich nicht (mehr)	
	<b>Profile finden</b>	
<b>PV, Maschinenbau (I), Prüftechnik (K)</b> (Tabelle 15)	Risiko: Marktentwicklung schwer abzusehen, Aufwand für Prinzipvariation lohnt sich dann womöglich nicht (mehr)	
	<b>Ideen finden</b>	
	<b>Prinzip und Gestalt modellieren</b>	
<b>PV, Maschinenbau (G)</b> (Tabelle 15)	Integration neuer Lösung in bestehendes Produktportfolio	
<b>GV, Baumaschinen (Betonpumpe)</b> (Tabelle 12)	Vorübergehend wieder exklusiver Anbieter von Ersatzteilen (kann auch bei Prinzipvariation gelten)	
	<b>Prototyp aufbauen</b>	
	<b>Produzieren</b>	
	<b>Markteinführung analysieren</b>	
	<b>Nutzung analysieren</b>	
	<b>Abbau analysieren</b>	

Man kann erkennen, dass sich alle drei Variationsarten in verschiedenen durch das iPeM modellierten Bereichen und dort in verschiedenen Aktivitäten der Produktentstehung auswirken können. Lediglich für die Entwicklung der übernächsten Produktgeneration,  $G_{n+1}$ , erfolgte keine Zuordnung. Ein Grund hierfür kann im Studiendeingängen liegen, das vor allem auf  $G_n$  fokussierte.

Ebenso kann es im Studiendesign begründet liegen, dass Gestalt- und Prinzipvariation den Großteil der Beobachtungen ausmachen, da in der Studie insbesondere neu entwickelte Teilsysteme näher betrachtet wurden.

In Tabelle 29 sind Auswirkungen von Variationen in den Fallbeispielen aufgeführt, die nicht unmittelbar mit Aktivitäten der Produktentstehung assoziiert wurden. Hierbei zeigt sich, dass es sich um verschiedene Risiken handelt, beispielsweise technischer Natur im Hinblick auf die angestrebte Funktionserfüllung, oder auch wirtschaftlich-rechtlicher Natur wie im Falle der angeführten Gefahr von Vertragsstrafen bei Zeitverzug.

Tabelle 29: Auswirkungen von Variationen, die nicht unmittelbar mit Aktivitäten der Produktentstehung assoziiert wurden.

Variationsart & Fallbeispiel	Auswirkung von Variation als Risiko
<b>PV</b> , Automobil (ZMS, $G_6^{ZMS}$ ) (Tabelle 15)	Beeinträchtigung der Funktionserfüllung
<b>PV</b> , Prüftechnik (K) (Tabelle 15)	Anfängliche Probleme bei der Funktionserfüllung
<b>PV</b> , Maschinenbau (G) (Tabelle 15)	Risiko: Erzielbare Nutzensteigerung reicht nicht aus, um Anforderungen an die neue Produktgeneration zu erfüllen
<b>PV</b> , Prüftechnik (K) (Tabelle 15)	Risiko technische Sicherheit
<b>GV</b> , Prüftechnik (K) (Tabelle 12)	Risiko Datensicherheit bei IoT
<b>GV</b> , Baumaschinen (Betonpumpe) (Tabelle 12)	Bereits vorhandene Lagerbestände von Bauteilen können womöglich nicht mehr verwendet werden und müssen entsorgt werden (kann auch bei Prinzipvariation gelten)
<b>GV</b> , Automobil (ZMS, $G_5^{ZMS}$ ) (Tabelle 12)	Beanspruchbarkeit des Teilsystems nimmt ab
<b>GV</b> , Entwicklungs-dienstleistung (F) (Tabelle 12)	Vertragsstrafen bei Zeitverzug
<b>GV</b> , Prüftechnik (K) (Tabelle 12)	Kompatibilität von Teilsystemen
<b>GV</b> , Automobil (A), Maschinenbau (G) (Tabelle 12)	Risiko: Erzielbare Nutzensteigerung reicht nicht aus, um Anforderungen an die neue Produktgeneration zu erfüllen

ÜV, Automobil (ZMS, $G_1^{ZMS}$ ) (Tabelle 9)	Funktionserfüllung beeinträchtigt auf Grund anderer Randbedingungen in der neuen Produktgeneration
ÜV, Entwicklungsdienstleistung (F), Maschinenbau (I) (Tabelle 9)	Erhöhte Abhängigkeit von Zulieferer

Für die Darstellung der beobachteten Zusammenhänge ist zu berücksichtigen, dass insbesondere Validierungs- und Produktionssystem, aber auch die Strategie, s. Abschnitt 2.3.2, als Systeme ebenso wie neue Produkte durch Variationen entwickelt werden. Auswirkungen von Variationen in der Produktentwicklung auf beispielsweise das Produktionssystem erfolgen daher über Variationen in der Produktionssystementwicklung. Ebenso ist der umgekehrte Fall prinzipiell möglich, dass Variationen in der Produktionssystementwicklung zu Variationen in der Produktentwicklung führen.

Das enge Wechselspiel zwischen Variationen in der Produktentwicklung und Variationen in der Produktionssystementwicklung kann beispielsweise an mehreren Stellen in der Fallstudie zu den Produktgenerationen des Zweimassenschwungrads beobachtet werden (Albers, Bursac & Rapp, 2017):

- Durch die Einführung von Bogenfedern an Stelle von gerade Zug-Druck-Federn in der dritten untersuchten Produktgeneration des Zweimassenschwungrads wurden umfangreiche Produktionssystementwicklungs-Aktivitäten erforderlich, die unter Einbezug eines Lieferanten über Organisationsgrenzen hinweg erfolgten (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 24).
- Das Entwicklungsziel Produktionskosten zu senken führte bei der Entwicklung der vierten untersuchten Produktgeneration des Zweimassenschwungrad zunächst zu einer Variation in der Produktionssystementwicklung in Form des Übergangs von Gussfertigung zu Tiefziehen. Weiterhin ergaben sich durch das Einformen von Gewinden in die tiefgezogenen Bauteile wie in Abbildung 5.19 gezeigt neue konstruktive Möglichkeiten für die Befestigung des Kupplungsdeckels und damit Variationen in der Produktentwicklung. (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 25–27)

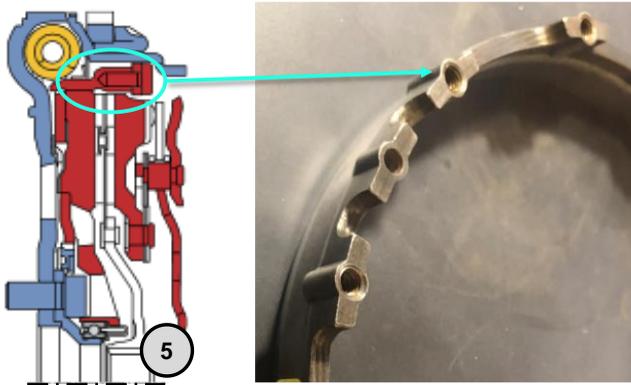


Abbildung 5.19: In tiefgezogenes Blech eingeformte Gewinde für Verschraubungen des Kupplungsdeckels an einem ZMS als Beispiel dafür, welche konstruktiven Möglichkeiten durch das enge Wechselspiel von Variationen in der Produktentwicklung und Variationen in der Produktionssystementwicklung im Rahmen des Produkt-Produktions-Co-Designs entstehen können (A. Albers, persönl. Mitteilung, 07.12.2020). Darstellung des Einbauortes anhand der fünften untersuchten ZMS-Produktgeneration.

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung lag der Fokus auf Variationen in der Produktentwicklung und deren Einordnung auf Basis des Modells der PGE. Variationen an anderen Systemen wurden nicht explizit eingeordnet<sup>15</sup>. Zur Darstellung der zuvor beschriebenen Wechselwirkungen wird daher das in Abbildung 5.20 gezeigte Schema verwendet.

---

<sup>15</sup> Dies ist Gegenstand laufender und künftiger Untersuchungen, s. hierzu beispielsweise die Abschnitte 9.1 und 9.4.

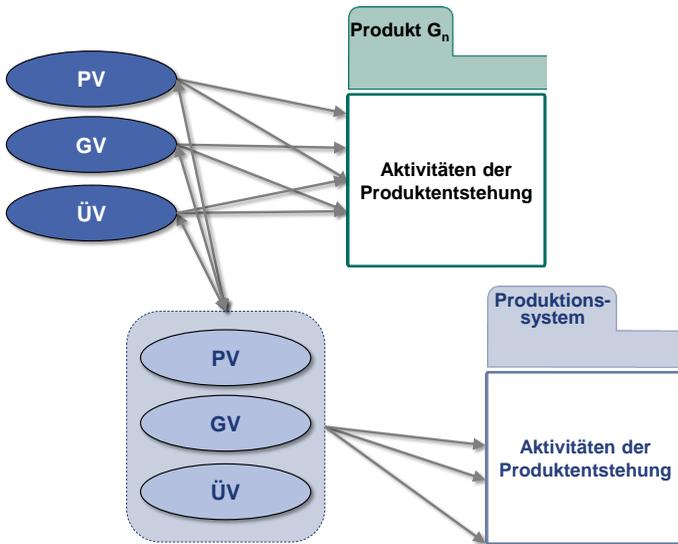


Abbildung 5.20: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemen über die Variationen in der jeweiligen Systementwicklung am Beispiel der Wechselwirkungen im Produkt-Produktions-Co-Design. Zwischen den Variationen in den verschiedenen Systementwicklungen sind beide Beziehungsrichtungen möglich.

Mindestens für Gestalt-Funktion-Zusammenhänge kann davon ausgegangen werden, dass zur Identifikation von Variationen in der Validierungs- und der Produktionssystementwicklung prinzipiell die gleichen C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren anwendbar sind, wie in Abschnitt 5.2.2.1 vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung weiterer Elemente, beispielsweise von Produktionsprozessen, sind auch weitere Indikatoren denkbar (s. hierzu beispielsweise Abschnitt 9.1).

In Abbildung 5.21 ist die Vernetzung zwischen Variationsarten einerseits und Aktivitäten der Produktentstehung in verschiedenen Bereichen und verschiedene Risiken andererseits als deren Auswirkungen auf Basis der Beobachtungen aus Tabelle 25 bis Tabelle 29 und gemäß dem Schema aus Abbildung 5.20 dargestellt.

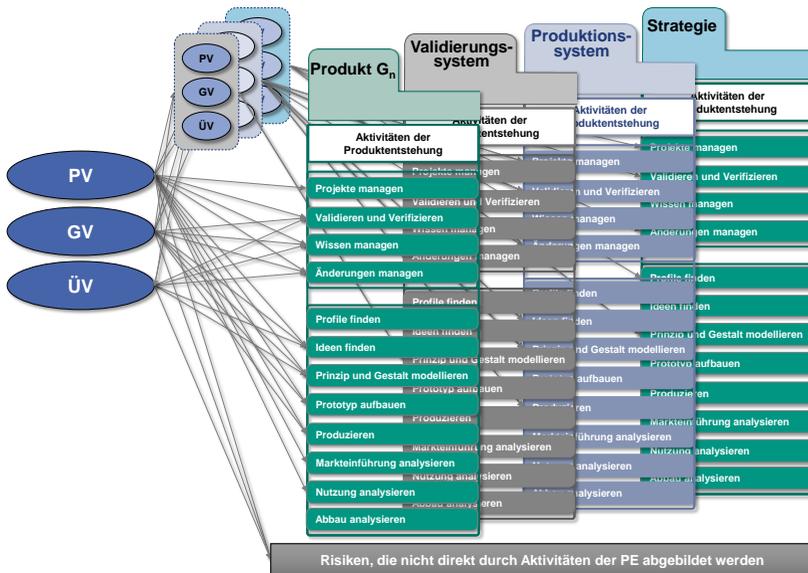


Abbildung 5.21: Vernetzung von Variationen mit ihren Auswirkungen in Form Aktivitäten der Produktentstehung in verschiedenen Bereichen und weiteren Risiken, basierend auf Tabelle 25 bis Tabelle 29 und dem Schema aus Abbildung 5.23.

Die Struktur in Abbildung 5.21 vervollständigt das Gesamtmodell, das sich aus den Abschnitten 5.2.2.1 bis 5.2.2.3 ergibt. Das Modell wird im nächsten Abschnitt zusammengefasst dargestellt und die zentralen Erkenntnisse werden erläutert.

### 5.2.3 Zwischenfazit

Mit den vorgeschlagenen Ansätzen zur messbaren Erfassung und Strukturierung der Beobachtungen aus den untersuchten Fallbeispielen ergibt sich insgesamt das Modell in Abbildung 5.22. Dabei wurde berücksichtigt, dass die in Abschnitt 5.2.2.2 genannten Gründe für die Wahl bestimmter Referenzsystemelemente wie beispielsweise Kundenanforderungen ebenfalls Zielsystem- bzw. Produktprofildimensionen zugeordnet werden können. Weiterhin wurde berücksichtigt, dass, vergleichbar zur

Darstellung für die Variationen im vorigen Abschnitt, auch die Entwicklung der anderen Systeme, beispielsweise von Produkt- und Validierungssystem, jeweils auf Basis eines Referenzsystems erfolgt. Darüber hinaus wurde berücksichtigt, dass Variationen unmittelbar weitere Variationen nach sich ziehen können, wie beispielsweise aus Tabelle 24 hervorgeht.

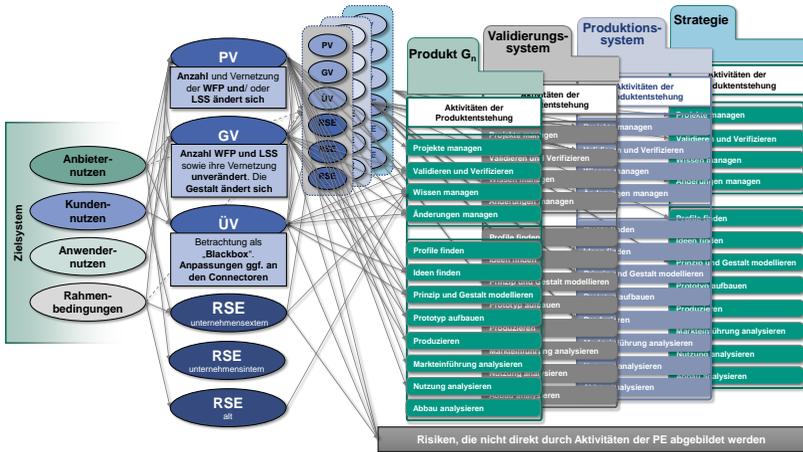


Abbildung 5.22: Vorgeschlagenes Modell zur Strukturierung von Gründen für und Auswirkungen von Variationen sowie die Wahl bestimmter Referenzsystemelemente. Die Modellstruktur bietet eine Grundlage für weitergehende empirische Untersuchungen. Die Variationsarten sowie die Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente nehmen im Modell die Rolle von Schlüsselfaktoren für den Zusammenhang zwischen Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken ein. Dargestellt sind nur in den Fallstudien beobachtete Verknüpfungen. Im Allgemeinen können in der Praxis weitere Zusammenhänge auftreten.

Die Gründe sowohl für Variationen als auch die Wahl bestimmter Referenzsystemelemente sind damit auf das angestrebte Innovationspotenzial in Form der verschiedenen Nutzensausprägungen unter gegebenen Randbedingungen zurückzuführen. Die Auswirkungen von Variationen als auch der Wahl bestimmter Referenzsystemelemente lassen sich zum einen Aktivitäten der Produktentstehung in verschiedenen Bereichen im Sinne des iPeM zuordnen als auch verschiedenen Formen von

Risiko, die darüber hinaus gehen. Variationen sind beschreiben dabei jede Systementwicklung. Der Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit liegt auf Variationen in der in der Produktentwicklung.

Man kann in Abbildung 5.22 weiterhin erkennen, dass es sich bei den Variationsarten und bei den beobachteten Charakteristika von Referenzsystemelementen um eine verhältnismäßig geringe Anzahl an Faktoren handelt, die einerseits von mehrere Variablen beeinflusst werden und andererseits selbst eine große Zahl an Variablen beeinflussen. Sie haben somit den Charakter von Schlüsselfaktoren (vgl. dazu beispielsweise auch die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Szenarien (Fink, Schlake & Siebe, 2001)) in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken. Sie sind damit zentrale Faktoren für die Planung und Steuerung von Entwicklungsprozessen. Im Folgenden wird auf wichtige Aspekte in verschiedenen Teilbereichen für die weitere Anwendung und Evaluation des vorgeschlagenen Modells eingegangen.

Die **C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren** für Variationsarten werden durch drei Faktoren wesentlich beeinflusst. Dies ist zunächst das für den Vergleich herangezogene Referenzsystemelement, das die „Vergleichsbasis“ bietet. Hier ist davon auszugehen, dass dieses durch den Entwickler prinzipiell spezifiziert werden kann, da es im Entwicklungsprozess selbst die eigene Arbeitsgrundlage bildet. Bei einer retrospektiven Analyse von Variationen ist allerdings damit zu rechnen, dass ohne Entwicklerwissen oder ausreichende Dokumentation des Referenzsystems eine eindeutige Identifikation des zu Grunde liegenden Referenzsystemelements nicht zwangsläufig eindeutig möglich ist.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Definition des betrachteten Systemausschnitts, das heißt der Teilsystemstruktur, die bei der Identifikation von Variationsarten verwendet wird. Wird beispielsweise ein großer Systemausschnitt, der mehrere WFP und LSS beinhaltet, betrachtet und mit dem zugehörigen Referenzsystemelement verglichen, kann bei den hier vorgeschlagenen Indikatoren bereits ein Wegfallen einzelner WFP oder LSS dazu führen, dass der gesamte Bereich als Prinzipvariation identifiziert wird. Mehr noch können unterschiedlich große Systembereiche als Prinzipvariation identifiziert werden, solange sie den ausschlaggebenden Teilbereich beinhalten, während der Rest als Übernahmevariation betrachtet wird.

Ein dritter Einflussfaktor ist die gewählte Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung. Diese ist prinzipiell variabel, s. Abschnitt 2.2.2. Unterschiedliche Modellierungstiefen können allerdings zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Verwendung der vorgeschlagenen Indikatoren führen (s. Abbildung 5.23).

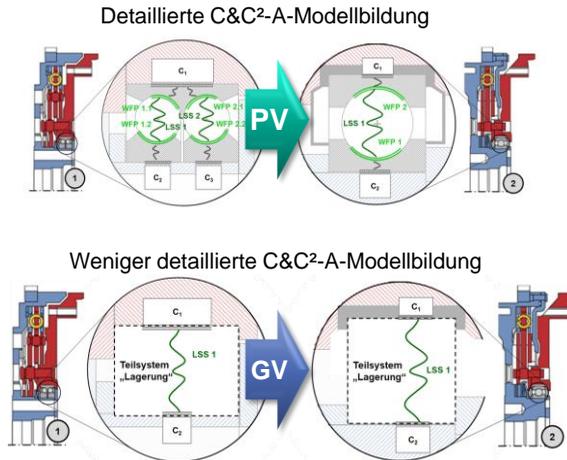


Abbildung 5.23: Unterschiedliche Detailgrade bei der Systemanalyse und der dazu genutzten C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung führen womöglich zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der retrospektiven Identifikation von Variationsarten. Im unteren (hypothetischen) Fall wird das gesamte Teilsystem Lagerung als eine Struktur modelliert und nicht detaillierter analysiert. Die vorgenommene Prinzipvariation kann so mit den vorgeschlagenen Indikatoren für Variationsarten nicht identifiziert werden. Abbildung nach Vortragsfolien von Rapp und Barg et al. (2020), modifiziert.

Im Extremfall kann beispielsweise ein ZMS im Gesamtantriebsstrang als eine einzige LSS modelliert werden. Der Vergleich der ersten und zweiten Generation ergäbe dann für das Gesamtsystem eine Gestaltvariation. Die Beobachtungen aus Abschnitt 5.1 zeigen jedoch, dass dieses Ergebnis zu kurz greifen würde.

Die drei beschriebenen Faktoren schlagen sich über die Identifikation der Variationsart einzelner Teilsysteme schlussendlich auch in der Berechnung von Variationsanteilen nach Formel 2 in Abschnitt 2.4.5 nieder.

Wird eine sehr detaillierte C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung als Grundlage verwendet, die darüber hinaus das gesamte Wirknetz oder gar die gesamte Wirkstruktur für alle Systemfunktionen in allen Zuständen (s. Abschnitt 2.2.2) beinhaltet, entsteht schon bei begrenzter Systemkomplexität ein hoher erforderlicher Modellierungsaufwand für die Identifikation von Variationsarten. Hier ist gegebenenfalls die Anwendbarkeit zu

evaluieren. Der Einfluss der drei genannten Faktoren wird im Rahmen der deskriptiven Studie II näher untersucht.

Mit dem Modellelement „Referenzsystem“ wird das Beschreibungsmodell der PGE erweitert und damit umfangreicher. Diese Erweiterung ist jedoch notwendig, um die Beobachtungen aus den Fallbeispielen zu erfassen. Die differenzierte Betrachtung verschiedener **Referenzsystemelemente und ihrer Charakteristika** sowie deren Wechselwirkungen verspricht, diese differenziert beschreiben und so relevante Faktoren für Innovationspotenziale und Entwicklungsrisiken empirisch untersuchen zu können.

Die Verwendung der Systemtheorie (s. Abschnitt 2.2.1) als Basis macht deren Vorteile für das Beschreibungsmodell der PGE nutzbar. So ist zu erwarten, dass sich das Modell domänen-, disziplin- und branchenübergreifend anwenden lässt. Weiterhin sind verschiedene ineinander überführbare Detailstufen der Betrachtung und Beschreibung möglich. Darüber hinaus kann an die Beschreibung des Produktentstehungsprozesses als Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem angeknüpft werden. Damit ist die Voraussetzung gegeben, zu beschreiben, dass auch bei der Zielbildung stets auf bereits Vorhandenem aufgebaut wird (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, 2019c).

Das Referenzsystem in der Entwicklung einer neuen Produktgeneration aktiv zu gestalten muss eine Aufgabe der Entwickelnden sein. So müssen potenzielle Referenzsystemelemente gesucht, identifiziert, bewertet und ausgewählt – oder auch begründet ausgesondert – werden. Referenzsystemelemente müssen weiterhin analysiert werden, beispielsweise hinsichtlich ihres Gestalt-Funktion-Zusammenhangs oder in Bezug auf zugehörige Zielsysteminformationen, sofern dieses Wissen noch nicht vorhanden oder zugänglich ist. Das Referenzsystem ist daher nicht statisch und kann auch, zusammen mit der zugehörigen Begründung, Elemente beinhalten, die zwar analysiert, schlussendlich aber ausgeschlossen wurden. (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, 2019c)

Hierauf aufbauend ist in weiteren Studien auch zu untersuchen, welche Charakteristika von Referenzsystemelementen mit vergleichbarer Bedeutung wie die bereits dargestellten Faktoren gefunden werden können. Die Ergebnisse einer ersten Studie hierzu sind in Abschnitt 5.3.2.2 beschrieben.

Bei den **Auswirkungen von Variationen als Aktivitäten der Produktentstehung** kann festgehalten werden (Albers, Rapp, Peglow et al., 2019, S. 6):

- Jede Variation kann in ihrer Realisierung mehrere Aktivitäten der Produktentstehung beinhalten. Variationen können in dieser Hinsicht als Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung verstanden werden.
- Die Zusammensetzung dieses Sets an Aktivitäten der Produktentstehung kann je nach Variationsart unterschiedlich sein.

- Übernahmevariationen führen nicht zwangsläufig dazu, dass keine Aktivitäten durchzuführen sind, sondern eher Aktivitäten in einer anderen Zusammensetzung. So beinhalten beispielsweise Gestalt- und Prinzipvariationen vermutlich mehr Anteile der Aktivität „Modellieren von Prinzip und Gestalt“ als Übernahmevariationen. Nichtsdestotrotz kann diese Aktivität auch bei Übernahmevariationen erforderlich sein.
- Die beobachteten Zusammenhänge finden sich in jeder der durch die iPeM-Ebenen dargestellten Systementwicklungen, wobei Wechselwirkungen zwischen den Ebenen bestehen.

Weiter kann unter der Annahme, dass die Ausprägung dieser Zusammenhänge branchen- oder produktspezifischen Einflussfaktoren unterliegt, die folgende Hypothese aufgestellt werden (Albers, Rapp, Peglow et al., 2019, S. 6):

**Für einen definierten Produktbereich sind die Variationen wiederkehrende Muster aus Aktivitäten der Produktentstehung, die in Tendenz über mehrere Produktgenerationen innerhalb des jeweiligen Produktbereichs auftreten.**

Das bedeutet, dass eine bestimmte Variationsart in der Entwicklung bestimmter Produkte eventuell stets mit ähnlichen Umfängen ausgewählter Aktivitäten der Produktentstehung verbunden ist. Solche Aktivitätenmuster stellen eine mögliche Grundlage zur Planung von Entwicklungsaktivitäten dar. Der jeweilige Produktbereich, in dem beobachtete Muster gültig sind, kann vermutlich in unterschiedlichen Fällen von einzelnen Produktfamilien über einzelne Unternehmen bis hin zu ganzen Branchen reichen. Eine genauere Abgrenzung solcher Produktbereiche und Aktivitätenmuster bedarf weiterer Untersuchungen. Ansätze wie der von Peglow et al. (2019) zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit neuer Produktvarianten bei Hochdruckpumpen können jedoch beispielsweise durch die beschriebenen Aktivitätenmuster vermutlich erklärt werden (Albers, Rapp, Peglow et al., 2019).

Abschließend ist zu untersuchen, wie Risiken in Folge von Variationen weiter strukturiert werden können und welche bekannten Risikoformen mit Variationen assoziiert werden können. Dies wird ebenfalls im nächsten Abschnitt untersucht.

### 5.3 Evaluation des vorgeschlagenen Modells

Ziel dieses Abschnittes ist es, drei Kernelemente des vorgeschlagenen Modells zu evaluieren. Diese sind die C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren für Variationsarten, Charakteristika von Referenzsystemelementen als Einflussfaktoren und Risiken, die

sich als Folge von Variationen ergeben können und nicht durch Aktivitäten der Produktentstehung abgebildet werden. Damit wird Forschungsfrage I.3 wie in Abbildung 5.24 gezeigt beantwortet.

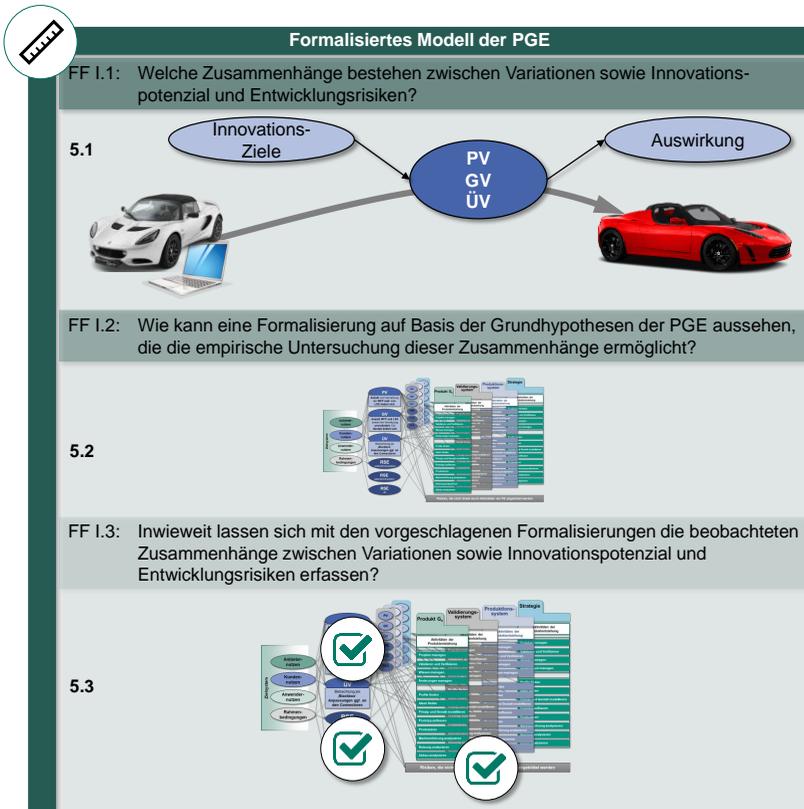


Abbildung 5.24: In diesem Abschnitt werden drei Elemente des vorgeschlagenen Modells evaluiert: Die C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren für Variationsarten, Charakteristika von Referenzelementen als Einflussfaktoren und Risiken als Folge von Variationen oder gewählter Referenzelemente.

In Abschnitt 5.3.1 sind die dabei genutzten Forschungsansätze beschrieben. Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen folgen in Abschnitt 5.3.2. Die wesentlichen Erkenntnisse hieraus sind in Abschnitt 5.3.3 zusammengefasst.

Der Abschnitt baut wie angegeben auf Fachpublikationen unter Mitarbeit des Autors (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019c; Rapp et al., 2018; Rapp, Altner & Albers, 2020; Rapp, Barg et al., 2020) sowie durch den Autor co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten (Altner, 2019; Barg, 2019; Eichhorn, 2017; Tran, 2020)<sup>16</sup> auf.

### **5.3.1 Vorgehen**

Zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf die C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren für Variationsarten wird ein weiteres Fallbeispiel aus dem Antriebsstrangbereich genutzt. Auch für die Untersuchung relevanter Charakteristika von Referenzsystemelementen werden weitere Fallbeispiele herangezogen. Zur Analyse, inwieweit bekannte Risiken und deren Gründe durch Variationen abgebildet werden können, wird abschließend eine spezifische Literaturrecherche durchgeführt. Näheres zu den einzelnen Untersuchungen wird in den jeweiligen Abschnitten beschrieben.

### **5.3.2 Evaluation zentraler Modellbestandteile**

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus Untersuchungen zur Evaluation zentraler Modellbestandteile beschrieben.

#### **5.3.2.1 Einflussfaktoren auf die Identifikation von Variationsarten auf Basis C&C<sup>2</sup>-A-basierter Indikatoren**

Als Fallbeispiel zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf die C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren dient der Prüfkopf (PK) des Trockenreibprüfstands (TRP) (IPEK, 2014) am Institut, dargestellt in Abbildung 5.25. Am Prüfstand werden „organische(n) und alternative(n) (z.B. Keramik) Friktionswerkstoffe(n) in trockenlaufenden Friktionssystemen“ (IPEK, 2014) untersucht. Dabei können komplette Kupplungs- und Bremssysteme integriert werden (IPEK, 2014).

---

<sup>16</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeiten (co-betreut)

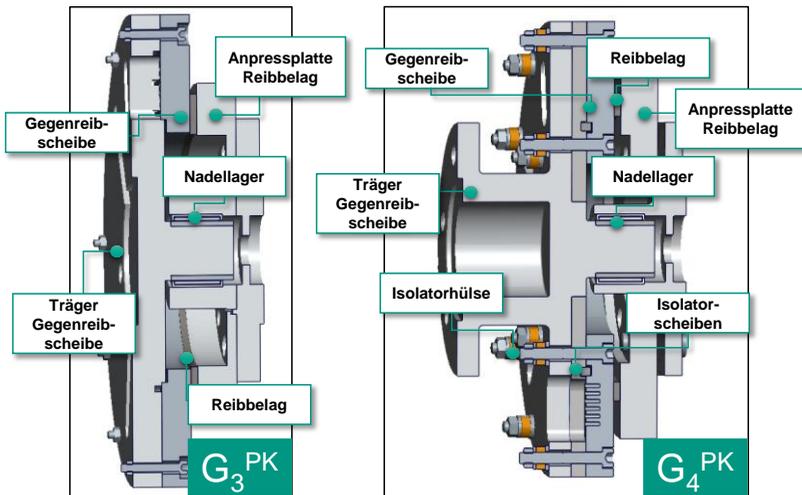


Abbildung 5.25: Untersuchtes Fallbeispiel: Produktgenerationen des Prüfkopfs am Trockenreibprüfstand des Instituts (Barg, 2019, S. 38)<sup>17</sup>.

„Der TRP bildet die im Friktionskontakt wirkende thermomechanische Beanspruchung der Anwendung und die Wechselwirkungen mit dem Restsystem ab.“ (Klotz, Ott & Albers, 2019).

Abbildung 5.26 zeigt die einzelnen Schritte bei der Untersuchung der Fallbeispiele (Barg, 2019). Nach einer überblicksartigen Gesamtsystembeschreibung wird der näher zu untersuchende Systembereich definiert und das zugehörige Referenzsystemelement identifiziert. Die Fokussierung auf ausgewählte Teilsysteme wird vorgenommen, um den erforderlichen Modellierungsaufwand zu begrenzen. Anschließend werden das gewählte Teilsystem und das zugehörige Referenzsystemelement für eine ausgewählte Funktion mit C&C<sup>2</sup>-A modelliert.

<sup>17</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

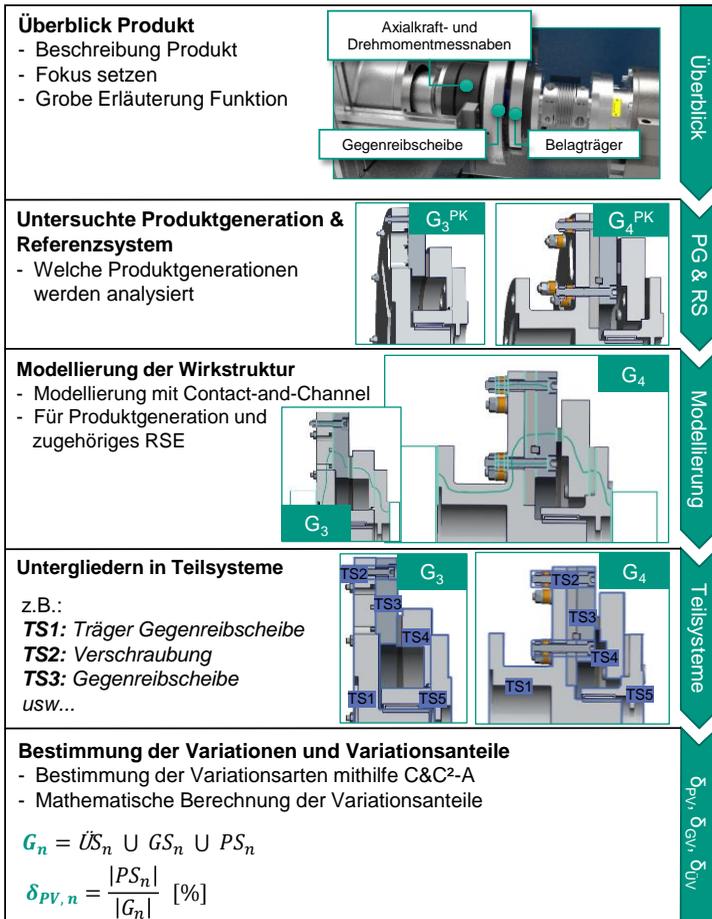


Abbildung 5.26: Vorgehen zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf C&C<sup>2</sup>-A-basierte Indikatoren für Variationen im Beispiel TRP-Prüfkopf (Barg, 2019, S. 32)<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Die Betrachtung einer einzelnen Funktion an Stelle aller Funktionen im System erfolgt in der Annahme, dass dies ausreicht, um prinzipielle Einflüsse der zu untersuchenden Faktoren beobachten zu können und ist ebenfalls eine Maßnahme zur Begrenzung des erforderlichen Modellierungsaufwands. Ausgehend von einer ersten Modellierung mit einer definierten Teilsystemstruktur und Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung wird anschließend sowohl eine Konfiguration mit gleicher Teilsystemstruktur und veränderter Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung untersucht als auch eine dritte Konfiguration mit unveränderter Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung aber unterschiedlicher Teilsystemstruktur. Bei geringerer Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung werden teilweise mehrere vorhandene Komponenten gedanklich zu einer Struktur zusammengefasst. Die Konfigurationen sind in Abbildung 5.27 gezeigt.

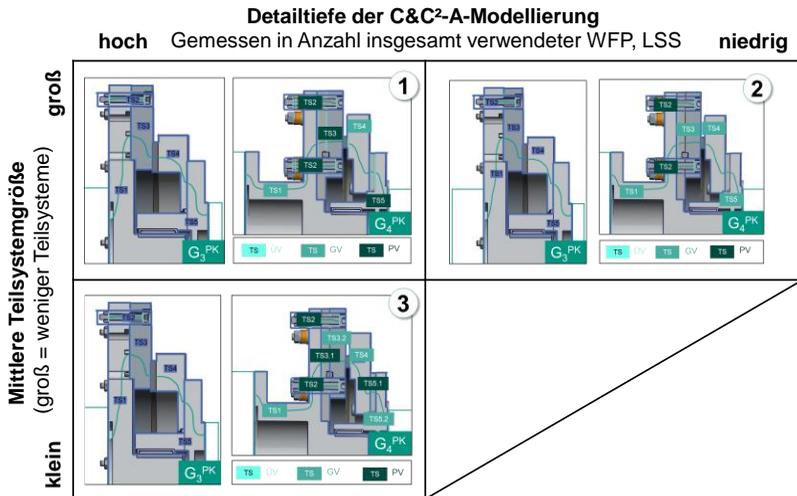


Abbildung 5.27: Einordnung der drei untersuchten Konfigurationen beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf in den durch die Parameterstufen aufgespannten Raum. Detaillierte Darstellungen der einzelnen Konfigurationen in den folgenden Abschnitten.

Für alle drei Konfigurationen werden dann Variationsanteile berechnet und verglichen, um den Einfluss der Faktoren Teilsystemstruktur und Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung zu untersuchen.

Betrachtet wird die Funktion „Drehmoment übertragen“. Eine Modellbildung mit C&C<sup>2</sup>-A ist im Allgemeinen nicht eindeutig und beispielsweise im Detailgrad variabel (s. Abschnitt 2.2.2). Für die Untersuchung wurde zur Begrenzung der Modellierungskomplexität ein verhältnismäßig einfaches Modell gewählt, wie in Abbildung 5.28 dargestellt. Wichtiger als eine detailreiche Modellierung ist im vorliegenden Fall eine – soweit möglich – vergleichbare Modellierung in den drei Konfigurationen.

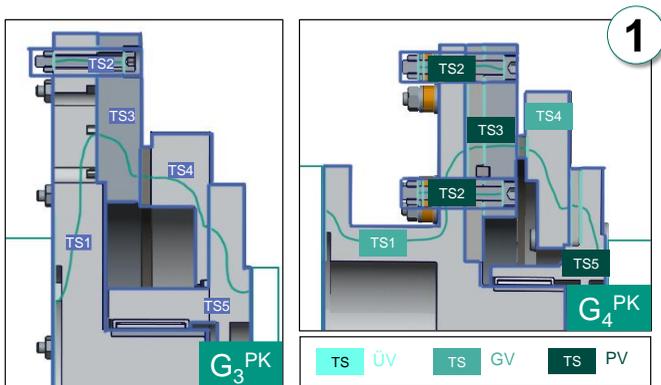


Abbildung 5.28: C&C<sup>2</sup>-A-Modell für die Funktion „Drehmoment übertragen“ in der ersten Modellkonfiguration beim TRP-Prüfkopf und Einordnung der Variationsarten für die einzelnen Teilsysteme (Barg, 2019, S. 44)<sup>19</sup>.

Tabelle 30 zeigt auf Basis der vorgenommenen Modellierung und der in Abschnitt 5.2.2.1 vorgeschlagenen Indikatoren zur Identifikation der Variationsarten die Variationsarten für die initial definierten Teilsysteme. Es fällt auf, dass keine Übernahmevariation identifiziert wurde. Dies liegt vermutlich zum einen an der fokussierten Betrachtung des Prüfkopfs am Prüfstand, der tendenziell bei der Entwicklung einer neuen Prüfstandsgeneration am stärksten von Gestalt- und Prinzipvariationen betroffen ist. Zum anderen werden Teilsysteme als Gestaltvariation klassifiziert, sobald dort einzelne Elemente entsprechend variiert wurden, selbst, wenn dort auch übernommene Bestandteile enthalten sind.

<sup>19</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Auf Grundlage der identifizierten Variationen für die einzelnen Teilsysteme wurde der Variationsanteil auf Ebene des Gesamtsystems TRP-Prüfkopf berechnet. Nachfolgend ist dabei direkt eine Berechnung dargestellt, die zur Gewichtung der einzelnen Teilsysteme die Anzahl an C&C<sup>2</sup>-A-Modellelementen in jedem Teilsystem heranzieht. Dieses Vorgehen ist an Albers, Matthiesen et al. (2019) angelehnt, wobei Teilsysteme für eine Festlegung von Massenzielwerten mit Hilfe von C&C<sup>2</sup>-A-Modellen und dem Beitrag einzelner WFP und LSS zu einer Funktion gewichtet werden. Bei der Gewichtung einzelner Teilsysteme anhand der verwendeten C&C<sup>2</sup>-A-Modelle ist zu beachten, dass Wirkflächenpaare an Teilsystemgrenzen für jedes der beiden aneinandergrenzenden Teilsysteme nur zur Hälfte gezählt werden dürfen, um eine doppelte Anrechnung solcher Wirkflächenpaare zu vermeiden (Barg, 2019, S. 67–69).

Tabelle 30: Anzahl der C&C<sup>2</sup>-A-Kernelemente je Teilsystem als Gewichtung bei der Berechnung von Variationsanteilen und identifizierte Variationsart je Teilsystem für Modellkonfiguration 1. Es wurde keine Übernahmevariation identifiziert. Dies kann sowohl daran liegen, dass der Prüfkopf am Prüfstand bei der Entwicklung einer neuen Prüfstandsgeneration tendenziell am stärksten von Entwicklungsaktivitäten betroffen ist, als auch daran, dass schon einzelne gestaltvariierte Elemente in Teilsystemen den Ausschlag zur Einordnung geben, selbst, wenn noch übernommene Bestandteile vorhanden sind. (Barg, 2019, S. 45)<sup>20</sup>

Teilsystem	Teilsystem Gewichtung	Variationsart
Teilsystem 1	2 Kernelemente	GV
Teilsystem 2	17 Kernelemente	PV
Teilsystem 3	4 Kernelemente	PV
Teilsystem 4	4 Kernelemente	GV
Teilsystem 5	4 Kernelemente	PV

---

<sup>20</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Die Berechnung der Variationsanteile unter Verwendung dieser Gewichtungsfaktoren kann in Erweiterung von Formel 2 mit  $g_i^x, x \in \{\dot{U}S_n, GS_n, PS_n\}, i \in \{1, \dots, |x|\}$  für die Gewichtungsfaktoren wie folgt ausgedrückt werden (Barg, 2019, S. 46):

$$\delta_x = \frac{\sum_{i=1}^{|x|} g_i^x}{\sum_{j \in \{\dot{U}S_n, GS_n, PS_n\}} \sum_{l=1}^{|j|} g_l^j} \quad 5$$

Für die erste Modellkonfiguration ergeben sich damit die Variationsanteile zu:

$\delta_{\dot{U}S,4} = 0\%$ ,  $\delta_{GS,4} \approx 19\%$  und  $\delta_{PS,4} \approx 81\%$  (Barg, 2019, S. 46).

Für die zweite Modellkonfiguration wurde die Detaillierungstiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung verringert, vor allem im Bereich von Belagträger, Verschraubung und Isolationsscheibe. Abbildung 5.29 zeigt die Modellierungen von Konfiguration 1 und Konfiguration 2 im Vergleich.

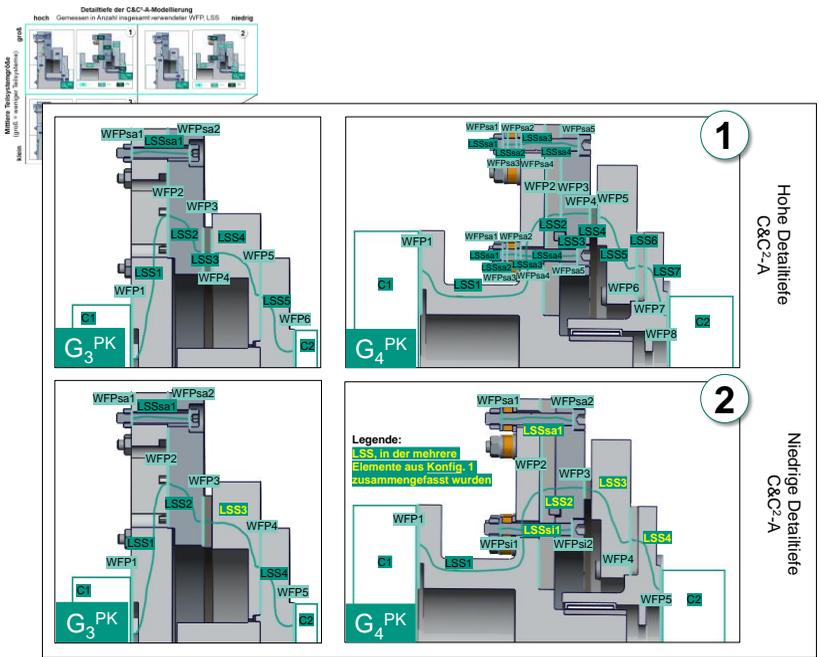


Abbildung 5.29: Modellierungskonfigurationen 1 und 2 im Vergleich. Bei Konfiguration 2 verringerte Detailtiefe der C&C²-A-Modellierung. In den hervorgerufenen LSS in Konfiguration 2 wurden mehrere Elemente aus Konfiguration 1 zusammengefasst. (Barg, 2019, S. 48)<sup>21</sup>, modifiziert.

Abbildung 5.30 zeigt auf Basis der geänderten C&C²-A-Modellierungstiefe die identifizierten Variationsarten. Die Teilsystemstruktur ist dabei die gleiche wie bei Konfiguration 1 um den Einfluss der C&C²-A-Modellierungstiefe auf die identifizierten Variationsarten isoliert betrachten zu können.

<sup>21</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

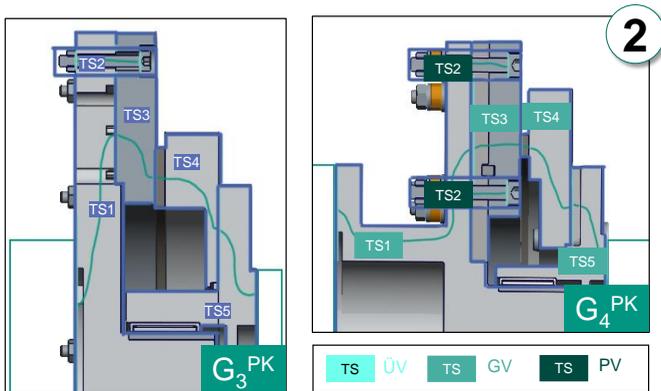


Abbildung 5.30: C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung und identifizierte Variationsarten in der zweiten Modellierungskonfiguration beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf (Barg, 2019, S. 55)<sup>22</sup>.

Der Vergleich der identifizierten Variationsarten ist in Tabelle 31 dargestellt. Teilsysteme, bei denen sich die identifizierte Variationsart geändert hat, sind hervorgehoben.

<sup>22</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Tabelle 31: Gegenüberstellung identifizierter Variationsarten bei unterschiedlicher C&C<sup>2</sup>-A-Modellierungstiefe und Anzahl an C&C<sup>2</sup>-A-Modellelementen je Teilsystem, die als Gewichtung bei der Variationsanteilsberechnung dienen (Barg, 2019, S. 56).

	Hohe Detailtiefe C&C <sup>2</sup> -A <b>1</b>		Niedrige Detailtiefe C&C <sup>2</sup> -A <b>2</b>	
Teilsystem	Gewichtung	Variationsart	Gewichtung	Variationsart
Teilsystem 1	2 Kernelemente	GV	2 Kernelemente	GV
Teilsystem 2	17 Kernelemente	PV	5 Kernelemente	PV
Teilsystem 3	4 Kernelemente	PV	2 Kernelemente	GV
Teilsystem 4	4 Kernelemente	GV	2 Kernelemente	GV
Teilsystem 5	4 Kernelemente	PV	2 Kernelemente	GV

In gleicher Weise wie für die erste Modellierungskonfiguration wurden hier ebenfalls die Variationsanteile auf Gesamtsystemebene berechnet und in Tabelle 32 denen aus der initialen Konfiguration gegenübergestellt.

Tabelle 32: Gegenüberstellung der berechneten Variationsanteile bei unterschiedlicher C&C<sup>2</sup>-A-Modellierungstiefe (Barg, 2019, S. 57)<sup>23</sup>.

	Hohe Detailtiefe C&C <sup>2</sup> -A ①	Niedrige Detailtiefe C&C <sup>2</sup> -A ②
Variationsart	Variationsanteil	
Übernahmevariation	0 %	0 %
Gestaltvariation	19 %	62 %
Prinzipvariation	81 %	38 %

Es kann beobachtet werden, dass durch die niedrigere Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung weniger Teilsysteme als Prinzipvariation identifiziert werden, dafür mehr als Gestaltvariation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Zusammenfassung von Strukturen manche Änderungen in der Modellierung nicht mehr sichtbar sind. Die geänderte C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung macht sich zusätzlich bei der Berechnung von Variationsanteilen mit dem gewählten Gewichtungsfaktor bemerkbar, da sich für einzelne Teilsysteme auch die Zahl enthaltener C&C<sup>2</sup>-Elemente ändert wie in Tabelle 31 zu sehen ist. (Barg, 2019, S. 58)

In der dritten Modellierungskonfiguration wurde die C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung aus Konfiguration 1 beibehalten, jedoch die zu Grunde liegende Teilsystemstruktur verfeinert. Die Anzahl der Teilsysteme erhöht sich dabei auf 7 durch die Aufteilung von Teilsystem 3 und 5 in je zwei separate Teilsysteme. Abbildung 5.31 zeigt die beiden Strukturen im Vergleich.

<sup>23</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

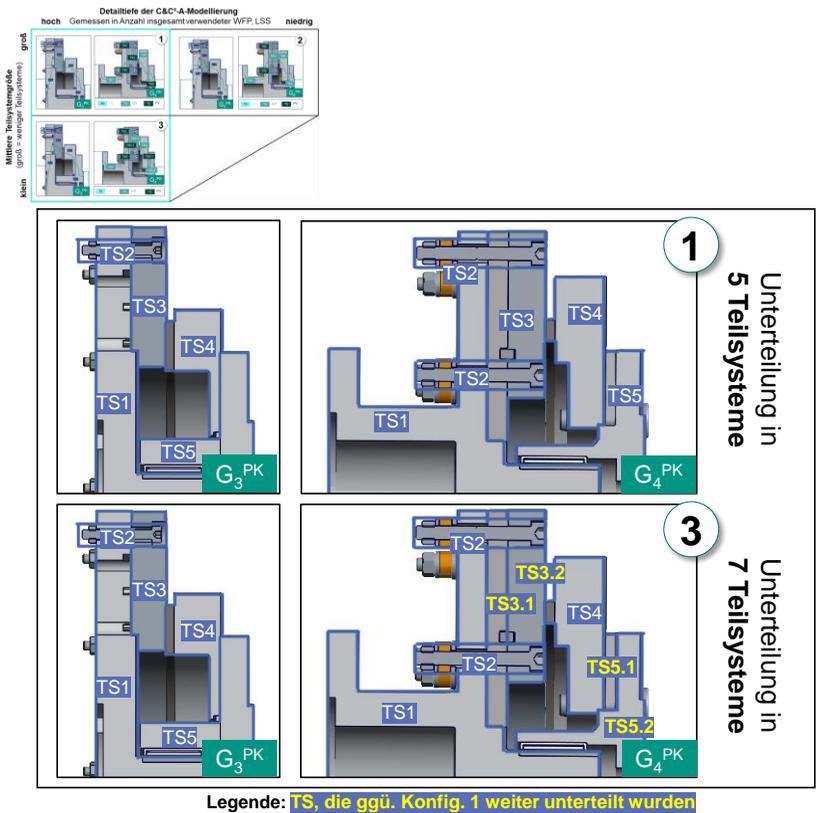


Abbildung 5.31: Teilsystemstruktur von Modellierungskonfiguration 1 und 3 im Vergleich beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf. Die hervorgehobenen Teilsysteme sind eine feinere Aufteilung gegenüber Konfiguration 1. (Barg, 2019, S. 60)<sup>24</sup>, modifiziert.

<sup>24</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Abbildung 5.32 zeigt die identifizierten Variationsarten für die einzelnen Teilsysteme in der angepassten Teilsystemstruktur.

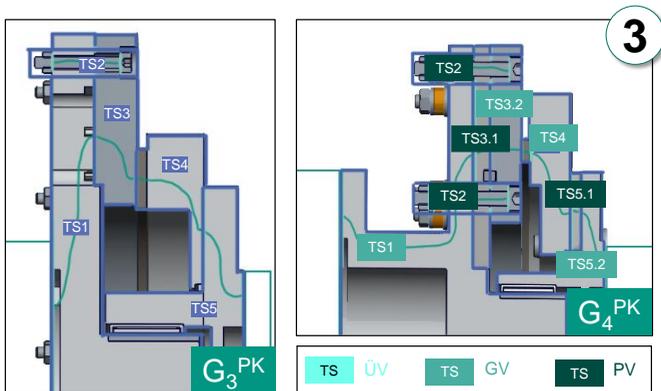


Abbildung 5.32: C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung und identifizierte Variationsarten in der dritten Modellierungskonfiguration beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf (Barg, 2019, S. 66)<sup>25</sup>, modifiziert.

Tabelle 33 stellt dieses Ergebnis der initialen Modellierungskonfiguration gegenüber.

<sup>25</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Tabelle 33: Gegenüberstellung identifizierter Variationsarten bei unterschiedlicher Teilsystemstruktur und die Anzahl an C&C<sup>2</sup>-A-Modellelementen je Teilsystem, die als Gewichtung bei der Variationsanteilsberechnung dienen (Barg, 2019, S. 68), modifiziert.

Unterteilung in 5 Teilsysteme ①			Unterteilung in 7 Teilsysteme ③		
Teilsystem	Gewichtung	Variationsart	Teilsystem	Gewichtung	Variationsart
Teilsystem 1	2	GV	Teilsystem 1	2	GV
Teilsystem 2	17	PV	Teilsystem 2	17	PV
Teilsystem 3	4	PV	Teilsystem 3.1	2	PV
			Teilsystem 3.2	2	GV
Teilsystem 4	4	GV	Teilsystem 4	4	GV
Teilsystem 5	4	PV	Teilsystem 5.1	2	PV
			Teilsystem 5.2	2	GV

Eine Berechnung von Variationsanteilen ergibt für die dritte Modellierungskonfiguration bei analogem Vorgehen zum ersten Fall die Anteile wie in Tabelle 34 gezeigt.

Tabelle 34: Gegenüberstellung der berechneten Variationsanteile bei unterschiedlicher Teilsystemstruktur (Barg, 2019, S. 69)<sup>26</sup>, modifiziert.

Variationsart	Unterteilung in 5 Teilsysteme <b>1</b>	Unterteilung in 7 Teilsysteme <b>3</b>
Variationsanteil		
Übernahmevariation	0 %	0 %
Gestaltvariation	19 %	32 %
Prinzipvariation	81 %	68 %

Dabei kann ein Rückgang des Prinzipvariationsanteils beobachtet werden. Dies liegt darin begründet, dass die Teilsysteme 3 und 5 in der größeren Teilsystemstruktur vollständig als Prinzipvariation eingerechnet wurden, in der verfeinerten Teilsystemstruktur hingegen bestimmte Bereiche dieser Teilsysteme als eigenständige Teilsysteme berücksichtigt werden, bei denen nur eine Gestaltvariation erkennbar ist. (Barg, 2019, S. 70)

Abbildung 5.33 fasst das Ergebnis aus den drei untersuchten Modellierungskonfigurationen zusammen.

<sup>26</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

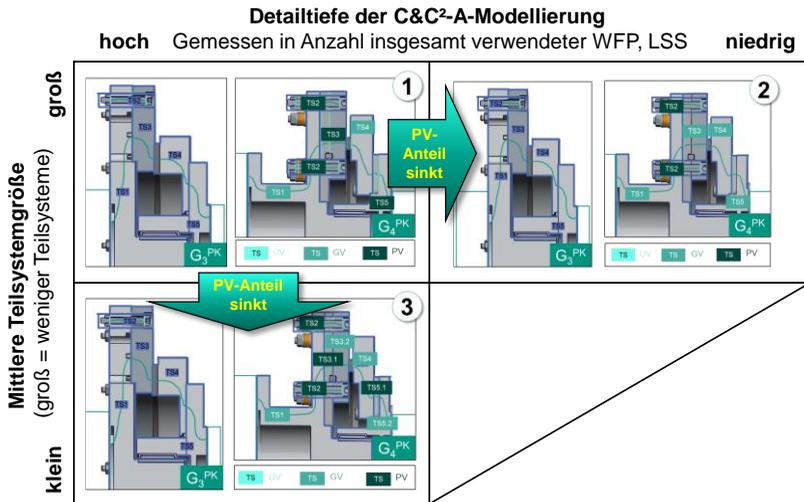


Abbildung 5.33: C&C<sup>2</sup>-A-Modellierungen und identifizierte Variationsarten der einzelnen Teilsysteme für die drei untersuchten Modellierungskonfigurationen beim Fallbeispiel TRP-Prüfkopf im Überblick, basierend auf Abbildung 5.28, Abbildung 5.30 und Abbildung 5.32, mit Einzeldarstellungen aus (Barg, 2019)<sup>27</sup>.

Es kann festgehalten werden, dass sowohl eine größere Teilsystemstruktur als auch eine höhere Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung den Prinzipvariationsanteil in der Untersuchung erhöht haben. Vergleichbare Beobachtungen konnten auch bei einem Werkzeugmaschinen-Aktor als Fallbeispiel gemacht werden (Barg, 2019, S. 71–98). Die gewählte Teilsystemstruktur sowie die Detailtiefe der C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung bei der Identifikation von Variationsarten und der darauf aufbauenden Berechnung von Variationsanteilen für ein Gesamtsystem können also einen deutlichen Einfluss haben.

Dies führt zu der Frage, welche Modellierungstiefe und welche Teilsystemstruktur zu wählen sind. Berücksichtigt man, dass über einen Produktentwicklungsprozess hinweg tendenziell eine Konkretisierung von Produktwissen und Produktbeschrei-

<sup>27</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

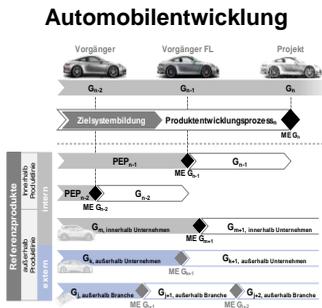
bung stattfindet, so kann die Antwort auf die Frage nach passender Modellierungstiefe und Teilsystemstruktur für die Analyse von Variationsanteilen womöglich zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich ausfallen. Bei einer Analyse von Variationen während eines Entwicklungsprozesses, beispielsweise, um Variationsanteile als Steuergrößen zu verwenden, kann jeweils auf den aktuellen Wissensstand zurückgegriffen werden. Bei der retrospektiven empirischen Untersuchung von Fallbeispielen folgt aus den gemachten Beobachtungen, dass nicht nur Informationen zur schlussendlich vorliegenden Produktsubstanz wichtig sind, sondern auch Informationen zur zeitlichen Entwicklung des Wissens über das Produkt. Möglichkeiten zur Erfassung dieses Wissens bieten beispielsweise Interviews mit Beteiligten oder eingehende Analysen begleitender Prozess- und Produktdokumentation. Im betrachteten Beispiel kann der Detailgrad der C&C<sup>2</sup>-A-Modelle dahingehend diskutiert werden, dass die Ersteller nicht im Entwicklungsprozess beteiligt waren und nur durch Gespräche mit den Entwicklern die Informationen einbringen konnten. Die für den angestrebten Untersuchungszweck wichtige Vergleichbarkeit über mehrere betrachtete Modellkonfigurationen hinweg wird jedoch als gegeben eingeschätzt. Für komplexere Systeme ist zu prüfen, ob die hier beobachteten Phänomene ebenfalls auftreten. Die zu Grunde liegenden Mechanismen sind jedoch prinzipiell übertragbar und lassen daher ähnliche Phänomene auch bei komplexeren Systemen erwarten. Eine Herausforderung wird dann womöglich der erforderliche Modellierungsaufwand darstellen. Dieser kann jedoch durch die generationsübergreifende Verwendung von Modellen prinzipiell relativiert werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Effekte, die im vorliegenden Fall zu einer Erhöhung des Prinzipvariationsanteils geführt haben (größere Teilsystemstruktur und detailliertere C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung), in einem Entwicklungsprozess womöglich gegenläufig zu beobachten sind: Größere Teilsystemgliederungen werden eher mit einem noch wenig konkreten Wissen und damit früheren Stadien von Entwicklungsprozessen assoziiert, während eine detaillierte C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung detailliertes Systemwissen reflektiert. Davon ausgehend stellt sich für kommende Untersuchungen die Frage, wie sich die beiden Effekte in Überlagerung auswirken.

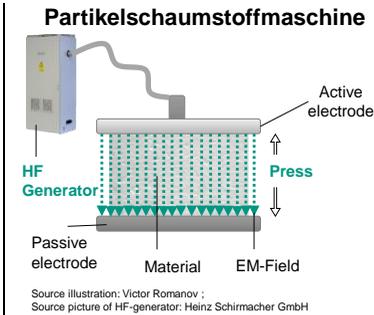
### **5.3.2.2 Charakteristika von Referenzsystemelementen als Einflussfaktoren auf Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken**

Zur Untersuchung möglicher weiterer Charakteristika von Referenzsystemelementen, die als Einflussfaktoren im Hinblick auf Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken relevant sein können, werden die vier Fallbeispiele aus Abbildung 5.34 betrachtet. Der Fokus liegt hierbei auf einer qualitativen Analyse, also der Frage, welche Faktoren überhaupt beobachtet und durch das Modellelement Referenzsystem erfasst werden können. Eine vollständige Analyse der einzelnen Fallbeispiele

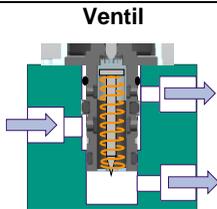
ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich. Die Informationen zu den Fallbeispielen in den referenzierten Arbeiten wurden in Form teilnehmender Beobachtungen erhoben.



Beschrieben in (Albers, Haug et al., 2016)



Beschrieben in (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d, 2019c), Bild aus Konferenzvortrag zu (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019c), modifiziert



Beschrieben in (Eichhorn, 2017)<sup>28</sup>, Bild aus Konferenzvortrag zu (Rapp et al., 2018)

### Schienenfahrzeug-Kupplung



Beschrieben in (Tran, 2020)<sup>29</sup>, Bild era-contact GmbH

Abbildung 5.34: Fallbeispiele, in denen die Charakteristika von Referenzsystemelementen als Einflussfaktoren hin untersucht wurden.

<sup>28</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

<sup>29</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Aus den Darstellungen der Fallbeispiele können verschiedene Einflussfaktoren entnommen werden, die mit dem jeweils zu Grunde liegenden Referenzsystem in Zusammenhang stehen. Nachfolgend werden diese Faktoren sowie erkennbarer Einfluss auf den Entwicklungsprozess, Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken beschrieben und anhand der in Abschnitt 5.2 vorgeschlagenen Struktur modelliert. Im Fallbeispiel der automobilen Produktentwicklung von ALBERS UND HAUG ET AL. (2016) ist von Bedeutung, ob ein Referenzsystemelement dem eigenen Unternehmen entstammt oder aus einer externen Quelle, beispielsweise einem Wettbewerber. Solche unternehmensexternen Referenzsystemelemente sind neben unternehmensinternen Referenzsystemelementen bei der Zielsystembildung für eine neue Produktgeneration von Bedeutung, um den Wettbewerbskontext abzubilden. Bei unternehmensexternen Referenzsystemelementen sind Zielsysteminformationen in der Regel jedoch nicht in explizit dokumentierter Form zugänglich. Sie müssen daher durch entsprechende Entwicklungsaktivitäten rekonstruiert werden. (Albers, Haug et al., 2016) Bei unternehmensinternen Referenzsystemelementen hingegen kann als begünstigender Faktor hinzukommen, dass diese prinzipiell bereits zugänglich sind, bevor das jeweilige System in den Markt kommt. Dies kann überall der Fall sein, wo mehrere Produktgenerationen parallel entwickelt werden (Albers, Haug et al., 2016, S. 236). Abbildung 5.35 zeigt die im Fallbeispiel erkennbare Auswirkung unternehmensexterner Referenzsystemelemente.

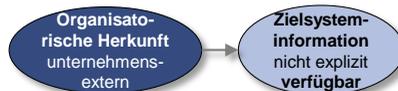


Abbildung 5.35: Bei unternehmensexternen Referenzsystemelementen ist eine Folge, dass Zielsysteminformationen nicht explizit verfügbar sind (Albers, Haug et al., 2016).

Bei der von ALBERS, RAPP UND SPADINGER ET AL. (2019d) beschriebenen Entwicklung einer Maschine zur Herstellung von Schaumstoffen ist die Disziplin, der ein Referenzsystemelement zugeordnet werden kann, als Einflussfaktor erkennbar: Bei der Entwicklung sollte eine Maschine zur Schaumstoffherstellung entwickelt werden, wobei das übliche, auf Wasserdampf basierende Verfahren aus Effizienz- und Leistungsgründen durch ein Verfahren auf der Grundlage von Mikro- bzw. Radiowellen ersetzt werden sollte. Damit kann ein wichtiges Referenzsystemelement dieser Entwicklung der Disziplin Elektrotechnik zugeordnet werden. Der Umgang mit

dieser Disziplin war für das Unternehmen neu, da die bisherigen Produktgenerationen mit Wasserdampfverfahren eher im klassischen Maschinenbau anzusiedeln sind. Dies hatte im Entwicklungsprozess verschiedene Auswirkungen. Zusätzlich zu einem grundlegenden Know-How-Defizit zu Beginn der Entwicklung wurden im Laufe der Entwicklung auch Herausforderungen bei der Simulation des Herstellungsprozesses sichtbar sowie Skepsis von Unternehmensangehörigen bezüglich der neuen Technologie. Darüber hinaus stellen ALBERS, RAPP UND SPADINGER ET AL. auch eine Wechselwirkung von Referenzsystemelementen dar: Unter anderem in Bezug auf die Bedienerschnittstelle waren auch frühere Produktgenerationen der Schaumstoffherstellungsmaschinen wichtige Referenzsystemelemente. An der Bedienerschnittstelle sollten möglichst wenig Änderungen vorgenommen werden. Es ergab sich damit als Folge der Wechselwirkung von unterschiedlichen Referenzsystemelementen die Herausforderungen, eine neue Kerntechnologie der Maschinen mit einer möglichst wenig geänderten Bedienerschnittstelle zu integrieren. (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019d) Abbildung 5.36 stellt die beschriebenen Zusammenhänge in Modellform dar.

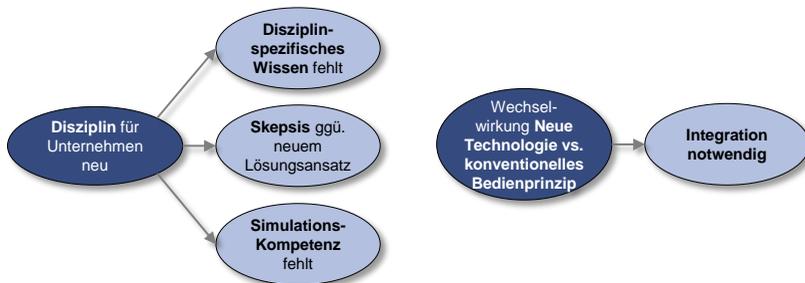


Abbildung 5.36: Auswirkungen der Charakteristika von Referenzsystemelementen und deren Wechselwirkungen im Fallbeispiel der Schaumstoffpartikelmaschine aus Albers, Rapp und Spadinger et al. (2019d).

EICHHORN (2017) beschreibt die Entwicklung einer neuen Ventil-Produktgeneration für das Thermo-Management von Fahrzeugen. Für die Entwicklung alternativer Lösungen werden auch bisherige Ventile von Wettbewerbern als unternehmensexterne Referenzsystemelemente analysiert. Im Zuge dessen werden auf Basis von Vermessungen an gekauften Systemen CAD-Modell rekonstruiert und weiter Mo-

delle des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs aufgebaut. Es entstehen also Analyseaufwände, da bei den unternehmensexternen Referenzelementen die zugehörige Produktdokumentation nicht zugänglich ist. (Eichhorn, 2017, S. 42–56) Unternehmensinterne Referenzelemente können hingegen gut beispielsweise als Ausgangspunkt für den Aufbau von Entwicklungsgenerationen genutzt werden (Eichhorn, 2017, S. 73). Entstammen die Referenzelemente jedoch nicht dem gleichen Entwicklungsteam, ist Wissen zwar prinzipiell verfügbar, kann jedoch womöglich nur mit einem gewissen Aufwand der zugehörigen Produktdokumentation entnommen werden (Eichhorn, 2017, S. 82–83). In Abbildung 5.37 sind die beschriebenen Zusammenhänge zusammengefasst dargestellt.

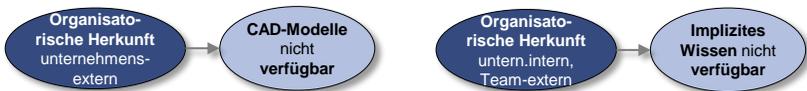


Abbildung 5.37: Als Einflussfaktoren beobachtete Charakteristika von Referenzelementen im Fallbeispiel „Ventil“.

Bei der Entwicklung von Kupplungen für Schienenfahrzeuge kann beobachtet werden, dass mit dem jeweiligen Einsatzmarkt eines Systems zollrechtliche Regelungen, beispielsweise auf Grund der Herkunft der im System verwendeten Materialien verbunden sind. Unterscheidet sich der angestrebte Einsatzmarkt einer neuen Produktgeneration von dem eines zu Grunde liegenden Referenzelementes, sind daher die zollrechtlichen Auswirkungen zu prüfen. (Tran, 2020, S. 59–60) Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.38 dargestellt.

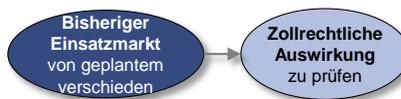


Abbildung 5.38: Der Einsatzmarkt eines Referenzelementes als beobachteter Einflussfaktor im Fallbeispiel „Schienenfahrzeug-Kupplung“.

Die Gesamtheit der hier und in Abschnitt 5.1 beobachteten Charakteristika von Referenzsystemelementen ist mit der vorgeschlagenen Modellierungsstruktur aus Abschnitt 5.2 in Abbildung 5.39 dargestellt.

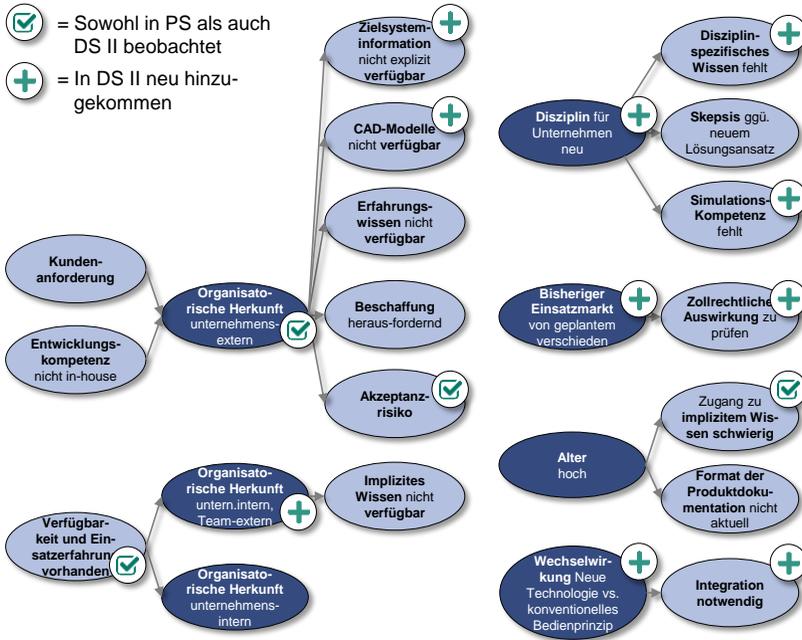


Abbildung 5.39: Insgesamt in den Fallbeispielen aus Abschnitt 5.1 und 5.3 als Einflussfaktoren beobachtete Charakteristika von Referenzsystemelementen, dargestellt nach der in Abschnitt 5.2 vorgeschlagenen Struktur.

Man kann erkennen, dass in Anbetracht mehrerer untersuchter Fallbeispiele vergleichsweise wenig Charakteristika als Einflussfaktoren in Erscheinung getreten sind. Vor allem die organisatorische Herkunft von Referenzsystemelementen konnte in verschiedenen Ausprägungen als Einflussfaktor beobachtet werden. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass mitunter verschiedene Charakteristika ähnliche Auswirkungen haben können. So kann der Zugang zu implizitem Wissen zum einen

durch die organisatorische Herkunft von Referenzelementen erschwert sein, wenn Träger impliziten Wissens nicht im gleichen Entwicklungsteam sind. Zum anderen kann das Alter verwendeter Referenzelemente einen ähnlichen Effekt haben, wenn entsprechende Wissensträger auf Grund dessen nicht mehr im Unternehmen sind. Skepsis oder ein Akzeptanzrisiko können sowohl durch die organisatorische Herkunft als auch durch die Ursprungsdisziplin begründet sein.

### 5.3.2.3 Rückführung bekannter Risiken in der Produktentstehung auf Variationen und Charakteristika von Referenzelementen

In den vorangehenden Abschnitten wurde gezeigt, dass angestrebter Nutzen und Randbedingungen Gründe für Variationen sowie Charakteristika gewählter Referenzelemente sind. Entwicklungsaufwände und -risiken sind deren Auswirkungen. Zur Darstellung dieser Zusammenhänge wurde die Form eines Variablenmodells vorgeschlagen. Davon ausgehend soll im Folgenden untersucht werden, inwieweit insbesondere bekannte Risiken in der Produktentstehung aus der Literatur mit Variationen und Charakteristika von Referenzelementen in Zusammenhang gebracht werden können.

Zur Identifikation von in der Literatur bekannten Risiken wurde ein gemischter methodischer Ansatz ((Grant & Booth, 2009, S. 94) nach (Altner, 2019, S. 26)) mit einer zweistufigen Suche verwendet. Im ersten Schritt wurde für einen ersten Überblick eine selektive Suche durchgeführt mit den in Abbildung 5.40 gezeigten Schritten.

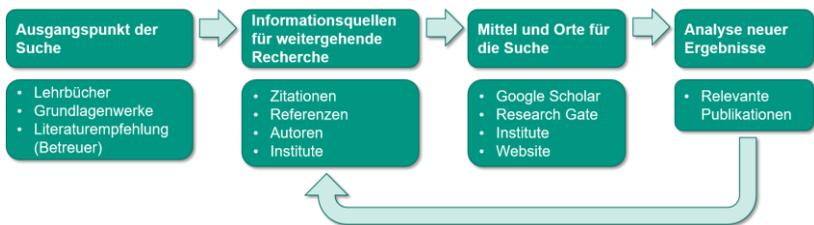


Abbildung 5.40: Vorgehen bei der selektiven Suche (Altner, 2019, S. 28)<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Auf Grundlage des so gewonnenen Eindrucks relevanter Teilthemenfelder und Begriffe wurde anschließend eine systematische Suche wie in Abbildung 5.41 dargestellt durchgeführt.

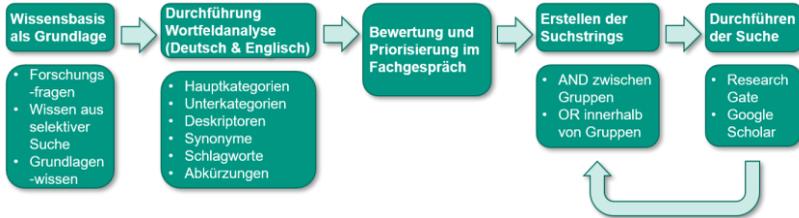


Abbildung 5.41: Vorgehen bei der systematischen Suche (Altner, 2019, S. 29)<sup>31</sup>.

Zur Kategorisierung von Risiken wurden dabei verschiedene bestehende Ansätze berücksichtigt und zusammengeführt (Altner, 2019, S. 40). Das Ergebnis der Untersuchung ist in Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 35: Auf der Grundlage von Beobachtungen in Fallbeispielen können die unten aufgeführten Risikodimensionen aus der Literatur Variationsarten zugeordnet werden. Tabelle auf Basis von (Altner, 2019, S. 53)<sup>32</sup>.

Risiko-Kategorien nach (Denning, 2013; Oehmen, 2016; Park, 2010; Persson, Mathiassen, Boeg, Madsen & Steinson, 2009; Song, Ming & Xu, 2013; Yeo & Ren, 2009)	Bekannte Risiko-Dimensionen in den verschiedenen Kategorien	In Beispielen beobachtete Zusammenhänge zwischen bekannten Risiko-Dimensionen und Variationen (Albers, Bursac & Rapp, 2017; Wattenberg, 2018)		
		PV	GV	ÜV
Technologie, Produkt, Produktion, Know-How	Erhaltung der Funktionalität		x	

<sup>31</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

<sup>32</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

	Interaktionen zwischen Technologien		x	x
	Verhalten neuer Technologien unter realen Bedingungen	x	x	
	Anpassung des Produktionssystem	x		
	Entstehung und Reifegrad neuer Technologien	x		
	Einhaltung von Terminen	x		
	Unvollständiges Know-How und unbekannte Technologie	x	x	
	Unvollständige Produktspezifikationen		x	
	Unvollständige Prozessspezifikationen	x		
	Unvollständiges Verständnis zu Kunden und Leistungen	x	x	
	Hoher Neuheitsgrad			
	Sehr geringer Neuheitsgrad			
	Inkrementelle Weiterentwicklung			
	Mangel an Know-How			
	Verfügbarkeit von Ressourcen			
	Eignung der Technologie			
	Qualität			
Management/Prozesse	Unvollständiges Verständnis zu Kunden und Leistungen	x		
	Ungenauere Meilensteine	x		
	Montage Spezifikationen und Prozesse	x	x	x
	Qualitätsspezifikationen		x	
	Schlechte Arbeitsbeziehung (zu Angestellten)			
	Unternehmenskultur			

	Prozessdefinitionen			
	IT Unterstützung, technische Ressourcen			
	Finanzielle Ressourcen			
	Mitarbeiter			
	Strategische Führung			
	Unterstützung/ Einsatz des Managements			
	Angrenzende Prozesse			
	Andere Produkte in der Entwicklung			
	Unvollständige Produktspezifikationen			
	Supply Chain, Umfeld	Wissensabfluss an Zulieferer und resultierende Wissenslücken		
Wissen strategischer Zulieferer		x	x	
Schlechte Zusammenarbeit mit Lieferanten		x	x	x
Schlechte rechtliche Rahmenbedingungen				x
Verfügbarkeit von Ressourcen und Lieferanten		x		
Entwicklungspartner				
Kunden				
Physische Distanz in der Entwicklung				
Kultur- und Sprachunterschiede				
Mangelndes Vertrauen				
Externe Risiken	Marktentwicklung	x		
	Ökonomie	x		
	Datensicherheit bei IOT		x	
	Unklare rechtliche Anforderungen und Verantwortungen			x
	Unvollständige Produktspezifikationen			

	Politik			
	Technologie, disruptive Innovationen, Trends und Konvergenz			
	Öffentlichkeit			

Die Tabelle zeigt, dass auf Basis der Fallbeispiele eine große Zahl von den in der Literatur gefundenen Risiko-Dimensionen mit Variationen in Verbindung gebracht werden konnte. Darüber hinaus ist bei mehreren weiteren Risiko-Dimensionen ein Zusammenhang mit Variationen naheliegend, selbst wenn auf Basis der genannten Fallbeispiele zunächst keine Verknüpfung hergestellt werden kann. Beispielsweise wäre zu erwarten, dass die Dimension „Mangel an Know-How“ bei Gestalt- oder Prinzipvariation relevant sein kann, ebenso wie bei der Übernahmevariation unternehmensexterner Referenzsystemelemente.

### 5.3.3 Zwischenfazit

In den zuvor beschriebenen Studien konnten mehrere Bestandteile des in Abschnitt 5.2 vorgeschlagenen Modells auf ihre Anwendbarkeit hin evaluiert werden. Weiterhin konnten Erkenntnisse für die künftige Anwendung gewonnen und in das Modell integriert werden.

Bei den C&C<sup>2</sup>-basierten Indikatoren für die Variationsarten konnte der Einfluss der gewählten Teilsystemstruktur und des gewählten Detailgrades der C&C<sup>2</sup>-Modellbildung analysiert werden. Beide Faktoren sind über einen Entwicklungsprozess vermutlich zeitabhängig. Dieses Zeitverhalten ist im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung von Variationsanteilen in einem Entwicklungsprozess näher zu untersuchen. Bei der retrospektiven Analyse von Fallbeispielen sind hierfür also neben einer vergleichenden Analyse der Produktsubstanz eines Systems mit dem zu Grunde liegenden Referenzsystemelement weitere Informationen zur zeitlichen Entwicklung von Teilsystemstruktur und Wissen über den Gestalt-Funktion-Zusammenhang einzuholen. Dies kann beispielsweise durch Interviews von beteiligten Entwicklern geschehen. Eine weitere mögliche Untersuchungsform sind teilnehmende Beobachtungen in künftigen Fallstudien.

Bei den Charakteristika von Referenzsystemelementen, die im Zusammenhang mit Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken relevant sind, konnten in den Fallbeispielen der zweiten deskriptiven Studie zum einen Beobachtungen aus der deskriptiven Studie I bestätigt werden. Darüber hinaus konnten weitere relevante Charakteristika von Referenzsystemelementen identifiziert werden. Das insgesamt in diesem Kapitel betrachtete Fallbeispielspektrum deckt verschiedene Branchen und

Fertigungsstückzahlen ab und gibt in dieser Hinsicht ein gutes Querschnittsbild. Weiter kann bei bestimmten beobachteten Zusammenhängen angenommen werden, dass sie branchen-übergreifend anzutreffen sind, da die zu Grunde liegenden Mechanismen nicht branchen-spezifisch sind, z.B. Wissensdefizit bei unternehmensexternen Referenzsystemelementen auf Grund von begrenztem Zugang zur Produktdokumentation. Über den mit den verschiedenen Fallbeispielen abgedeckten Branchen-Querschnitt hinweg konnten verhältnismäßig wenig Charakteristika von Referenzsystemelementen beobachtet werden, die im Hinblick auf Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken relevant erscheinen. Dieser Umstand kann die Verwendung von Referenzsystemelement-Charakteristika als Schlüsselfaktoren begünstigen. Besonders die organisatorische Herkunft von Referenzsystemelementen konnte in verschiedenen Ausprägungen als Einflussfaktor auf Entwicklungsrisiken beobachtet werden.

Mit der abschließenden Studie konnte schließlich gezeigt werden, dass sich ein großer Teil bekannter Risiken in der Produktentstehung auf Variationen und Charakteristika von Referenzsystemelementen zurückführen lässt.

Ausgehend von den Erkenntnissen des vorliegenden Kapitels zu den Zusammenhängen zwischen Innovationspotenzial, Variationsarten, Charakteristika der dabei zu Grunde liegenden Referenzsystemelemente und Entwicklungsrisiken ist zu untersuchen, inwieweit diese Zusammenhänge bisher in Ansätzen für die Bewertung, Festlegung und Planung von Variationen berücksichtigt sind. Basierend auf dieser Analyse sind gegebenenfalls geeignete Ansätze zu entwickeln. Dies ist Gegenstand des nächsten Kapitels.

## **6 Rahmenwerk zur Bewertung von Variationen auf Basis von Referenzsystemelementen**

Im vorangehenden Kapitel wurde gezeigt, wie Variationen auf der Basis von Referenzsystemelementen mit Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken zusammenhängen. Darauf fußt die zweite Forschungshypothese aus Abschnitt 3.3: Die Festlegung von Variationen und der zu verwendenden Referenzen bedarf einer Chancen-Risiken-Abwägung, für die die Auswirkungen von Variationen und Charakteristika der gewählten Referenzen auf Entwicklungsrisiken ebenso zu berücksichtigen sind wie die Erfüllung von Zielen zur Realisierung von Innovationspotenzial durch Variationen auf Basis der gewählten Referenzen.

Die Untersuchung dieser Forschungshypothese wird durch die Forschungsfragen in Abbildung 6.1 operationalisiert. Zunächst wird untersucht, inwieweit die in Kapitel 5 gefundenen Zusammenhänge in bestehenden Ansätzen der Potenzial- und Risikoanalyse für ein neu zu entwickelndes System berücksichtigt sind. Anschließend werden erkannte Bedarfe durch drei Teile eines Frameworks adressiert. Es wird gezeigt, wie potenziell zielführende Variationen abgeleitet werden können und wie eine Bewertung von Lösungen auf der Basis von Variationsanteilen und Charakteristika von Referenzsystemelementen als Schlüsselfaktoren aussehen kann. Darüber hinaus wird abschließend ein Ansatz zur übergreifenden Chancen- und Risikodarstellung auf der Grundlage des Modells aus Kapitel 5 vorgestellt.

Die Analyse bestehender Ansätze ist in Abschnitt 6.1 beschrieben. Die Bestandteile des Frameworks werden in den Abschnitten 6.2 bis 6.4 vorgestellt. Dort ist jeweils auch die initiale Evaluation der Framework-Bestandteile beschrieben.

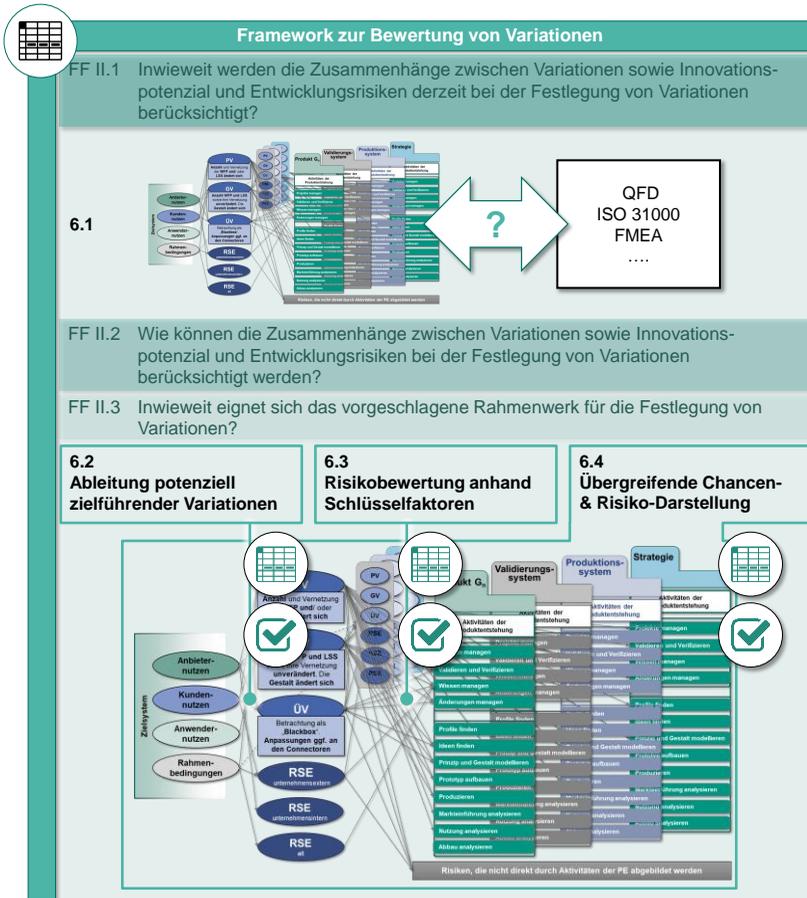


Abbildung 6.1: Struktur des Kapitels mit der Analyse bestehender Ansätze und drei Teilen eines Frameworks für die Bewertung von Variationen auf der Basis von Referenzelementen.

## 6.1 Variationen in bestehenden Methoden der Potenzial- und Risikoanalyse

Ziel der in diesem Abschnitt dargestellten Untersuchung ist es, herauszufinden, inwieweit die in Kapitel 5 beschriebenen kausalen Zusammenhänge zwischen Variationen und den Charakteristika zu Grunde liegender Referenzsystemelemente einerseits und Chancen und Risiken in der Produktentwicklung andererseits bisher durch Methoden der Chancen- und Risiko-Analyse berücksichtigt werden. Damit wird die in Abbildung 6.2 gezeigte Forschungsfrage beantwortet werden.



Abbildung 6.2: In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit die Zusammenhänge des Modells aus Kapitel 5 in bestehenden Ansätzen zur Bewertung von Variationen berücksichtigt sind.

Das Vorgehen zur Identifikation und Analyse der untersuchten Ansätze ist in Abschnitt 6.1.1 beschrieben. Die Ergebnisse der Analyse in Form eines Methoden-Benchmarks sind in Abschnitt 6.1.2 dargestellt. In Abschnitt 6.1.3 sind die Erkenntnisse und Implikationen im Hinblick für das bereitzustellende Framework zur Bewertung von Variationen zusammengefasst.

Die Untersuchung wurde im Rahmen einer durch den Autor co-betreuten studentischen Abschlussarbeit durchgeführt (Altner, 2019)<sup>1</sup> und die Ergebnisse mit RAPP, ALTNER UND ALBERS (2020) auf einer internationalen Fachkonferenz veröffentlicht.

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

### 6.1.1 Vorgehen

Mit den in Abschnitt 2.5.1.2 beschriebenen Arbeiten liegen bereits Ansätze auf Basis des Modells der PGE vor zur Entwicklung und Konkretisierung eines Zielsystems als Ausgangspunkt von Variationen. Bestandteil solcher Zielsystementwicklungen ist unter anderem eine bewusste Marktpositionierung und Differenzierung gegenüber Wettbewerbsprodukten und eigenen Produkten. Diese Differenzierung kann ebenfalls als eine Form der Variation aufgefasst werden. Anknüpfend an solche Ansätze zur Zielsystementwicklung und -konkretisierung sind im vorliegenden Abschnitt vor allem Ansätze von Interesse, die die Variationen zur Entwicklung der Teilsysteme einer neuen Produktgeneration miteinbeziehen und versuchen, diese im Hinblick auf ihre Auswirkungen zu bewerten. Derartige Ansätze sind am ehesten dem Gebiet des Risikomanagements zuzuordnen.

Ausgangspunkt zur Identifikation von potenziell für die Untersuchung interessanter Methoden und Vorgehensmodellen ist daher eine Literaturrecherche zu Ansätzen des Risikomanagements. Damit konnten zunächst 61 verschiedene Risikomanagementansätze identifiziert werden (Altner, 2019, S. 32). Die gefundenen Ansätze wurden zunächst gruppiert, wenn für eine Methode, beispielsweise FMEA, mehrere Varianten gefunden wurden. Anschließend wurden die erhaltenen Methoden und Methodengruppen selektiert, wobei relative Eignung im Vergleich mit anderen Ansätzen, Umfang und Bekanntheit, beispielsweise gemessen durch die Anzahl zugehöriger Suchtreffer in Datenbanken, als Kriterien genutzt wurden (Altner, 2019, S. 34). Damit verblieben 25 Methoden und Methodengruppen. Das Vorgehen zur stufenweisen Gruppierung und Auswahl ist in Abbildung 6.3 dargestellt.



Abbildung 6.3: Stufenweise Clusterung und Auswahl von Risikomanagementansätzen zur Identifikation der schlussendlich in der Untersuchung näher analysierten Ansätze (Altner, 2019, S. 33)<sup>2</sup>, modifiziert.

Für die detaillierte Analyse wurden diejenigen Ansätze ausgewählt, die in irgendeiner Art und Weise sinngemäß Referenzsystemelemente oder Variationen berücksichtigen.

Zu beachten ist, dass sich viele bestehende Methoden nicht explizit auf das Modell der PGE beziehen, sondern beispielsweise auf den Begriff der technischen Änderung, englischsprachig Engineering Change (s. Abschnitt 2.4.4). Die für die vergleichende Analyse notwendige Einordnung in das Modell der PGE basiert daher in diesen Fällen auf einer Interpretation der für die Methode verwendeten Begriffe als Variationsarten, soweit dies möglich ist.

Sofern in Bezug auf das Element der „Variation“ nicht die Modellbildung verwendet wird, kann „Variation“ generisch als eine irgendwie geartete Abweichung eines Systems, seiner Umgebung oder Teilen davon gegenüber einem Ausgangszustand verstanden werden (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 3).

Die schlussendlich ausgewählten Methoden und Methodengruppen wurden in der Analyse jeweils entlang verschiedener Dimensionen verortet, wobei zur Visualisierung jeweils zwei Dimensionen gegeneinander aufgetragen ein Portfolio aufspannen (Altner, 2019, S. 35).

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

### 6.1.2 Analyse bestehender Methoden zur Bewertung von Variationen und Beobachtungen aus der Entwicklungspraxis

Tabelle 36 zeigt die mit dem Vorgehen des vorigen Abschnitts identifizierten Methoden und Methodengruppen, die anschließend näher untersucht wurden. Eine überblicksartige Beschreibung der Methoden findet sich bereits in den jeweils referenzierten Abschnitten in Kapitel 2.

Tabelle 36: Untersuchte Methoden und Methodengruppen (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 5) (modifiziert).

Ansatz(cluster)	Abschnitt in Kap. 2
DSM – Change Propagation	Abschnitt 2.5.3.2
FMEA – Failure Mode and Effect Analysis	Abschnitt 2.5.3.4
VMEA – Variation Mode and Effect Analysis	Abschnitt 2.5.3.5
QFD – Quality Function Deployment	Abschnitt 2.5.1.3
Analogiebildung	Abschnitt 2.5.3.9
Benchmarking	Abschnitt 2.5.1.3
Checklisten	Abschnitt 2.5.3.10
Sensitivitätsanalysen	Abschnitt 2.5.3.7
(Produkt)szenarien	Abschnitt 2.5.1
DRBFM – Design Review Based on Failure Mode	Abschnitt 2.5.3.6

Die Methoden bzw. Methodengruppen wurden in einer ersten Analyse entlang der Dimension „Risikoart“ und „Variationstyp“ verortet. Die Dimension „Risikoart“ gibt dabei an, „in welchem Bereich sich das Risiko manifestiert“ (Altner, 2019, S. 85). Die gewählte Unterteilung in die gezeigten vier Bereiche basiert dabei auf mehrere Ansätzen in der Literatur (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 6). In der Dimension „Variationstyp“ wurde, ausgehend von dem generalisierten Verständnis des Begriffs wie in Abschnitt 6.1.1 definiert, unterschieden, ob eine Variation in der Systemumgebung stattfindet, ob sie gezielt am Produkt vorgenommen wird, ungewollt am Produkt entsteht (z.B. durch Fertigungstoleranzen) oder überhaupt nicht berücksichtigt wird (Altner, 2019, S. 84–85). Die Variationsarten sind hierbei am ehesten als gezielte Variation am Produkt einzuordnen. Das resultierende Portfolio ist in Abbildung 6.4 zu sehen.

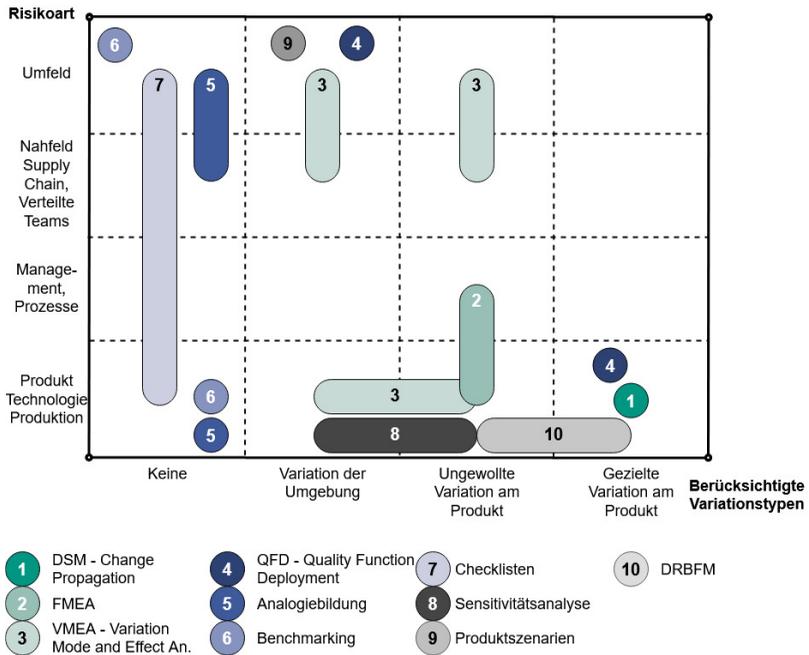


Abbildung 6.4: Verortung der Methoden bzw. Methodengruppen entlang der Dimensionen Risikort und Variationstyp (Altner, 2019, S. 89; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 6) modifiziert.

Man kann erkennen, dass die untersuchten Methoden einerseits gezielte Variationen am Produkt vor allem mit Risikoarten am Produkt und in der Produktion in Verbindung bringen, während Methoden, die eine Variation in der Systemumgebung berücksichtigen, stärker externe Risikoarten berücksichtigen. Es gibt keinen Ansatz, der alle Risikokategorien abdeckt und diese auf gezielte Variationen am Produkt zurückführt. (Altner, 2019, S. 89; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 6)

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, ob und inwieweit diejenigen Methoden, die in irgendeiner Art und Weise Variationen berücksichtigen, mindestens sinngemäß auf Referenzelemente Bezug nehmen. Dabei wurde entsprechend den Erkenntnissen aus den Abschnitten 5.2.2.2 und 5.3.2.2 in der Dimension „Herkunft

betrachteter Referenzelemente (RSE)“ unterschieden zwischen den Ausprägungen „keine RSE betrachtet“, „nur intern.-intern“, „nur intern.-extern“ oder „intern.-intern und -extern“ (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 5). Das so aufgespannte Portfolio ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

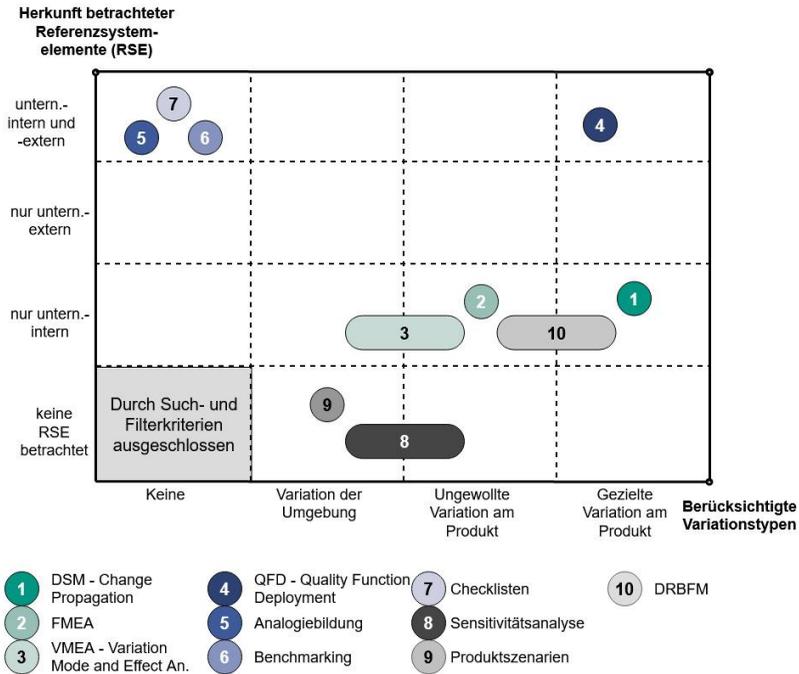


Abbildung 6.5: Verortung der untersuchten Methoden entlang der Dimensionen Variationstyp und Referenzelemente (Altner, 2019, S. 88; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 7), modifiziert.

Es kann beobachtet werden, dass die Methoden, die sich nicht auf Referenzelemente beziehen, nur Variationen in der Systemumgebung oder ungewollte Variationen am Produkt berücksichtigen. Gezielte Variationen am Produkt werden unter Bezug auf interne Referenzelemente berücksichtigt. Nur die QFD betrachtet sowohl unternehmensinterne als auch -externe Referenzelemente.

mente und gezielte Variationen am Produkt. Dies geschieht zur gezielten Produktdifferenzierung. Dabei kann, wie auch beispielsweise bei dem DSM-basierten Ansatz zur Änderungsförderung beobachtet werden, dass zwar auf Variationen gegenüber bestehenden Systemen Bezug genommen wird, eine dezidierte formale und generalisierte Beschreibung dieser Variationen als Grundlage jedoch fehlt. (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 7) Weitere Ansätze, die unternehmensinterne und -externe Referenzelemente berücksichtigen, gehen nicht weiter auf Variationen ein. (Altner, 2019, S. 88; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 6–7)

### 6.1.3 Diskussion und Zwischenfazit

In der Gesamtschau der Ergebnisse zeigt sich, dass Variationen im weitesten Sinne sowie Referenzelemente prinzipiell als Einflussfaktoren für Chancen und Risiken in der Entwicklung erkannt sind. Die untersuchten Methoden bilden diese Einflussfaktoren jeweils partiell ab und können den Ergebnissen der Recherche nach als zu einem gewissen Grad etabliert gelten. Das Recherche- und Analyseergebnis weist im Wesentlichen zwei Unsicherheiten auf: Der Schwerpunkt der Recherche lag auf Literatur aus dem Bereich der Produktentwicklung und des Entwicklungsmanagements. Inwieweit womöglich in betriebswirtschaftlicher Management-Literatur weitere Ansätze bestehen, bleibt offen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass zumindest für die Mechatroniksystem-Entwicklung relevante Ansätze, in denen Variationen oder Synonyme davon Verwendung finden, identifiziert wurden. Die zweite Unsicherheit betrifft die notwendige Interpretation, wobei hier eine Absicherung in formlosen Fachgesprächen unter Autoren von Rapp, Altner und Albers (2020) stattfand.

Als Fazit aus den vorgenommenen Benchmarks kann festgehalten werden, dass gezielte Variationen auf der Basis von Referenzelementen, wie sie durch das Modell der PGE beschrieben werden, bisher kaum bei der Planung und Bewertung von Chancen und Risiken in der Entwicklung einer neuen Produktgeneration mit den untersuchten Ansätzen berücksichtigt werden. Unter der Annahme, dass die untersuchten Ansätze einen wesentlichen Teil der für diesen Zweck gängigen Methoden abdecken, werden hier insgesamt Variationen und Referenzelemente als Einflussfaktoren unzureichend berücksichtigt. Dies steht in deutlichem Gegensatz zu den Ergebnissen aus Kapitel 5. Es besteht hier Bedarf nach einer durchgängigen Unterstützung. (Altner, 2019, S. 99–100; Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 8) Durch eine solche durchgängige Unterstützung sind die folgenden Punkte zu adressieren:

- Ableitung von Variationen auf der Basis gegebener Entwicklungsziele. Ein beispielhaftes Vorgehen hierfür wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt.

- Bewertung von Variationen und Charakteristika der geplanten Referenzsystemelemente als Schlüsselfaktoren für Potenzial und Risiken. Ein entsprechender Ansatz wird in Abschnitt 6.3 entwickelt und evaluiert.
- Bedarfsspezifische Bereitstellung detaillierter Informationen zu Innovationspotenzial durch Variationen auf der Basis von Referenzsystemelementen und daraus folgenden Entwicklungsrisiken. Dies wird durch einen VR-basierten Ansatz ermöglicht, der in Abschnitt 6.4 beschrieben wird.

## **6.2 Ableitung und initiale Bewertung potenziell zielführender Variationen**

In diesem Abschnitt soll ein erster Beitrag geleistet werden, den in Abschnitt 6.1 aufgezeigten Bedarf zu adressieren. Hierfür wird ein Ansatz zur Unterstützung bei der Ableitung und initialen Bewertung potenziell zielführender Variationen zur Erfüllung eines gegebenen Zielsystems vorgestellt. Weiter wird der entwickelte Ansatz initial evaluiert. Damit werden erste Antworten auf die Forschungsfragen II.2 und II.3 in Abbildung 6.6 gegeben. Die dargestellten Ergebnisse und Erkenntnisse wurden mit EICHHORN (2017) in einer durch den Autor co-betreuten studentischen Abschlussarbeit entwickelt und mit RAPP ET AL. (2018) auf einer internationalen Fachkonferenz veröffentlicht.

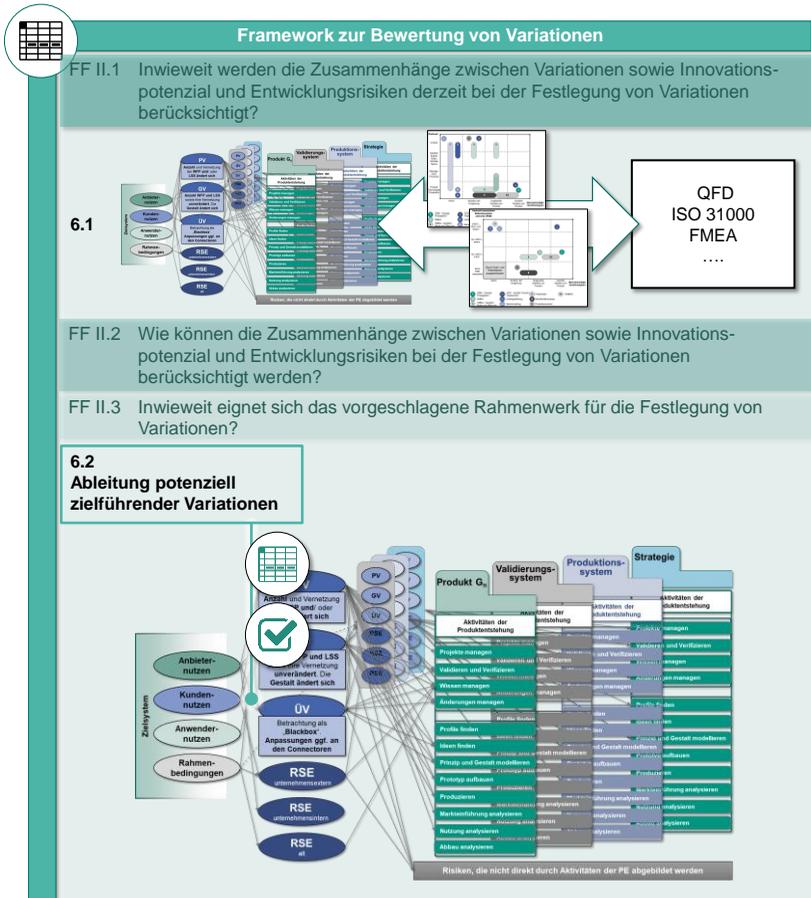


Abbildung 6.6: In diesem Abschnitt werden die Fragen II.2 und II.3 in Bezug auf die Ableitung und initiale Bewertung potenziell zielführender Variationen bei gegebenem Zielsystem beantwortet.

### 6.2.1 Vorgehen

Zu Beginn wird die Struktur des entwickelten Ansatzes vorgestellt und die zugehörige Vorgehensweise kurz erläutert. Dabei wird auf Überlegungen von ALBERS UND MOESER (2016) aufgebaut, in denen verschiedene Fälle überarbeiteter Anforderungen als Ausgangspunkt von Variationen unterschieden werden, die wiederum in unterschiedlichem Umfang Modellanpassungen erfordern wie in Abbildung 6.7 dargestellt.

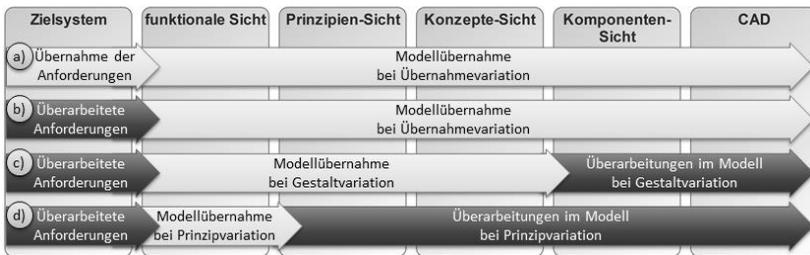


Abbildung 6.7: Verschiedene Umfänge der Modellübernahme und Modellüberarbeitung bei verschiedenen Variationen als Folge der Überarbeitung von Anforderungen in verschiedenem Umfang (Albers & Moeser, 2016, 6).

Anschließend wird der Ansatz im Rahmen der bereits in Abschnitt 5.3.2.2 als Fallstudie genutzten Entwicklung eines Ventils für das Thermomanagement von Fahrzeugen als Fallstudie eingesetzt und evaluiert (Eichhorn, 2017; Rapp et al., 2018, S. 4).

### 6.2.2 Entwicklung des Ansatzes und Evaluation

Ziel des entwickelten Ansatzes ist es, bei Vorliegen von Anforderungen an eine neue Produktgeneration sowie potenziellen Referenzprodukten als Quelle von Referenzelementen Variationen für mögliche alternative Lösungskonzepte für die neue Produktgeneration abzuleiten. Abbildung 6.8 zeigt den Kern des entwickelten Ansatzes im Überblick. Eine ausführliche Beschreibung des Ansatzes ist bei EICHORN (2017, S. 26–37) zu finden. Im Folgenden wird eine darauf basierende

Zusammenfassung gegeben. Im Ansatz werden jeweils ganze Referenzprodukte als potenzielle Referenzsystemelemente behandelt und angesprochen.

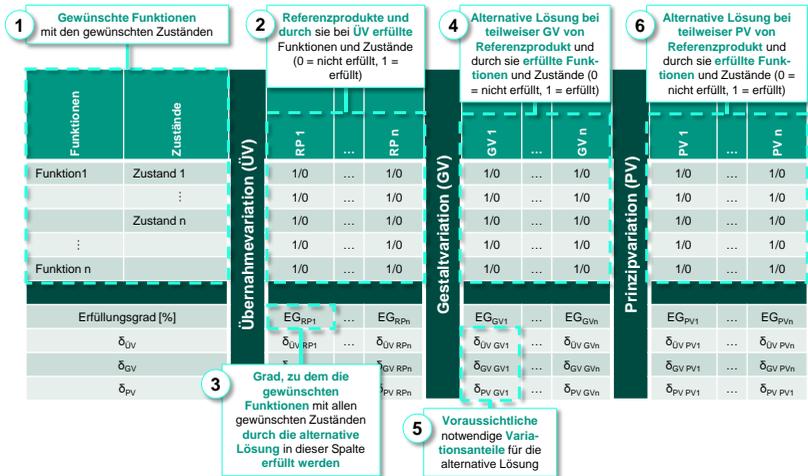


Abbildung 6.8: Ansatz zur Ableitung alternativer Lösungen für eine neue Produktgeneration beim Vorliegen von Anforderungen und potenziellen Referenzprodukten. Darstellung in Anlehnung an EICHORN (2017, S. 28)<sup>3</sup>, auf Basis von EICHORN (2017, S. 36), RAPP ET AL. (2018, S. 5).

Im Bereich (1) werden die für die neue Produktgeneration gewünschten Funktionen mit ihren verschiedenen Funktionszuständen gelistet. Im Bereich (2) werden spaltenweise die zur Verfügung stehenden potenziellen Referenzprodukte gelistet und es wird kenntlich gemacht, welche der Funktionen und Funktionszustände aus (1) durch diese Systeme jeweils bereits erfüllt (Eintrag „1“) oder nicht erfüllt (Eintrag „0“) werden. Bereits erfüllte Funktionen können potenziell durch Übernahmevariation in die neue Produktgeneration dort ebenfalls erfüllt werden. In welchem Umfang bereits durch die Konfiguration in einer Spalte, d.h. in Bereich (2) die Referenzprodukte, die Gesamtheit der gewünschten Funktionen erfüllt wird, wird durch den prozentualen Erfüllungsgrad (3) angegeben (Eichhorn, 2017, S. 25):

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

$$\text{Erfüllungsgrad} = \frac{\text{Anz. erfüllter Anford.}}{\text{Anz. der zu erfüllenden Anford.}} [\%] \quad 6$$

In Bereich (4) werden spaltenweise alternative Lösungskonzepte gelistet, die durch Gestaltvariationen auf Basis der Referenzprodukte aus Bereich (2) entstehen und dadurch gegenüber diesen einen höheren Erfüllungsgrad aufweisen. Als Grundlage für eine Bewertung der alternativen Lösungskonzepte sind in Bereich (5) die voraussichtlich notwendigen Variationsanteile zur Realisierung der jeweiligen alternativen Lösungskonzepte aufgeführt. Die Ermittlung dieser Variationsanteile wird unterstützt durch zwei Matrizen:

- Eine Gestalt-Funktion-Matrix stellt für ein Referenzprodukt dar, wie Funktionen und Komponenten des Produkts verknüpft sind. Dadurch kann anhand der zu beeinflussenden Funktion auf die zu variierenden Komponenten geschlossen werden (Eichhorn, 2017, S. 27; Rapp et al., 2018, S. 4–5)
- Eine Design-Structure-Matrix (DSM) zeigt auf, welche Auswirkungen die Variationen bestimmter Komponenten auf weitere Komponenten des Produkts haben (Eichhorn, 2017, S. 27; Rapp et al., 2018, S. 4–5)

Mit diesen Matrizen können außerdem die notwendigen Variationsarten unter Verwendung der C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren aus Abschnitt 5.2.2.1 identifiziert werden. In Bereich (6) schließlich werden in vergleichbarer Weise wie in Bereich (4) alternative Lösungskonzepte aufgeführt, die durch Prinzipvariation auf Basis der in Bereich (2) bzw. (4) aufgeführten Lösungskonzepte entstehen. (Eichhorn, 2017, S. 26–37)

Mit Hilfe des gezeigten Ansatzes wurden in der Fallstudie ausgehend von einem gewünschten Funktionsumfang für eine neue Produktgeneration eines Ventils mehrere potenzielle Referenzprodukte analysiert und mögliche alternative Lösungskonzepte für die neue Produktgeneration in mehreren Schritten abgeleitet. Abbildung 6.9 zeigt ein Beispiel, wie ein alternatives Lösungskonzept, das den gewünschten Funktionsumfang potenziell vollständig realisiert, in zwei Schritten auf der Basis von zwei Referenzprodukten abgeleitet wurde.

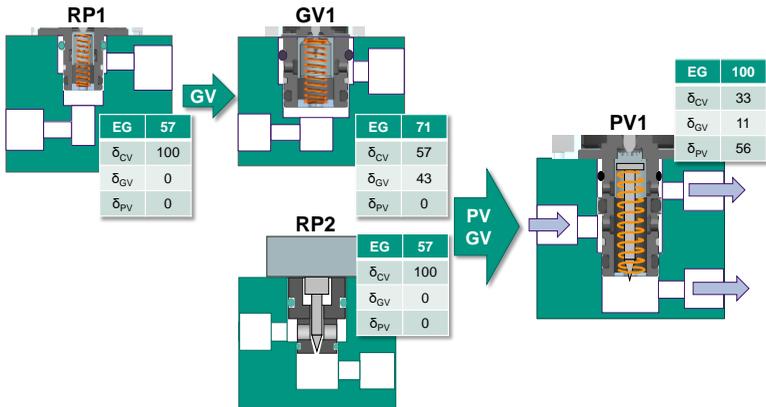


Abbildung 6.9: Ableitung eines alternativen Lösungskonzepts („PV1“), das potenziell die gewünschten Funktionen vollständig erfüllt, für eine neue Produktgeneration des Ventils in der Fallstudie. Im ersten Schritt entsteht das alternative Lösungskonzept „GV1“ durch eine Gestaltvariation auf Basis des Referenzprodukts „RP1“. Anschließend erfolgt auf Basis von „GV1“ und einem weiteren Referenzprodukt „RP2“ eine Prinzipvariation. Das Lösungskonzept „PV1“ weist einen Erfüllungsgrad von 100% auf gegenüber jeweils 57% bei RP1 und RP2 und 71% bei GV1 (Rapp et al., 2018, S. 6).

Insgesamt gelang es in der Fallstudie, mehrere alternative Lösungskonzepte abzuleiten, die einen Erfüllungsgrad von 100% aufwiesen (Eichhorn, 2017, S. 36; Rapp et al., 2018, S. 7–8).

Dabei konnte beobachtet werden, dass Referenzprodukte, die von Unternehmensexperten als vielversprechend eingeschätzt wurden, mit hohem erwartetem Übernahmevariationsanteil Grundlage von Lösungskonzepten waren. (Eichhorn, 2017, S. 82; Rapp et al., 2018, S. 7). In diesem Sinne wurde die Nutzung von Variationsanteilen als Bewertungsgröße positiv evaluiert. Für die schlussendliche Auswahl eines Lösungskonzept wurde zusätzlich zu den erwarteten Variationsanteilen darauf geachtet, dass bestehende Ressourcen, beispielsweise Produktionsanlagen, auf denen bereits unternehmens-interne Referenzprodukte gefertigt werden, voraussichtlich weiter genutzt werden können. Es wurde daher nicht dasjenige Lösungskonzept mit dem höchsten Übernahmevariationsanteil ausgewählt. (Eichhorn, 2017, S. 58)

Die abschließende Evaluation des Lösungskonzepts erforderte den Aufbau von Funktionsmustern und Verifikationsaktivitäten. Erst damit zeigte sich, dass einzelne Anforderungen an die neue Produktgeneration durch das gewählte Lösungskonzept nicht erfüllt werden konnten. (Eichhorn, 2017, S. 71–79)

In der Anwendung des Ansatzes zur Ableitung alternativer Lösungskonzepte konnten Indikatoren beobachtet werden, die anzeigen, wann voraussichtlich eine Gestalt- oder Prinzipvariation zielführend sind. Diese Beobachtungen passen zu den Fallunterscheidungen von ALBERS UND MOESER (2016) und konkretisieren diese:

- „Ist eine gewünschte Funktion grundsätzlich abbildbar, wobei nicht alle gewünschten Zustände dargestellt werden können, ist dies ein Indikator dafür, dass durch eine geeignete GV weitere Zustände abgebildet werden können“ (Eichhorn, 2017, S. 33)
- Eine Prinzipvariation ist voraussichtlich notwendig, wenn eine gewünschte Funktion durch zur Verfügungstehende Referenzsystemelemente überhaupt nicht realisiert wird (Rapp et al., 2018, S. 6).

### 6.2.3 Diskussion und Zwischenfazit

Der entwickelte Ansatz bot in der Fallstudie eine Unterstützung, um mehrere alternative Lösungskonzepte für eine neue Produktgeneration abzuleiten. Für eine abschließende Verifikation und Validierung sind anschließende Aktivitäten notwendig. Unter anderem ist auch die technische Machbarkeit und Konsistenz der Lösungskonzepte zu prüfen, beispielsweise, wenn Konzepte auf Referenzsystemelementen aus mehreren Referenzprodukten basieren. (Eichhorn, 2017, S. 71; Rapp et al., 2018, S. 8–9)

In weiterführenden Analysen sind detailliertere Analysen der Fortpflanzung von Variationen zu untersuchen. Dabei kann beispielsweise auf bestehende Ansätze zur Analyse von Änderungsfortpflanzungen zurückgegriffen werden (2.5.3.2).

Der entwickelte Ansatz greift die Grundidee morphologischer Kästen auf (s. Abschnitt 2.6.3). Gegenüber hier üblichen Ansätzen wird jedoch die gezielte Variation von Teilsystemen explizit adressiert. Die Ableitung und Analyse von Variationen geschehen darüber hinaus auf der Grundlage des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs. Die Ableitung von Lösungskonzepten mit Hilfe des Ansatzes setzt daher Wissen über die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge der Referenzprodukte voraus. Dieses Wissen ist bei unternehmensinternen Referenzsystemelementen tendenziell vorhanden. Liegt es nicht in der benötigten Form vor, sind die entsprechenden Modelle zu erstellen. Für unternehmensexterne Referenzsystemelemente ist diese Modellerstellung in der Regel immer notwendig. Diese Modellierung stellt eine Heraus-

forderung bei der Verwendung des gezeigten Ansatzes dar. Zumindest bei unternehmensinternen Referenzsystemelementen besteht das Potenzial, diesen Aufwand durch die generationsübergreifende Verwendung von Modellen des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs von Systemen zu reduzieren. (Eichhorn, 2017, S. 82–86; Rapp et al., 2018, S. 7–9)

Durch eine geeignete Standardisierung bei der Modellbildung ist es auch denkbar, Datenbanken aufzubauen, die ausgehend von dem vorgestellten Ansatz zumindest eine teilweise automatisierte Konzepterstellung ermöglichen (Eichhorn, 2017, S. 86).

Bisher nicht durch den Ansatz erfasst ist der Fall, dass ein bereits bestehendes System als potenzielles Referenzsystemelement hinsichtlich des Funktionsumfangs von vorn herein einen Erfüllungsgrad von mehr als 100% aufweist. Denkbar wäre ein solcher Fall beispielsweise, wenn das betreffende schon vorhandene System dabei zunächst deutlich teurer in der Herstellung wäre als es für das neu zu entwickelnde System angestrebt ist. Ziel der Entwicklungsarbeit könnte dann zur Preis- und Herstellkostenreduktion eine technische Vereinfachung durch gezielte Gestalt- und Prinzipvariation sein. (Eichhorn, 2017, S. 85)

Weiterhin werden bisher alle Funktionen gleich gewichtet. Hier ist eine Weiterentwicklung denkbar, um der unterschiedlichen Bedeutung verschiedener Funktionen gerecht zu werden (Eichhorn, 2017, S. 85).

Im Ansatz wird das Innovationspotenzial der alternativen Lösungskonzepte bisher durch den angestrebten Funktionsumfang repräsentiert (Rapp et al., 2018, S. 9). In Weiterentwicklungen kann die Abbildung weiterer Zielsysteminhalte untersucht werden und so auch eine gegenseitige Abwägung von Zielen ermöglicht werden, so dass beispielsweise die Untererfüllung einer Funktion durch die Übererfüllung einer anderen Funktion kompensiert werden kann. Darüber hinaus ist zu untersuchen, inwieweit und wie Lösungen mit Innovationspotenzial abgeleitet werden können, die durch größere Änderungen an der Systemarchitektur realisiert werden. Im verwendeten Beispiel werden die vorgenommenen Änderungen an der Systemarchitektur als mäßig eingeschätzt, wobei größeren Änderungen auch durch die begrenzte Komplexität des betrachteten Systems Grenzen gesetzt waren. Eine Anwendung des Ansatzes auf unterschiedlichen Systemebenen und bei komplexen Systemen mit einer Teilsystemstruktur, die nicht zu fein ist, erscheint jedoch möglich. Die erwarteten Variationsanteile der abgeleiteten Lösungskonzepte sind als erster Anhaltspunkt für eine Bewertung sowie einen Vergleich von Konzepten geeignet (Eichhorn, 2017, S. 82; Rapp et al., 2018, S. 9). Wie die Fallstudie gezeigt hat, sind jedoch eventuell weitere Informationen für die Bewertung notwendig, beispielsweise zur Herkunft der Referenzsystemelemente oder erwartete Variationen im zugehörigen Produktionssystem. Diese Beobachtungen bestätigen die gewählte Struktur des Modells aus Kapitel 5, bei dem Charakteristika von Referenzsystemelementen

als Faktoren direkt neben den Variationsarten aufgeführt werden. Im folgenden Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, der Faktoren aus beiden diesen Dimensionen als Schlüsselfaktoren für die Bewertung von Variationen und des mit ihnen verbundenen Entwicklungsrisikos nutzt.

### 6.3 Risikobewertung anhand von Schlüsselfaktoren

Ziel dieses Abschnittes ist es, einen Ansatz zur Bewertung von Lösungskonzepten mit Innovationspotenzial zur Verfügung zu stellen, der sowohl die Variationsarten als auch ausgewählte Charakteristika von Referenzsystemelementen als Schlüsselfaktoren zur Abschätzung von Entwicklungsrisiken nutzt. Dabei liegt der Fokus in Fortsetzung des zuvor gezeigten Ansatzes nun weniger auf der Konzepterstellung und stärker auf der Konzeptbewertung, wobei Charakteristika von Referenzsystemelementen explizit berücksichtigt werden.

Die Bewertungsgrundlage für Lösungskonzepte und dafür erforderliche Variationen kann im Produktentwicklungsprozess zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich sein, unter anderem gekennzeichnet durch den jeweiligen Konkretisierungsgrad. Mit dem hier vorgestellten Ansatz soll eine Bewertung bereits in der Frühen Phase der PGE möglich sein. Ausgehend von Beobachtungen in der Entwicklungspraxis und unter Verwendung des Modells der PGE definieren ALBERS, RAPP, BIRK UND BUR-SAC die Frühe Phase im Modell der PGE wie folgt:

#### **Definition Frühe Phase der PGE:**

Die „Frühe Phase“ der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit einer bewerteten technischen Lösung endet, die schließlich das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente abdeckt. Die zur technischen Lösung gehörende Produktspezifikation als Teil des Zielsystems enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Systems hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen oder des technischen und ökonomischen Risikos.

ALBERS UND RAPP ET AL. (2017, S. 4)

Mit Hilfe des Modells der PGE wird hier expliziert, dass das zu entwickelnde System zunächst nur hinsichtlich wesentlicher Aspekte konkretisiert ist, bereits aber sehr umfängliches Wissen aus Referenzsystemelementen verfügbar sein kann. Dies kann für die Bewertung von Variationen genutzt werden (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7).

Mit der nachfolgend beschriebenen Entwicklung und Evaluation des Ansatzes werden wie in Abbildung 6.10 gezeigt die Forschungsfragen II.2 und II.3 beantwortet hinsichtlich einer Nutzung von Variationsarten und Charakteristika von Referenzsystemelementen als Schlüsselfaktoren.

Die dargestellten Ergebnisse und Erkenntnisse wurden dabei im Rahmen von durch den Autor co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten (Wattenberg, 2018; Winter, 2018)<sup>4</sup> sowie Publikationen mit weiteren Autoren auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen (Albers, Rapp et al., 2017; Albers, Rapp, Heitger et al., 2018) entwickelt.

---

<sup>4</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeiten (co-betreut)

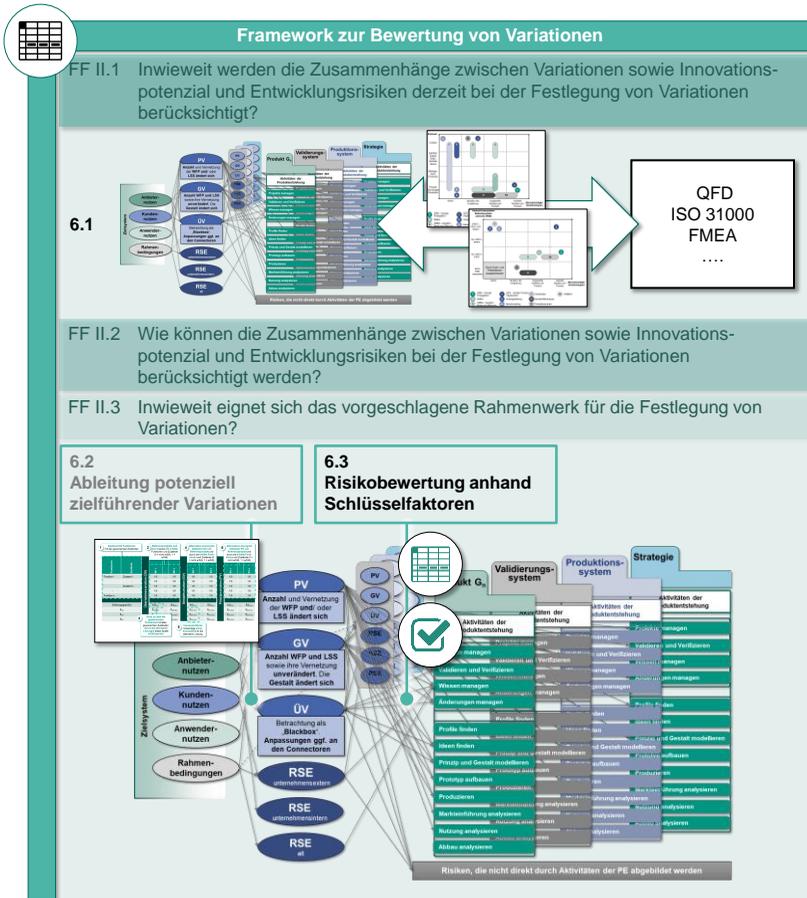


Abbildung 6.10: Der in diesem Abschnitt entwickelte Ansatz zeigt, wie Variationsarten und Charakteristika von Referenzelementen als Schlüsselfaktoren für eine Risikobewertung auf Basis des Modells der PGE genutzt werden können.

### 6.3.1 Vorgehen

Zunächst wird der konzipierte Ansatz vorgestellt und erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse von zwei Evaluationen beschrieben.

In einer ersten Evaluation wurde der entwickelte Ansatz mit studentischen Entwicklungsteams im Live-Lab „Integrierte Produktentwicklung“ am IPEK eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.3 „Überblick Forschungsmethoden und -umgebungen“) (Wattenberg, 2018, S. 112). Dabei wurde ein Kontrollgruppen-Testgruppen-Design verwendet (Wattenberg, 2018, S. 113). Dabei wurden sowohl Anwendbarkeit als auch die Unterstützung durch den Ansatz evaluiert.

Für eine zweite Evaluation wurde der Ansatz mehrfach in einem realen Entwicklungsprojekt eingesetzt. Dabei wurde die Entwicklung eines Lasthandlings für einen urbanen Logistikassistenten als Fallstudie genutzt (Winter, 2018, S. 34). Abbildung 6.11 zeigt ein Beispiel für ein solches System.



Abbildung 6.11: Beispiel für einen urbanen Logistikassistenten (welt.de, 2016), ähnlich dem in der Fallstudie betrachteten System.

### 6.3.2 Entwicklung des Ansatzes und Evaluation

Eine Bewertung von Variationen in Bezug auf bestimmte Entwicklungsrisiken kann bereits in der Frühen Phase der PGE erfolgen unter Ausnutzung von Beobachtungen aus Kapitel 5. Auf Basis dieser Beobachtungen kann festgehalten werden (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7):

- Vor allem (aber nicht ausschließlich) Gestalt- und Prinzipvariationen bedeuten Veränderungen im Gestalt-Funktion-Zusammenhang gegenüber dem

zu Grunde liegenden Referenzsystemelement. Diese Veränderungen sind zum einen auszuarbeiten, zum anderen werden dadurch beispielsweise auch Produktionssystementwicklungen oder Validierungsaktivitäten notwendig. Mit steigendem Gestalt- und Prinzipvariationsanteil steigt tendenziell das Entwicklungsrisiko, einschließlich Entwicklungskosten, bedingt durch technische Neuheit im jeweils vorliegenden Kontext.

- Bei der Arbeit mit externen Referenzsystemelementen können Risiken entstehen, beispielsweise weil Zielsysteminhalte oder die technische Dokumentation des Referenzsystems in der Regel nicht zugänglich sind. Entstammen Referenzsystemelemente anderen Branchen als der eigenen, ist zudem womöglich die Expertise zu deren Analyse initial weniger stark ausgeprägt als bei Referenzsystemelementen aus der eigenen Branche. Referenzsystemelemente aus Forschungs- und Vorentwicklungsaktivitäten sind darüber hinaus womöglich noch nie im Marktumfeld zum Einsatz gekommen, wodurch hier nicht auf entsprechende Analysen zurückgegriffen werden kann. Jeder der beschriebenen Aspekte kann als eine Form von Wissensdefizit aufgefasst werden.

Der entwickelte Ansatz in Abbildung 6.12 visualisiert genau diese beiden Dimensionen als Grundlage für eine Bewertung von Variationen. Im Bild sind beispielhaft Teilsysteme der ersten ZMS-Generation, die bereits zuvor als Fallbeispiel betrachtet wurde (s. z.B. Abschnitt 5.1), sowie des zugehörigen Kupplungssystems verortet. „Zu beachten ist, dass diese Darstellung vor allem Tendenzen zeigt.“ (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7).

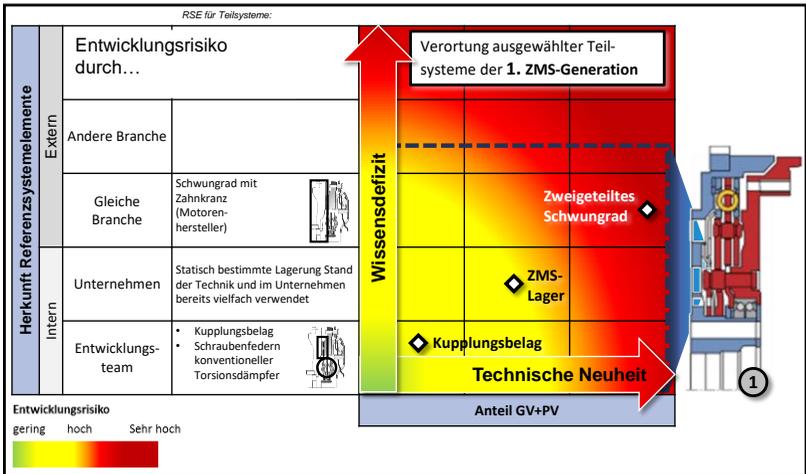


Abbildung 6.12: Ansatz zur Unterstützung der Bewertung von Variationen bereits in der Frühen Phase der PGE basierend darauf, dass sowohl technische Neuheit in Form von Gestalt- und Prinzipvariationsanteil als auch die organisatorische Herkunft von Referenzsystemelementen tendenziell zu Entwicklungsrisiko führen (s. Kapitel 5). Beispielhaft Teilsysteme der 1. ZMS-Generation sowie des zugehörigen Kupplungssystems verortet. Abbildung aus Vortrag zu und basierend auf ALBERS UND RAPP ET AL. (2017) (modifiziert).

Die Bewertungszielgröße „Entwicklungsrisiko“ kann beispielsweise mit den Erkenntnissen aus den Fallbeispielbeobachtungen zu Auswirkungen von Variationen sowie Charakteristika von Referenzsystemelementen in den Abschnitten 5.1.2 und 5.3.2.2 sowie der Verknüpfung bekannter Risiken mit Variationen in Abschnitt 5.3.2.3 weiter konkretisiert werden. Für die Anwendungen in einzelnen Unternehmen sind darüber hinaus spezifische Datenerhebungen denkbar, die über mehrere Produktgenerationen hinweg eine unternehmensspezifische Quantifizierung des Entwicklungsrisikos erlauben.

Die erste Evaluation des Ansatzes wurde im Live-Lab „Integrierte Produktentwicklung“ am IPEK (s. auch Abschnitt 4.3) in einem Kontrollgruppe-Testgruppe-Design als Workshop durchgeführt (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 207). Dafür wurde ein Vorgehen zur Verwendung des Ansatzes in vier Schritten entwickelt:

1. „Zerlegung des Produkts in Teilsysteme
2. Zuordnung der Ideen zu den Teilsystemen
3. Einordnung der Teilsysteme im Risikoportfolio
4. Analyse der Tragweite von Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess anhand von Leitfragen“ (Wattenberg, 2018, S. 112)

„Die Leitfragen bzw. Leitpunkte aus Schritt vier lauten dabei:

- Wie betrifft die Umsetzung der jeweiligen Idee die einzelnen Teilsysteme?
- Woher kamen die jeweiligen Referenzprodukte für die Teilsysteme und welche Variationen wurden vorgenommen?
- Was war die Ursache für die Entscheidung für eine bestimmte Variation?
- Potentielle Risiken
- Mit welchen Kostenänderungen ist zu rechnen?
- Ausgehend von den gesammelten Informationen: Welche Schritte sind für die Erstellung der Funktionsprototypen als nächstes einzuleiten und was ist dabei zu beachten?“ (Wattenberg, 2018, S. 112)

Der Testgruppe wurden für diese Leitpunkte Informationen aus den Fallbeispieluntersuchungen in Abschnitt 5.1 bereitgestellt, die sich im Modell aus Kapitel 5 niederschlagen. Abbildung 6.13 zeigt dies beispielhaft anhand der Workshop-Unterlagen für die Teilnehmer.

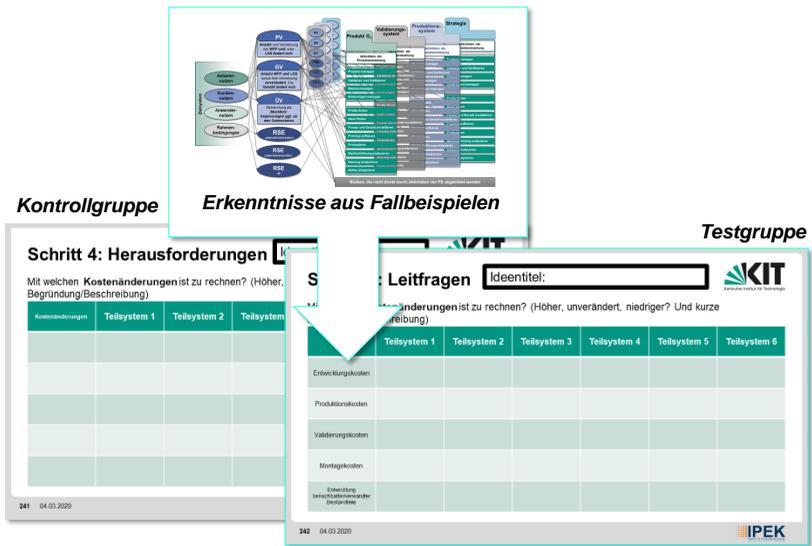


Abbildung 6.13: In der Evaluation des Ansatzes im Live-Lab IP (s. Abschnitt 4.3) wurden der Testgruppe zur Bewertung von Variationen Erkenntnisse aus den Fallbeispieluntersuchungen in Abschnitt 5.1 bereitgestellt. Darstellung auf Basis von Abbildung 5.22 und WATTENBERG (2018, S. 116)<sup>5</sup>.

Das Vorgehen kann in dieser Hinsicht als eine Form der Checkliste verstanden werden, die auch unter den analysierten Methoden in Abschnitt 6.1 ist und bei der bis dato kein Bezug zu Variationen gefunden werden konnten.

Für die Studie wurden aus jedem der 7 IP-Teams 2 Tandems gebildet. Dabei wurde der Workshop für die Studie mit der Kontrollgruppe vormittags, mit der Testgruppe nachmittags durchgeführt. Als Grundlage für den Workshop wurden die Teams gebeten, drei ihrer Ideen mitzubringen, die zu diesem Zeitpunkt die höchste Umsetzungswahrscheinlichkeit aufwiesen. (Wattenberg, 2018, S. 113)

Das in Abbildung 6.12 gezeigte Portfolio wurde wie in Abbildung 6.14 zu sehen in einer angepassten Version verwendet. Der Farbverlauf wurde einerseits entfernt,

<sup>5</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

um eine Vorfixierungen bei den Probanden zu vermeiden. Zum anderen erfordert die Zuweisung von Variationsarten zu einzelnen Teilsystemen, dass das Portfolio in waagrechter Richtung entsprechend der Variationsarten unterteilt wird. Diese Trennung kann im Allgemeinen jedoch nicht generell mit dem durch den Farbverlauf angedeuteten kontinuierlichen Risikozuwachs in Einklang gebracht werden, da beispielsweise Gestaltvariationen denkbar sind, die risikoreicher als Prinzipvariationen sind. (Wattenberg, 2018, S. 114–115)

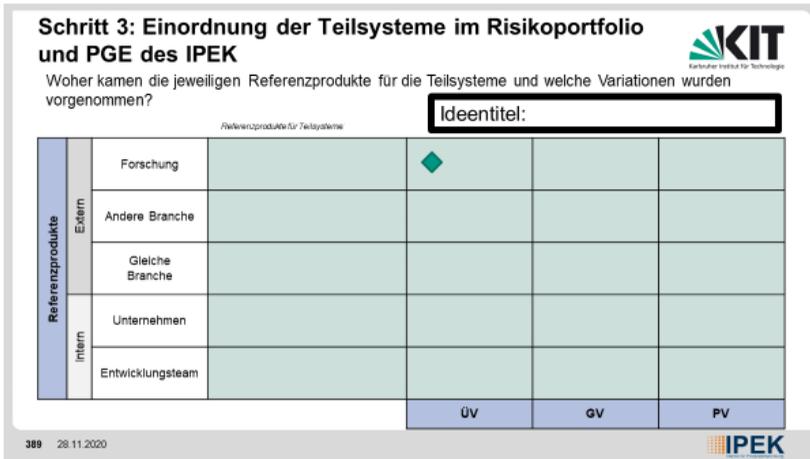


Abbildung 6.14: Version des Portfolios aus Abbildung 6.12 wie es im IP-Workshop zum Ausfüllen durch die Probanden eingesetzt wurde. Der Farbverlauf wurde entfernt, um die Probanden vorab nicht zu beeinflussen und um Inkonsistenzen mit der Unterteilung der Waagrechten gemäß der drei Variationsarten zu vermeiden. Referenzprodukte sind die Quellen für Referenzsystemelemente (Wattenberg, 2018, S. 115)<sup>6</sup>.

Zur Auswertung der Studie wurde erfasst, wie viel Risiken und mögliche Kosten durch die Gruppen jeweils identifiziert wurden. Das Gesamtergebnis je Teams über

<sup>6</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

alle Teilsysteme hinweg ist in Tabelle 37 zu sehen. Bei der in der Studie vorgenommenen Trennung zeichnen sich Kosten gegenüber den übrigen Risiken dadurch aus, dass sie mit verhältnismäßig hoher Wahrscheinlichkeit tatsächlich eintreten.

Tabelle 37: Anzahl an Risiken und möglichen Kosten, die durch die Teilnehmer in der Evaluationsstudie im IP-Workshop jeweils pro Team insgesamt identifiziert wurden (Wattenberg, 2018, S. 117)<sup>7</sup>.

<b>Gruppe</b>	<b>Vormittags (Kontrollgruppe)</b>		<b>Nachmittags (Testgruppe)</b>	
	Risiken	Kosten	Risiken	Kosten
<b>Gruppe 1</b>	9	10	42	30
<b>Gruppe 2</b>	23	6	72	27
<b>Gruppe 3</b>	6	6	22	44
<b>Gruppe 4</b>	11	10	19	0
<b>Gruppe 5</b>	9	0	10	11
<b>Gruppe 6</b>	29	0	35	25
<b>Gruppe 7</b>	19	6	31	23
<b>Summe</b>	106	38	230	160

Man kann erkennen, dass bis auf Gruppe 4 in der Testgruppe durchweg mehr Risiken und Kosten identifiziert wurden. Bei Gruppe 4 hat das Nachmittagsteam so viel Zeit für die Risiken-Analyse investiert, dass für die Kosten die gegebene Zeit nicht ausgereicht hat. (Wattenberg, 2018, S. 117) Dem kann jedoch in künftigen Anwendungen durch geeignetes Zeitmanagement entgegengewirkt werden.

Bei den gezeigten Ergebnissen sind als potenzielle weitere Einflussfaktoren prinzipiell die Probanden selbst sowie die Ideen zu beachten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ideen auf Grund der Instruktion der Teams einen ausreichend ähnlichen Reifegrad aufwiesen und die Teilnehmer selbst durch das vergleichbare Kompetenzprofil als relativ homogene Gruppe betrachtet werden können. Es wird daher angenommen, dass die Unterschiede zwischen Kontroll- und Testgruppe wenn, dann nicht allein durch diese Faktoren zu erklären sind und mindestens teilweise auf den verwendeten Ansatz zur Risikoabschätzung zurückzuführen sind. (Wattenberg, 2018, S. 117–118)

Für eine zweite Evaluation, in der auch die Zeitabhängigkeit der Risikobewertung näher untersucht werden sollte, wurde der Ansatz in einem Fallbeispiel eingesetzt. Dabei wurde der Ansatz in der Entwicklung des Lasthandlings für einen mobilen

<sup>7</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Logistikassistenten zunächst bei der initialen Konzeptauswahl zur Bewertung alternativer Lösungen eingesetzt. Anschließend wurde er wiederholt in der Ausarbeitung des gewählten Konzepts angewandt.

Abbildung 6.15 zeigt die ausgefüllten Portfolios für die alternativen Lösungen in der initialen Konzeptauswahl in der Fallstudie im Überblick und zum Vergleich der Verortung von Teilsystemen.

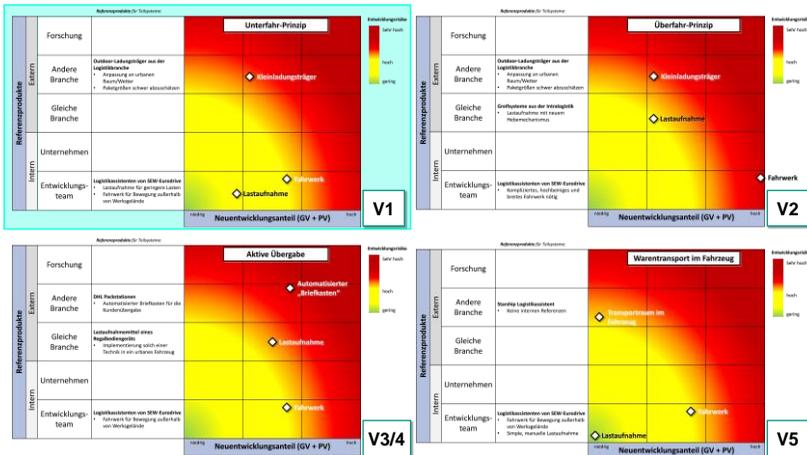


Abbildung 6.15: Ausgefüllte Portfolios für die alternativen Lösungen V1 – V5 bei der initialen Konzeptauswahl in der Fallstudie. Der Fokus liegt auf der Verortung der einzelnen Teilsysteme im Portfolio des entwickelten Ansatzes. V1 wurde schlussendlich ausgewählt. „Referenzprodukte“ in der vertikalen Dimension sind die Ursprungssysteme von Referenzelementen (Winter, 2018, S. 49–52)<sup>8</sup>.

Man kann durch Vergleich verschiedener Lösungen, die sich jeweils nur in der Einordnung eines Teilsystems unterscheiden, erkennen, dass tendenziell V1 mit mehr Risiko assoziiert wird als V5 und V2 mit mehr Risiko als V3/4. Weitere Vergleiche sind ohne eine Risikoquantifizierung nicht eindeutig möglich, wenn sich Lösungen

<sup>8</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

in mehr als einem Feld unterscheiden. Tabelle 38 zeigt das Ergebnis einer Nutzwertanalyse, anhand derer die finale Konzeptauswahl getroffen wurde.

Tabelle 38: Ergebnis einer Nutzwertanalyse zur finalen Auswahl aus den Konzeptalternativen, die in Abbildung 6.15 im Portfolio verortet sind (Winter, 2018, S. 56)<sup>9</sup>.

Ergebnis gewichtete Punktebewertung - Auswahl des Grundprinzips				
	V1 - Unterfahren	V3 + 4 Vertikales LAM	V5 - Warentransport im Fahrzeug	V2 - Überfahren
Teiln. 1	3,30	2,45	2,84	3,04
Teiln. 2	3,21	2,68	2,54	3,12
Teiln. 3	3,66	3,05	2,09	3,45
Teiln. 4	3,34	2,37	2,72	2,66
Teiln. 5	2,97	2,01	1,93	2,61
Personen	5	5	5	5
<b>Schnitt</b>	<b>3,30</b>	<b>2,51</b>	<b>2,42</b>	<b>2,98</b>
<b>Rang</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

Zu erkennen ist, dass mit V1 nicht diejenige Alternative ausgewählt wurde, die Abbildung 6.15 zu Folge tendenziell mit dem geringsten Risiko behaftet ist. Dies kann unter anderen dadurch erklärt werden, dass bei der Auswahl nicht per se eine Risikominimierung angestrebt wird, sondern eher ein gewünschtes Risiko-/Nutzen-Verhältnis. Die Nutzen-Dimension als Innovationspotenzial wird jedoch durch den Ansatz in der vorgestellten Version nicht visualisiert.

Zu Beginn der Ausarbeitung des Teilsystems „Lasthandling“ für das ausgewählte Konzept wurde eine initiale Systemstruktur erstellt, die in Abbildung 6.16 zu sehen ist.

<sup>9</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

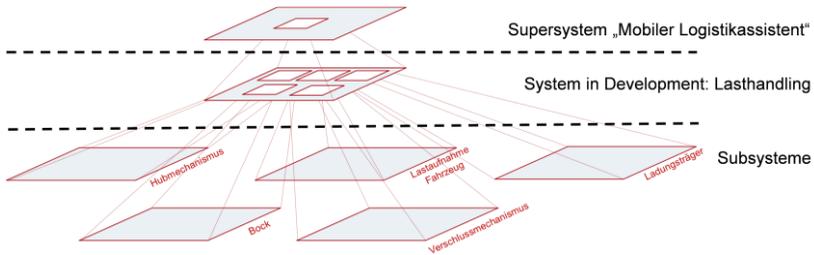


Abbildung 6.16: Erste Systemstruktur zu Beginn der Ausarbeitung des Lasthandlings für das gewählte Konzept in der Fallstudie (Winter, 2018, S. 57)<sup>10</sup>.

Weiter wurden die Dimensionen des Ansatzes zur Risikobewertung mit den in Tabelle 39 gezeigten Zahlen hinterlegt, um eine erste Quantifizierung vornehmen zu können. Zu beachten ist, dass die Abstufung, vor allem in Bezug auf die Variationsarten nur tendenziell, nicht aber allgemein gelten kann.

Tabelle 39: Zuordnung von Zahlenwerten zu den Dimensionen des Portfolios. Zu beachten ist, dass die Abstufung nur Tendenzen widerspiegelt (Winter, 2018, S. 62)<sup>11</sup>.

Ursprung des Referenzelemente	Variationsart	Zugeordneter Zahlenwert für die Risikoberechnung
Intern – Entwicklungsteam	Übernahmevariation (ÜV)	1
Intern – gesamte Firma		2
Extern – selbe Branche	Gestaltvariation (GV)	3
Extern – andere Branche		4
Stand der Forschung	Prinzipvariation (PV)	5

<sup>10</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

<sup>11</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Eine erste Risikoabschätzung in der Ausarbeitung des Lasthandlings in der Fallstudie anhand der Struktur aus Abbildung 6.16 und den Werten aus Tabelle 39 ist in Abbildung 6.17 zu sehen.

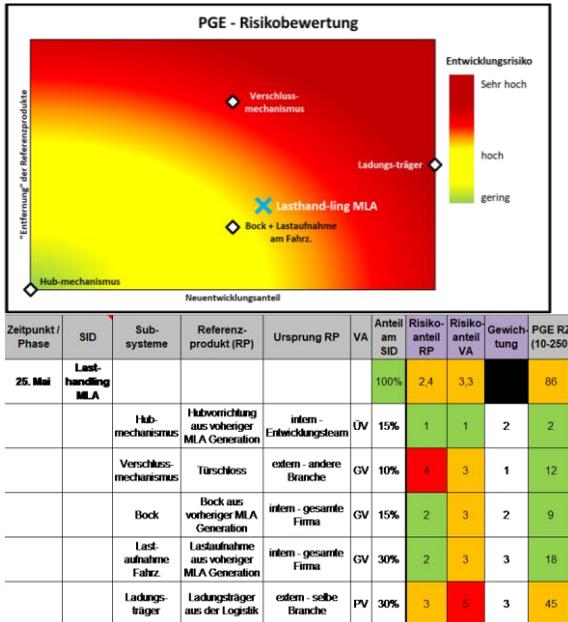


Abbildung 6.17: Erste Risikobewertung in der Fallstudie auf Basis der Struktur aus Abbildung 6.16 und den Werten aus Tabelle 39. Aus den Werten für die Teilsysteme wurde auch ein Datenpunkt für das Gesamtsystem berechnet (X). Anteile der Teilsysteme am Gesamtsystem auf Basis von Experteneinschätzung (Winter, 2018, S. 61)<sup>12</sup>.

Um zu berücksichtigen, dass für die Funktionserfüllung des Systems sowie das Gesamtentwicklungsrisiko nicht alle Teilsysteme von gleicher Bedeutung sind, floss in die Berechnung des Gesamtentwicklungsrisikos eine zunächst geschätzte prozentuale Angabe zum Anteil eines Teilsystems am Gesamtsystem mit ein (Winter,

<sup>12</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

2018, S. 62). Später wurden die Teilsystemgewichte durch eine vereinfachte QFD-Analyse (s. Abschnitt 2.5.1.3) bestimmt (Winter, 2018, S. 80–81).

Im Projektverlauf wurden einzelne Teilsysteme konkretisiert. Hierdurch wird mit dem Ansatz in der verwendeten Form eine detailliertere Risikoauflösung möglich, indem bei verfeinerten Teilsysteme die ausdetailliertere Systemstruktur als Analysegrundlage genutzt wird. Abbildung 6.18 zeigt eine Risikoeinschätzung aus der Fallstudie, bei der das Teilsystem „Ladungsträger“ konkretisiert ist.

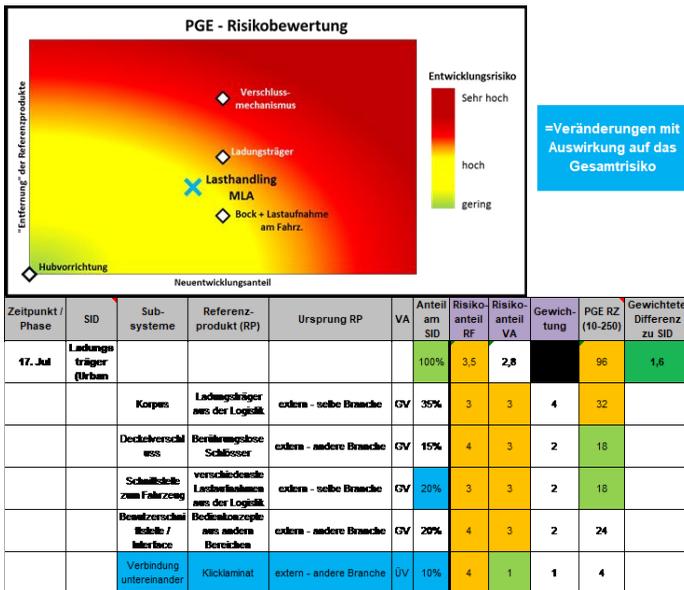


Abbildung 6.18: Risikobewertung, bei der das Teilsystem „Ladungsträger“ konkretisiert ist. Dadurch ergibt sich eine detailliertere Analysegrundlage für die Bewertung (Winter, 2018, S. 79)<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Abbildung 6.19 zeigt die zu Ende der Fallstudie vorliegende Systemstruktur, die gegenüber dem initialen Stand aus Abbildung 6.16 deutlich detaillierter ist. In Abbildung 6.20 ist die zugehörige Risikobewertung zu sehen.

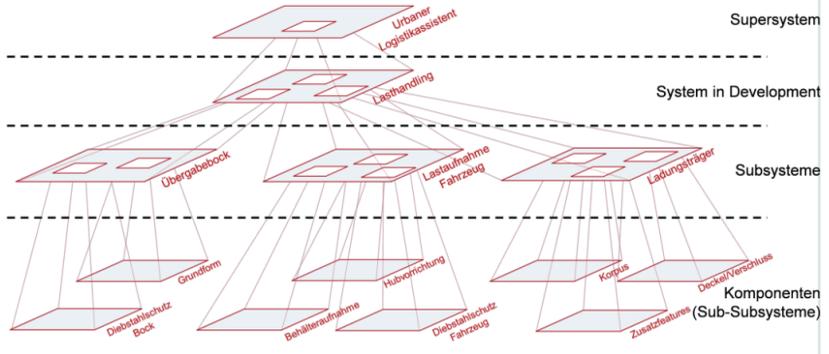
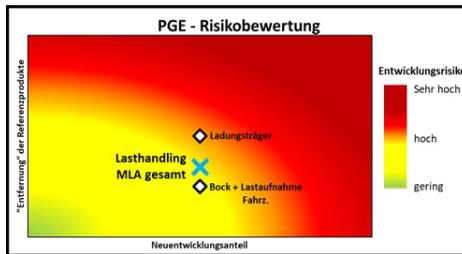


Abbildung 6.19: Systemstruktur zum Ende der Entwicklung in der Fallstudie (Winter, 2018, S. 83)<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)



Zeitpunkt / Phase	SID	Sub-systeme	Referenzprodukt (RP)	Ursprung RP	VA	Anteil am SID	Risikoanteil RF	Risikoanteil VA	Gewichtung	PGE RZ (10-250)	Gewichtete Differenz zu SID
05. Sep	Lasthandling MLA					100%	2,4	3,0		72	
		Ladungs-träger	Ladungsträger aus der Logistik	extern - selbe Branche	GV	39%	3	3	4	35	
		Last-aufnahme Übergabe-bock	Lastaufnahme aus vorheriger MLA Bock aus vorheriger MLA	intern - gesamte Firma intern - gesamte Firma	GV GV	28% 32%	2 2	3 3	3 3	17 19	
04. Jul	Ladungs-träger (UMB)					100%	3,5	3,0		104	5,3
		Korpus	Ladungsträger aus der Logistik	extern - selbe Branche	GV	55%	3	3	6	50	
		Deckel/ Verschluss	Berührungslöse Schösser	extern - andere Branche	GV	20%	4	3	2	24	
		Benutzer-schnittstelle /	Bedienkonzepte aus andern	extern - andere Branche	GV	25%	4	3	3	30	
17. Jul	Lastauf-nahme am					100%	3,0	1,7		51	3
		Behälter-aufnahme	Zentrierungen aus der Industrie	extern - selbe Branche	GV	35%	3	3	4	32	
		Diebstahl-schutz	Drehmagnete Zukaufteil	extern - selbe Branche	ÜV	25%	3	1	3	8	
		Hubvor-richtung	Zukaufteil aus Industrie	extern - selbe Branche	ÜV	40%	3	1	4	12	
27. Jul	Bock					100%	1,6	3,0		48	4
		Grundform	Grundform vorheriger MLA	intern - Entwicklungsteam	GV	80%	1	3	8	24	
		Diebstahl-schutz	Zugkupplung, Modellbaukupplun	extern - andere Branche	GV	20%	4	3	2	24	

Abbildung 6.20: Risikobewertung auf Basis der Systemstruktur aus Abbildung 6.19 (Winter, 2018, S. 93)<sup>15</sup>.

Abbildung 6.21 zeigt den zeitlichen Rahmen der Entwicklungsstufen in der Fallstudie, sowohl in Bezug auf die Systemstruktur als auch in Bezug auf die verwendete Version des Ansatzes zur Bewertung der Variationen.

<sup>15</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

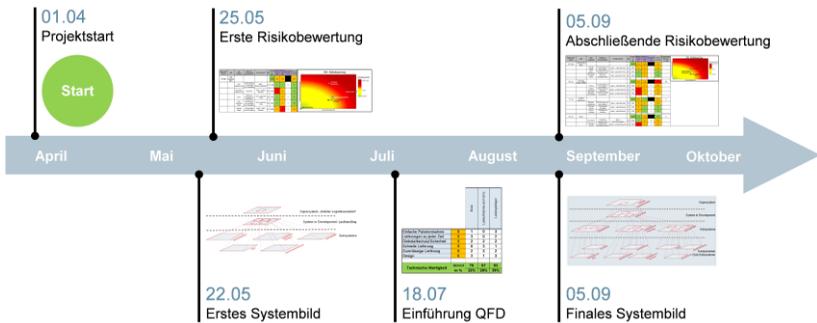


Abbildung 6.21: Wichtige Zeitpunkte in der untersuchten Fallstudie. Nicht alle Bewertungszeitpunkte sind dargestellt. Zu erkennen ist insbesondere der über den Projektverlauf zunehmende Detailgrad der Systemmodellierung und damit einhergehend der Struktur der Risikobewertung (Winter, 2018, S. 61)<sup>16</sup>.

Der zeitliche Verlauf der Gesamtrisiko-Bewertung über die Fallstudie hinweg ist ergänzend in Abbildung 6.22 dargestellt.

<sup>16</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

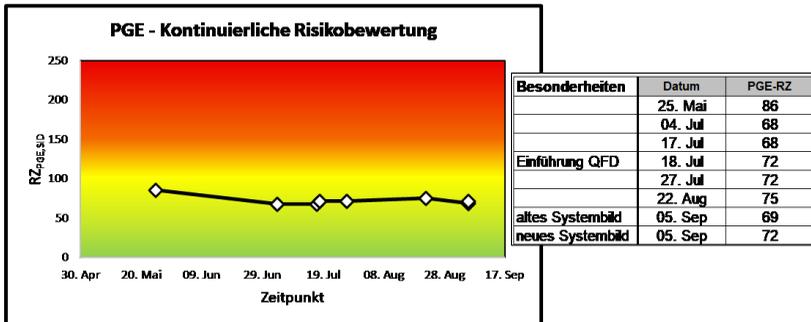


Abbildung 6.22: Zeitlicher Verlauf der Gesamtrisiko-Bewertung in der Fallstudie. Die Risikobewertung ändert sich bei zunehmendem Konkretisierungsgrad nur wenig. Hier spielt womöglich die Überlagerung zweier Effekte eine Rolle: Die Teilsysteme, die durch Gestalt- und Prinzipvariation entwickelt werden, werden zwar zunehmend feingranularer abegrenzt und damit „kleiner“, gleichzeitig nimmt ihre Anzahl zu. (Winter, 2018, S. 98)<sup>17</sup>

Es ist zu erkennen, dass sich der für das Gesamtsystem berechnete Wert kontinuierlich in einem kleinen Bereich des möglichen Spektrums bewegt. Die Ausdetaillierung der Systemstruktur sowie die Einführung der QFD machen sich kaum bemerkbar. (Winter, 2018, S. 93–98)

Auch ist denkbar, dass sich in dem beobachteten Verlauf der Risikobewertung die bereits in Abschnitt 5.3.2.1 zu den Einflussfaktoren bei der Identifikation von Variationsarten diskutierte Überlagerung zweier Phänomene zeigt: Einerseits führt eine detailliertere Systemkenntnis und -struktur womöglich dazu, dass sich die absolute Anzahl, beispielsweise an Prinzipvariationen, erhöht. Andererseits bezieht sich diese Variationszuweisung jeweils auf Teilsysteme, die einen kleineren Anteil des Gesamtsystems ausmachen. Der Anteil an – in diesem Beispiel – Prinzipvariation bleibt damit womöglich verhältnismäßig unverändert.

Weiter ist festzustellen, dass in der beschriebenen Fallstudie nicht explizit getrennt wurde zwischen einer retrospektiven Einschätzung von Variationsarten zum jeweiligen Zeitpunkt, d.h. Variationen, die durchgeführt wurden, und einer präskriptiven Einschätzung von Variationsarten, d.h. Variationen, die künftig beabsichtigt sind.

<sup>17</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Die Übergänge zwischen beidem sind in der Fallstudie vermutlich fließend, da Erhebungen parallel zu den eigentlichen Entwicklungsaktivitäten stattfanden und diese nicht explizit auf die Bewertungszeitpunkte hin synchronisiert, also beispielsweise für alle Teilsysteme zum gleichen Zeitpunkt unterbrochen wurden.

### **6.3.3 Diskussion und Zwischenfazit**

Die erste Evaluationsstudie hat gezeigt, dass mit dem entwickelten Ansatz auf Basis von Erkenntnissen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten die Anzahl identifizierter Risiken bei der Bewertung von Variationen potenziell erhöht werden kann. Die Visualisierung verdeutlicht Tendenzen. Das Risiko kann im Einzelnen von Variation zu Variation sehr unterschiedlich sein, selbst, wenn es sich in beiden Fällen um die gleiche Variationsart handelt (Albers, Rapp et al., 2017, S. 8). Weiterhin zeigt die Visualisierung, dass eine Übernahmevariation nicht per se risikoarm ist. Risikoursachen sind bei einer Übernahmevariation gegenüber Gestalt- und Prinzipvariationen nur tendenziell weniger in der technischen Neuheit des betreffenden Teilsystems zu suchen, sondern in der Verwendung eines bestehenden Teilsystems in einem neuen Kontext (Albers, Rapp, Spadinger & Marthaler, 2018).

Die Anwendung des Ansatzes zur Bewertung alternativer Konzepte in der Fallstudie legt nahe, für eine umfängliche Bewertung von Variationen auch die korrespondierenden Nutzendimensionen zu visualisieren. Es ist zwar davon auszugehen, dass diese im Groben durch das zu Grunde liegende Zielsystem in der Entwicklung gegeben werden und bei validierten Lösungsalternativen adressiert werden. Die Ausprägung im Detail kann jedoch variieren, wobei in der Bewertung das Verhältnis von Nutzen zu Risiken zum Tragen kommt.

Der Nutzen von Variationen an Teilsystemen kann sich dabei über mehrere Generationen hinweg manifestieren. Wird die Visualisierung des vorgestellten Ansatzes für mehrere Produktgenerationen genutzt, kann dies wie in Abbildung 6.23 zu sehen daran erkannt werden, dass Teilsysteme, die in einer Produktgeneration in höheren Risikobereichen verortet waren, in der darauffolgenden Produktgeneration mit einem deutlich geringeren Risiko behaftet als Ausgangspunkt für die Entwicklung zur Verfügung stehen (Albers, Rapp et al., 2017, S. 8).

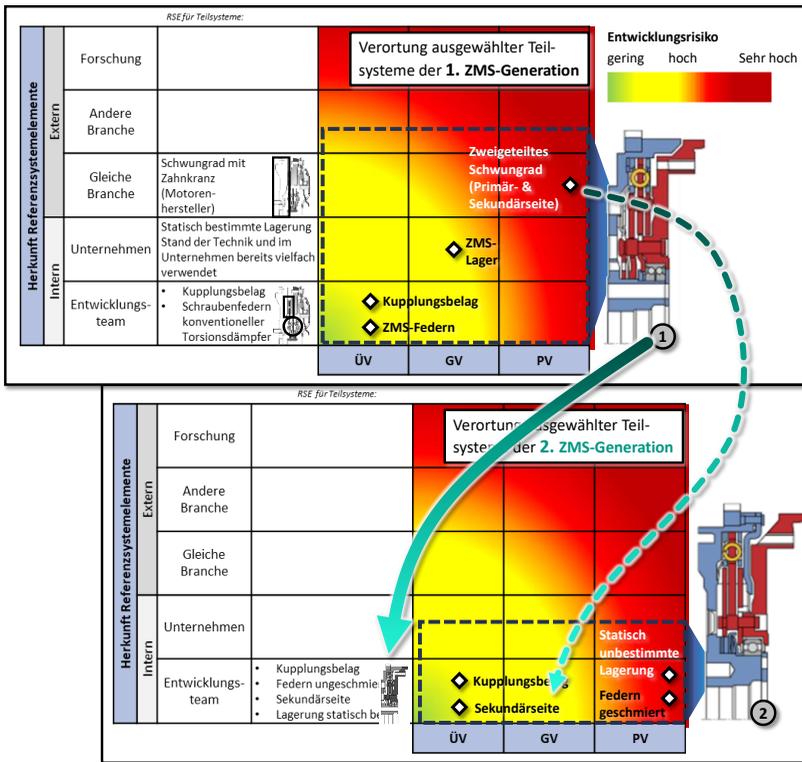


Abbildung 6.23: Teilsysteme, die in einer Produktgeneration, womöglich mit erhöhtem Risiko, entwickelt wurden, stehen in einer darauffolgenden Produktgeneration als Referenzelement zur Verfügung. Hier im Beispiel zu sehen an der Sekundärseite in der zweiten Produktgeneration, die Teil des zweigeteilten Schwungrads aus der ersten Produktgeneration ist (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7), modifiziert.

Hinsichtlich einer Quantifizierung des Entwicklungsrisikos hat die Anwendung in der Fallstudie erste Ansätze gezeigt. Sollen in Bezug auf das Entwicklungsrisiko Zielvorgaben für eine Entwicklung definiert werden, ist beispielsweise denkbar, mit Spannen zulässiger Bereiche zu arbeiten (Albers, Rapp, Spadinger & Marthaler,

2018). Werte für diese Spannen können beispielsweise durch empirische Erhebungen im Unternehmensumfeld definiert werden.

Wird das Entwicklungsrisiko mit Hilfe von Erkenntnissen aus anderen Entwicklungsprojekten, wie in der ersten Studie gezeigt, konkretisiert, kann dies gleichzeitig als Ansatzpunkt zur Identifikation passender Entwicklungsaktivitäten und -strategien dienen. Dabei kann es sich beispielsweise um Validierungsaktivitäten handeln, spezifische Management-Ansätze, insbesondere Prozessgestaltung mit Hilfe des ASD-Frameworks (s. Abschnitt 2.3.3) oder auch die Einleitung von Kooperationen zwischen Unternehmen, um benötigte Kompetenzen zusammenzuführen (für Letzteres s. z.B. auch Sahin et al., 2018).

Die Bewertung mit Hilfe des Ansatzes baut auf der Annahme auf, dass mindestens unternehmensintern Wissen über Referenzsystemelemente ausreichend zugänglich ist. Ist dies nicht der Fall, sollten entsprechende Aktivitäten zur Organisationsentwicklung angestoßen werden.

Die Fallstudie hat gezeigt, dass der entwickelte Ansatz zu mehreren Zeitpunkten im Entwicklungsprozess eingesetzt werden kann. Dabei ist eine Anwendung auch möglich, wenn die zu Grunde liegende Systemstruktur durch Entwicklungsaktivitäten konkretisiert wurde. In diesem Fall können für eine Ebene, auf der nur wenige Teilsysteme differenziert werden, Anteile unterschiedlicher Ausprägungen in den zwei aufgespannten Dimensionen berechnet werden, also Variationsanteile und Anteile, die das Referenzsystem in Bezug auf die Herkunft seiner Elemente charakterisieren.

Ausstehend ist eine dezidierte Untersuchung, welche Unterstützung allein die Visualisierung des vorgestellten Ansatzes bietet. Gerade bei der Verwendung mit wenigen Teilsystemen wird angenommen, dass damit, ähnlich wie beim SPALTEN-Ansatz (Abschnitt 2.3.1), unter Berücksichtigung der Grenzen menschlicher Informationsverarbeitung eine Unterstützung geleistet werden kann.

Die Fallstudie motiviert weiter, dass eine Differenzierung zwischen geplanten bzw. für einen kommenden Entwicklungsabschnitt zugelassenen Variationen und schlussendlich tatsächlichen durchgeführten Variationen zu differenzieren ist. Dies wird gestützt durch Beobachtungen einer weiteren Fallstudie im Live-Lab „Agile Innovation Lab“ am IPEK (Wessels et al., 2019).

Geplante oder zugelassene Variationen sind dabei ein wichtiger möglicher Ansatzpunkt für die Ableitung von Entwicklungsaktivitäten. Ist beispielsweise für ein Teilsystem eine Prinzipvariation zugelassen, können zugehörige Entwicklungsaktivitäten zum Beispiel auf die Suche nach potenziellen Referenzsystemelementen abzielen; im Falle einer Übernahmevariation kann die Validierung des bestehenden Teilsystems unter veränderten Randbedingungen im Fokus stehen. (Wessels et al., 2019, S. 208–209) Weitere Ansätze zur Ableitung von Entwicklungsaktivitäten bieten die Ergebnisse aus Abschnitt 5.1.

Auch in der Fallstudie in AIL zeigt sich, dass die Systemstruktur, auf deren Grundlage die zugelassenen Variationen abschnittsweise für den Entwicklungsprozess definiert werden, über den Prozess hinweg dynamisch ist. Abbildung 6.24 zeigt eine mögliche Erweiterung des im Vorigen vorgestellten Ansatzes, um diesen Aspekt auch in der Portfolio-Darstellung zu berücksichtigen.

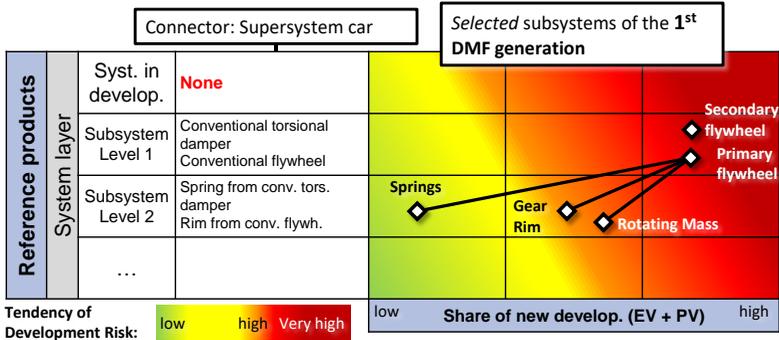


Abbildung 6.24: Mögliche Erweiterung des vorgestellten Ansatzes, um mehrere Systemebenen darzustellen (Albers, Rapp, Heitger et al., 2018, S. 472).

Der Umgang mit einer größeren Anzahl an Teilsystemen in der Chancen- und Risiken-Einschätzung, beispielsweise in Folge einer detaillierteren Teilsystemstruktur, wird im nächsten Abschnitt adressiert.

## 6.4 Übergreifenden Potenzial- und Risiko-Darstellung

Im Folgenden soll in Erweiterung des zuvor beschriebenen Ansatzes auch Innovationspotenzial als Zielgröße berücksichtigt werden. Weiterhin werden neben der organisatorischen Herkunft von Referenzelementen weitere relevante Charakteristika berücksichtigt. Weiterhin soll die Einschätzung von Chancen und Risiken auch bei einer größeren Anzahl an Teilsystemen möglich werden. Es soll ein geeigneter Weg zur geeigneten Darstellung der dadurch insgesamt größeren Datenmenge als Entscheidungsgrundlage vorgestellt werden. Dabei wird auch eine stärkere Integration mit bereits bestehenden Visualisierungsformen in der

Produktentstehung angestrebt. Mit der Entwicklung und Evaluation des Ansatzes werden die in Abbildung 6.25 gezeigten Forschungsfragen II.2 und II.3 in Bezug auf eine übergreifende Chancen- und Risikoeinschätzung beantwortet.

Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse und Erkenntnisse wurden im Rahmen einer durch den Autor co-betreuten studentischen Abschlussarbeit entwickelt (Pfaff, 2020)<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

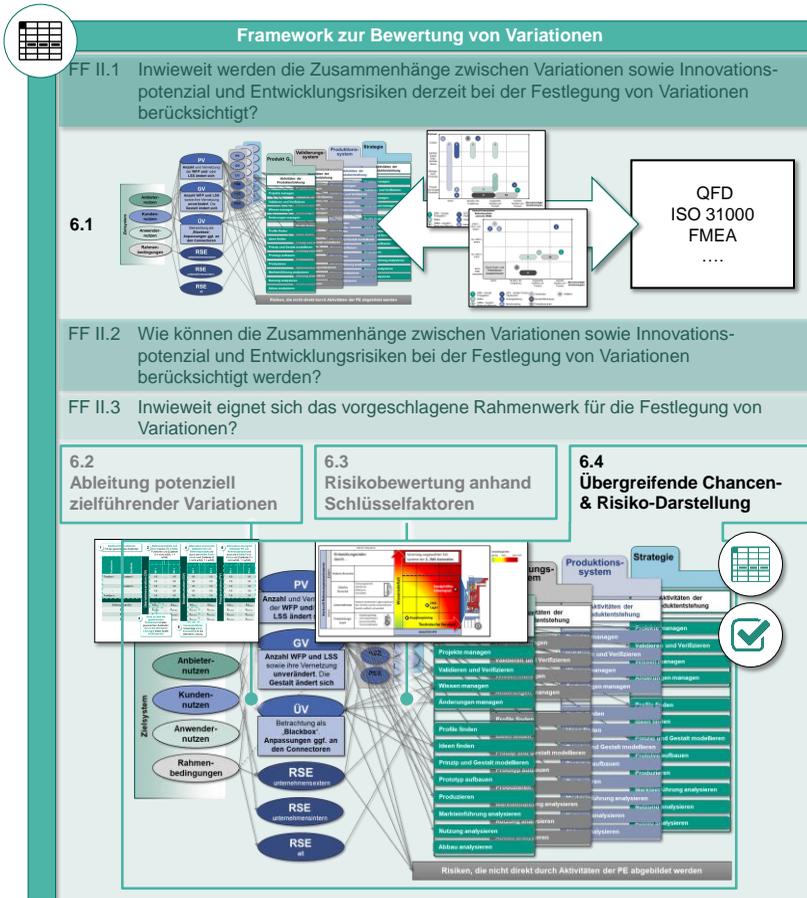


Abbildung 6.25: Der in diesem Abschnitt entwickelte Ansatz erlaubt durch die Integration von weiteren Referenzsystemcharakteristika als Einflussfaktoren und Innovationspotenzial als Zielgröße eine übergreifende Chancen- und Risiko-Darstellung und Einschätzung.

### 6.4.1 Vorgehen

Zunächst wurden durch eine Literaturrecherche weitere im Hinblick auf Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken relevante Charakteristika von Referenzsystemelementen identifiziert und deren tendenzieller Einfluss bewertet. Die gefundenen Zusammenhänge wurden anschließend in zwei Stufen visualisiert und die Visualisierungen jeweils evaluiert (Pfaff, 2020, S. 88–90):

- Die erste Visualisierung erfolgte papierbasiert und wurde im Format eines Live-Labs im Rahmen eines Workshops mit berufsbegleitend Studierenden eines HECTOR School-Programms<sup>19</sup> in Bezug auf Anwendbarkeit, Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit evaluiert.
- Die zweite Visualisierungsstufe wurde in einer Virtual Reality (VR)-Umgebung im IPEK-XR-Lab (Albers, Reinemann, Hirscher & Fahl, 2019) erstellt und in einem Expertengespräch initial evaluiert.

Als Grundlage für die VR-basierte Visualisierung wurde ein Datenmodell erstellt, mit dem die relevanten Zusammenhänge formal organisiert werden (Pfaff, 2020, S. 116).

### 6.4.2 Entwicklung des Ansatzes und Evaluation

Die identifizierten Referenzsystemcharakteristika sind, zusammen mit den Variationsarten, in Tabelle 40 aufgeführt. Dort ist auch der tendenzielle Zusammenhang zu Innovationspotenzial, Entwicklungsrisiken und -kosten zu sehen. Für die Herleitung dieser Zusammenhänge und deren Ausprägungen im Einzelnen wird auf (Pfaff, 2020, S. 100–107) verwiesen.

---

<sup>19</sup> Im Rahmen der Hector School of Engineering and Management des Karlsruher Instituts für Technologie können unter anderem verschiedene Master-Studiengänge berufsbegleitend absolviert werden (Brotzer (2020)). Studierende im Bereich Produktentwicklung entwickeln dort im Rahmen einer Projektarbeit und in Form eines Live-Labs neue Produktgenerationen eines Roboters (Pluto Project (2020)).

Tabelle 40: Charakteristika von Referenzelementen, Variationsarten und tendenzieller Zusammenhang mit Innovationspotenzial, Kosten und Risiko (Pfaff, 2020, S. 106)<sup>20</sup>.

sehr positiv	positiv	neutral	negativ	sehr negativ	
++	+	0	-	--	
Variationsart					
	ÜV	AV	PV		
Kosten	+	-	--		
Risiko	0	-	--		
Innovationspotential	0	+	++		
Aktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Validieren und Verifizieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vermehrt Prinzip und Gestalt modellieren</li> <li>Vermehrt Validieren und Verifizieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vermehrt Prinzip und Gestalt modellieren</li> <li>Vermehrt Validieren und Verifizieren</li> </ul>		
Herkunft des Referenzelementes					
	Intern		extern		
	Entwicklungsteam	Unternehmen	Gleiche Branche	Andere Branche	Forschung
Kosten	++	+	0	-	--
Risiko	++	+	0	-	--
Innovationspotential	0	0	0	+	+
Komplexität des Referenzelementes					
	Sehr Niedrig	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Kosten	++	+	0	-	--
Risiko	++	+	0	-	--
Reifegrad des Referenzelementes					
	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht	
Kosten	+	0	-	--	
Risiko	+	0	-	--	
Neuheitsgrad des Referenzelementes					
	niedrig	Mittel	hoch		
Innovationspotential	0	-	--		

<sup>20</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Für die erste Nutzung dieser Zusammenhänge im Rahmen des HECTOR-Workshops wurden die Zusammenhänge für jedes Referenzsystemelement-Charakteristikum wie in Abbildung 6.26 dargestellt visualisiert. Dabei wurden in Kurzform auch Begründungen für die Einflussstendenzen mit hinterlegt.

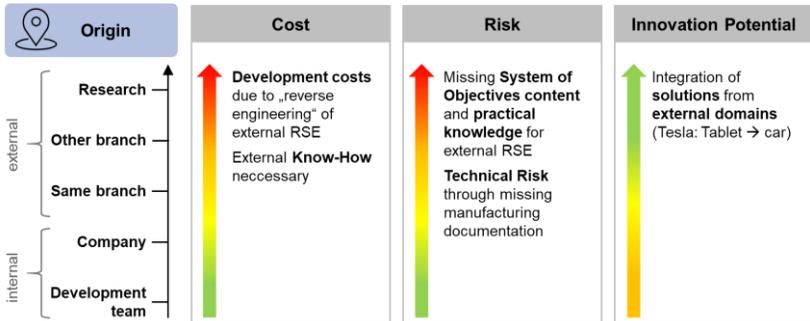


Abbildung 6.26: Beispiel für die Visualisierung der Zusammenhänge aus Tabelle 40 im Rahmen des Workshops mit HECTOR-Studierenden anhand des Referenzsystemelement-Charakteristikums organisatorische Herkunft (Pfaff, 2020, S. 110)<sup>21</sup>.

Um den Einfluss der gezeigten Informationen auf die Bewertung zu untersuchen, wurde die Chancen- und Risikobewertung für Lösungskonzepte der Studierenden in zwei Stufen durchgeführt (s. Abbildung 6.27).

<sup>21</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)



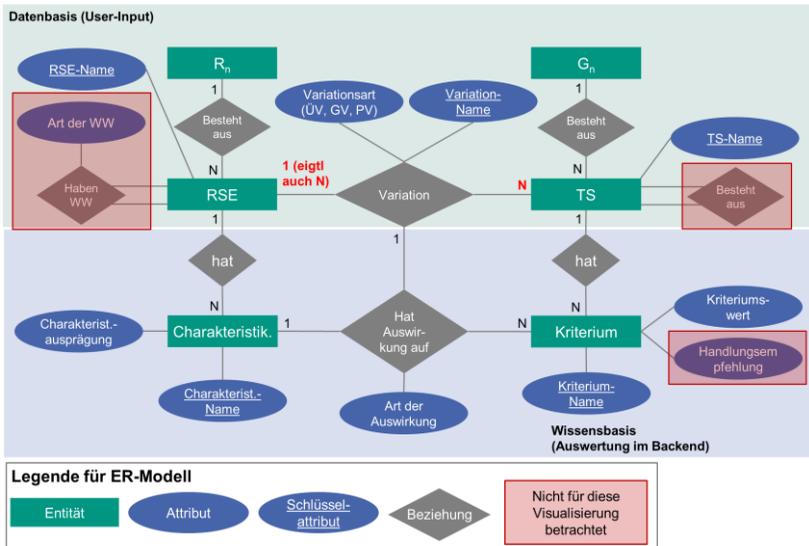


Abbildung 6.28: Datenmodell, das die Zusammenhänge zwischen Variationen von Teilsystemen (TS), Charakteristika von Referenzelementen (RSE) mit den „Kriterien“ Innovationspotenzial, Kosten und Risiken darstellt als Grundlage für eine VR-Implementierung. ( $G_n$ : Produktgeneration in der Entwicklung,  $R_n$ : Zugehöriges Referenzsystem) (Pfaff, 2020, S. 118)<sup>23</sup>, modifiziert.

Abbildung 6.29 zeigt die Benutzeroberfläche der VR-basierten Visualisierung.

<sup>23</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

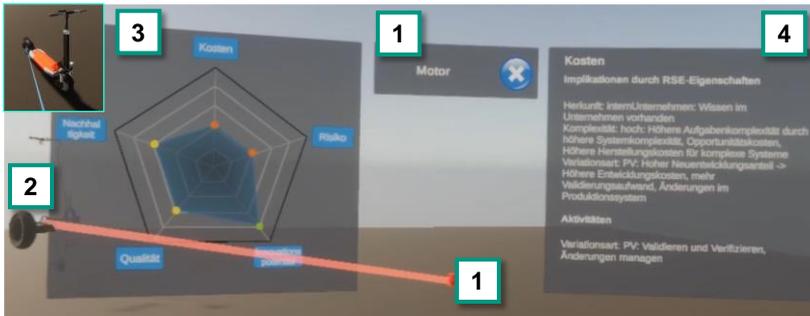


Abbildung 6.29: VR-basierte Visualisierung eines Teilsystems (1) einer neuen Roller-Produktgeneration und dem zugehörigen Referenzelement (2) (Gesamtsystemansicht hier oben links ebenfalls zu sehen, im Tool separate Ansicht). Die Bewertungsspinne (3) zeigt die Einordnung entlang verschiedener Zielkriterien auf Basis der geplanten Variationsart und Charakteristika des gewählten Referenzelements. Hintergrundinformationen zu den Einzelbewertungen, beispielsweise Begründungen oder auch Hinweise zu erwarteten Entwicklungsaktivitäten, werden bei Bedarf durch Auswahl der Bewertungspunkte gesondert eingeblendet (4) (Pfaff, 2020, S. 124)<sup>24</sup>, modifiziert.

Zu sehen ist für ein Teilsystem der neuen Produktgeneration (1) das zugehörige Referenzelement (2). Über die Farbe der Verbindungslinie kann die geplante Variationsart visualisiert werden. In der Bewertungsspinne (3) werden die Einordnungen des Teilsystems entlang verschiedener Teilkriterien der Potenzial- und Risiken-Einschätzung dargestellt. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Einordnungen werden bei Bedarf durch Auswahl eines Datenpunktes wie in (4) angezeigt. Diese Hintergrundinformationen können zum einen Begründungen für die Einordnung enthalten mit Bezug zu Charakteristika des gewählten Referenzelements. Weiter können beispielsweise auch Informationen über im nächsten Schritt erwartete oder potenziell zielführende Entwicklungsaktivitäten angegeben werden.

<sup>24</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

In der initialen Evaluation dieser zweiten Stufe des entwickelten Ansatzes im Rahmen eines Expertengesprächs wurde vor allem die dynamische Interaktionsmöglichkeit mit dem VR-Modell in Echtzeit hervorgehoben. Eine Herausforderung ist die Darstellung von Teilsystemen, deren Gestalt noch nicht hinreichend konkretisiert wurde. Hier kann für künftige Weiterentwicklungen überlegt werden, ob generischer gehaltene Designräume als Platzhalter vorgesehen und visualisiert werden können. (Pfaff, 2020, S. 127–128)

### **6.4.3 Diskussion und Zwischenfazit**

Mit dem gezeigten Ansatz konnte insgesamt eine bedarfsgerechte Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Variationen und Charakteristika von Referenzsystemelementen einerseits sowie den Zielgrößen Innovationspotenzial, Kosten und Risiken andererseits bereitgestellt werden. Dabei konnten mehrere relevante Charakteristika von Referenzsystemelementen integriert werden. Die jeweils bedarfsgerecht angepasste und auf Anforderung gezeigte Informationsdarstellung erlaubt die Handhabung größerer Datenmengen, beispielsweise auf Grund einer großen Anzahl an Teilsystemen. Als Grundlage für die VR-basierte Visualisierung wurden die beschriebenen Zusammenhänge in ein informationstechnisch verwendbares Datenmodell überführt.

In der Evaluation mit Studierenden des HECTOR-Workshops wurden Anwendbarkeit und Nützlichkeit positiv evaluiert. Letzteres ist für die VR-basierte Visualisierung noch ausstehend. Günstige Voraussetzungen hierfür bietet die positiv eingeschätzte Interaktionsmöglichkeit mit dem VR-Modell (Pfaff, 2020, S. 127). Es wird auch davon ausgegangen, dass dadurch die Benutzerfreundlichkeit gegenüber der ersten, papierbasierten Stufe des Ansatzes gesteigert werden konnte (Pfaff, 2020, S. 130). Ebenfalls eine günstige Voraussetzung für die Anwendung des Ansatzes ist die Verwendung von Daten und Darstellungsformen, die mit 3D-CAD-Systemen im realen Entwicklungsumfeld bereits gewohnt und mindestens teilweise vorhanden sind.

Eine weiterführende Integration des Ansatzes in bestehende Entwicklungsmethoden und -prozesse sowie die Wiederverwendung des hinterlegten Wissens müssen Gegenstand weiterführender Arbeiten sein. Dies betrifft auch die methodische Unterstützung der Entwicklungsaktivitäten, die in Abhängigkeit der geplanten Variationsart und von Charakteristika des gewählten Referenzsystemelements erwartet oder vorgeschlagen werden. Auf die variationsspezifische methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten wird daher im nächsten Kapitel näher eingegangen.



## 7 Methodische Unterstützung von Variationen

Entwicklungsmethoden dienen der Unterstützung des Entwicklers bei den Aktivitäten der Produktentstehung. Diese Aktivitäten stehen sowohl durch den Entwickler und seine Erfahrung als auch durch die zu Grunde liegenden Ergebnisse früherer Entwicklungsaktivitäten mit selbigen in Zusammenhang. Das Modell der PGE stellt diesen Zusammenhang explizit her.

Variationen auf Basis eines Referenzsystemelements bestehen aus Aktivitäten der Produktentstehung (s. Abschnitt 5.2.2.3). Eine bestimmte Aktivität der Produktentstehung kann, wie dort gezeigt, im Rahmen mehrerer Variationsarten auftreten. Weiterhin sind prinzipiell in Abhängigkeit der Variationsart sowie Charakteristika des zu Grunde liegenden Referenzsystemelements unterschiedliche Ausprägungen von Aktivitäten der Produktentstehung zu erwarten. Diese Einflussfaktoren sollten gegebenenfalls in Entwicklungsmethoden berücksichtigt werden und in Abhängigkeit davon Hilfestellung bei der Frage geben, welche Aktivität in welcher Weise auszuführen ist.

Unter anderem mit der Zielsetzung, beispielsweise in Abhängigkeit einer bestimmten „Art von Änderung“ bei der Entwicklung eines neuen Systems die richtigen Aktivitäten abzuleiten, wurden verschiedene Beschreibungsansätze entwickelt (s. Abschnitte 2.4 bis 2.6). Als Beispiel kann die Differenzierung verschiedener Innovationsarten nach HENDERSON UND CLARK (1990) genannt werden. Die in unter anderem Abschnitt 2.4 beschriebenen Schwächen dieser Ansätze im Hinblick auf die Beschreibung der Entwicklungspraxis stellen allerdings ein Hindernis bei der Entwicklung von Methoden dar, die der Entwicklungspraxis gerecht werden.

Es ist nicht auszuschließen, dass in der Forschung wiederholt beobachtete Defizite in der Anwendung von Entwicklungsmethoden (Albers, Reiß et al., 2015; Bavendiek, Inkermann & Vietor, 2014) teilweise auf diesen Umstand zurückzuführen sind. Forschungsbedarfe im Feld des Änderungsmanagements (Langer, Wilberg et al., 2012) unterstreichen ebenfalls die Notwendigkeit abgestimmter methodischer Unterstützung.

Das vorliegende Kapitel basiert davon ausgehend auf der dritten Forschungshypothese aus Abschnitt 3.3: Anhand der geplanten Variationen und Referenzen lassen sich Entwicklungsaktivitäten gezielt planen und methodisch unterstützen.

Darauf aufbauend wurden in Abschnitt 3.4 die Forschungsfragen in Abbildung 7.1 formuliert. Die Untersuchung dieser Forschungsfragen ergibt je nach Betrachtungsrahmen eigenständige Forschungsvorhaben. Im vorliegenden Kapitel werden ausgewählte Beispiele entwicklungsmethodischer Unterstützung vorgestellt, in denen

die Abstimmung auf die Einflussfaktoren „Variationsart“ und „Charakteristika des zu Grunde liegenden Referenzsystemelements“ als Teilaspekt untersucht wurde. Die Beispiele entstammen auf Grund des guten Zugangs aus den Forschungen am IPEK. Abbildung 7.1 zeigt die betrachteten Fallbeispiele im Überblick.

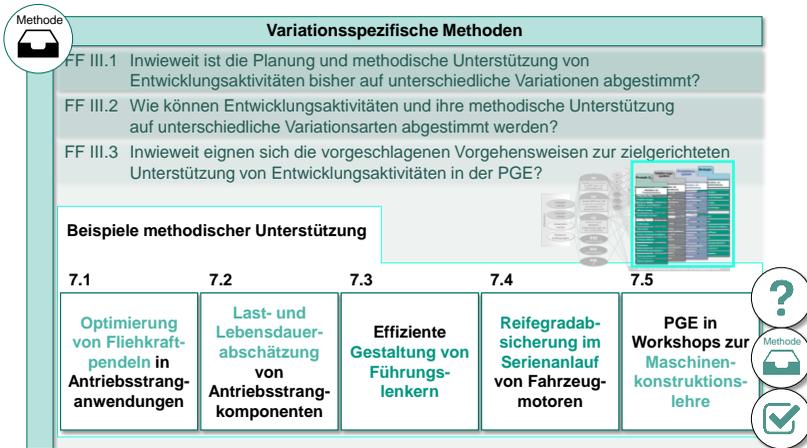


Abbildung 7.1: In diesem Kapitel wird die variationspezifische methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten an fünf Fallbeispielen untersucht. Die Untersuchungen in jedem Fallbeispiel werden durch die Forschungsfragen III.1-III.3 geleitet.

Für die Entwicklung der Ansätze zur methodischen Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten in den Fallbeispielen werden Ergebnisse und Erkenntnisse aus Kapitel 5 und 6 genutzt. Dadurch werden diese Ergebnisse und Erkenntnisse im vorliegenden Kapitel auch validiert.

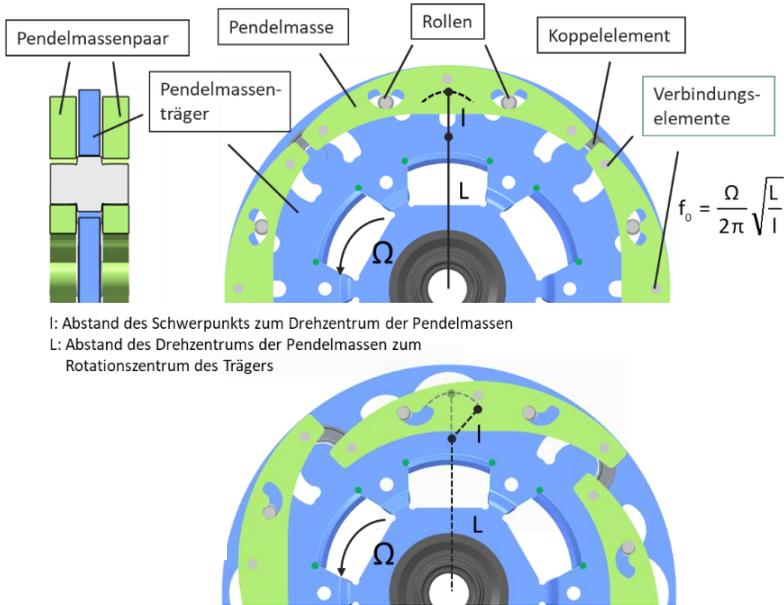
Für jedes Fallbeispiel wird im Folgenden zunächst der Zweck der betrachteten methodischen Unterstützung erläutert. Anschließend wird gezeigt, inwieweit und wie die Methode auf die Einflussfaktoren „Variationsart“ und „Charakteristika des zu Grunde liegenden Referenzsystemelements“ abgestimmt wurde. Schließlich folgt für jedes betrachtete Beispiel ein Zwischenfazit.

## **7.1 Fallbeispiel: Ableitung von Variationen zur Optimierung von Fliehkraftpendeln**

Im Folgenden wird anhand der Optimierung von Fliehkraftpendeln (FKP) nach SCHOTTMÜLLER, RAPP, BAUSE UND ALBERS (2019) gezeigt, wie die Beschreibung möglicher Lösungsrichtungen durch die Variationsarten auch als Ansatzpunkt zur Abschätzung erforderlicher Entwicklungsaktivitäten dienen kann. Diese Erkenntnisse wurden zusammen mit den Ausführungen zur Optimierung von FKP mit SCHOTTMÜLLER ET AL. (2019) unter Mitarbeit des Autors der vorliegenden Arbeit veröffentlicht. Dort finden sich auch weiterführende Erläuterungen und Literatur zu FKP in Antriebssträngen.

### **7.1.1 Optimierung von Fliehkraftpendeln in Antriebsstranganwendungen**

Fliehkraftpendel (FKP) sind Pendel, die an drehenden Maschinenelementen befestigt werden, sodass die Pendelebene orthogonal zur Rotationsachse des Maschinenelements ist. Drehungen des Maschinenelements mit Drehzahlschwankungen führen zu Pendelauslenkungen durch Fliehkraftschwankungen und Rückstellkräften am Maschinenelement selbst. Dieser Mechanismus kann zur Schwingungstilgung genutzt werden, wobei Fliehkraftpendel auf Grund der Drehzahlabhängigkeit der Fliehkraft drehzahladaptive Schwingungstilger sind (Schottmüller et al., 2019, S. 4). „Das FKP als Schwingungstilger in Kombination mit einem Federdämpfersystem bietet die Lösung für eine signifikante Steigerung der Schwingungsreduzierung. Seit einigen Jahren sind solche Systeme ein fester Bestandteil im Antriebsstrang von Kfz mit hohen NVH-Ansprüchen und werden stets weiterentwickelt“ (Schottmüller et al., 2019, S. 4). Abbildung 7.2 zeigt als Beispiel die erste Produktgeneration des FKP der Firma Schaeffler.



$l$ : Abstand des Schwerpunkts zum Drehzentrum der Pendelmassen  
 $L$ : Abstand des Drehzentrums der Pendelmassen zum Rotationszentrum des Trägers

Abbildung 7.2: 1. Produktgeneration des Fliehkraftpendels der Fa. Schaeffler (Schottmüller et al., 2019, S. 4), modifiziert.

SCHOTTMÜLLER ET AL. untersuchen, welche Variationen für die Entwicklung künftiger FKP-Produktgenerationen zur Optimierung der Schwingungstilgung möglich sind und ersetzt so frühere, vorwiegend heuristische Herangehensweisen (Schottmüller et al., 2019, S. 5).

Zu diesem Zweck werden zwei FKP-Produktgenerationen retrospektiv untersucht. Durchgeführte Variationen werden mittels einer C&C<sup>2</sup>-A-Modellierung und den C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren aus Abschnitt 5.2.2.1 identifiziert und die zugehörigen Auswirkungen auf das Schwingungsisolationsverhalten analysiert. (Schottmüller et al., 2019, S. 5)

Ergebnis sind zwei voneinander zu unterscheidende Lösungsrichtungen (Schottmüller et al., 2019, S. 9), unter Verwendung der Teilsystembezeichnungen aus Abbildung 7.2:

- Übernahmevariation der Bahnen für die Rollen und Gestalt- oder Prinzipvariation anderer Teilsysteme. Dadurch bleiben die Bewegungsgleichungen für das FKP in ihrer Struktur unverändert. Der Fokus bei der Optimierung der Schwingungsisolation liegt auf einer Erhöhung von Energiespeicherkapazität in Form der Fliehkraft bzw. Massenträgheitsmoment.
- Gestaltvariation der Bahnen für die Rollen, wodurch das Schwingungsverhalten optimiert werden kann, was sich auch in Veränderungen in den Bewegungsgleichungen niederschlägt.

Ausgehend von diesen beiden möglichen Lösungsrichtungen wurde weiter untersucht, inwieweit bei den verschiedenen Variationsarten bereits Aussagen zu Implementierungsaufwänden und notwendigen anschließenden Entwicklungsaktivitäten getroffen werden können.

### 7.1.2 Erwartungen zu Entwicklungsaufwänden zur Optimierung von Fliehkraftpendeln in Antriebssträngen auf Basis von Variationsarten

Den beiden möglichen Variationen zur Entwicklung neuer FKP-Produktgenerationen konnten die folgenden Erwartungen zu Entwicklungsaktivitäten zugeordnet werden (Schottmüller et al., 2019, S. 9):

Tabelle 41: Erwartungen zu Entwicklungsaufwänden bei der Entwicklung einer neuen FKP-Produktgeneration je nach Variationsart (Schottmüller et al., 2019, S. 9).

Mögliche Variation für die Entwicklung einer neuen FKP-Produktgeneration	Erwartungen zu Entwicklungsaktivitäten (Schottmüller et al., 2019, S. 9)
Übernahmevariation der Bahnen für die Rollen	Simulationsmodelle und Validierungswerkzeuge können vom Referenzsystemelement Größtenteils übernommen werden
Gestaltvariation der Bahnen für die Rollen	Mathematische Modellierung wird erforderlich durch Änderungen in den Bewegungsgleichungen. Außerdem Herausforderungen in der Produktionssystementwicklung, da schon geringe Schwankungen in der Bahngeometrie deutliche Auswirkungen auf das dynamische Verhalten haben können.

### 7.1.3 Diskussion und Zwischenfazit

Schottmüller et al. (2019) gelingt es mit Hilfe der Variationsarten den Lösungsraum für die Optimierung von Fliehkraftpendeln in Antriebssträngen strukturiert zu beschreiben. Auf Basis der unterschiedlichen in Frage kommenden Variationen können früh erste Hinweise auf erwartete Implementierungsaufwände gegeben werden, auch wenn Details dieser Aufwände über die beschriebenen Dimensionen hinaus nicht unmittelbar feststehen. Diese Zuordnungen stellen eine spezifische Ausprägung von Entwicklungsaktivitäten zur Realisierung von Variationen dar, wie in Abschnitt 5.2.2.3 dargestellt. Die beschriebenen Zusammenhänge sind dabei für den Produktbereich „Fliehkraftpendel“ produktgenerationsübergreifend gültig. Entwickelnde können so bei der Bewertung und Auswahl unterschiedlicher alternativer Lösungen für Variationen zur Optimierung von FKP sowie der Einleitung notwendiger Implementierungsaktivitäten frühzeitig unterstützt werden.

Die Erkenntnisse im vorigen Abschnitt gelten dabei zunächst nur für Variationen auf Basis eines unternehmensinternen Referenzsystemelements. Andernfalls kann nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass beispielsweise Simulationsmodelle und Produktionssystem für das Referenzsystemelement von Anfang an im Unternehmen vorhanden sind. Entsprechend ist bei der Verwendung von unternehmensexternen Referenzsystemelementen mit erhöhtem Entwicklungsaufwand zu rechnen. Dieser Zusammenhang wird durch das in Kapitel 5 entwickelte Modell zu treffend beschrieben.

Für Variationen auf Basis eines internen Referenzsystemelements zeigen die gegebenen Hinweise zu möglichen Implementierungsaufwänden ebenfalls, unter welchen Bedingungen Aufwände für die Erstellung von Systemmodellen durch eine produktgenerationsübergreifende Nutzung tatsächlich relativiert werden können. Auf diesen Umstand beim Aufbau von Systemmodellen weisen auch bereits ALBERS UND GLADYSZ ET AL. (2016) bei Modellen zur integrierten Darstellung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen und Validierungsergebnissen bei trocken laufenden Kupplungssystemen sowie ALBERS UND MOESER (2016) bei durchgängigen Modellen von Zielsysteminhalten bis hin zur Teilsystemgestalt im Sinne des Model Based System Engineering hin.

## **7.2 Fallbeispiel: Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten**

Der vorliegende Abschnitt betrachtet als Fallbeispiel eine Methode zur Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten auf der Basis von Referenzsystemelementen. Die Methode selbst ist in FISCHER UND ALBERS (2018) dargestellt und wird in FISCHER, RAPP, BAUSE UND ALBERS (2019) für Hybridantriebsstränge erweitert. Im Zuge dessen wurden auch sich daraus ergebende Lösungsrichtungen für die Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten als Variationen unter Mitarbeit des Autors der vorliegenden Arbeit näher untersucht (Fischer et al., 2019). Diese Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt und eingeordnet.

### **7.2.1 Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten in der Frühen Phase der PGE**

Ziel von FISCHER UND ALBERS ist ein Ansatz zur Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten zu einem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, zu dem die Gestalt der Antriebsstrangkomponenten oder auch die Triebstrangkongfiguration noch nicht vollständig spezifiziert sind und auf Grund fehlender Simulationsmodelle oder physischer Entwicklungsgenerationen auch keine genauen Lastkollektive ermittelt werden können (Fischer & Albers, 2018, S. 1).

Lösungsansatz zur Realisierung dieses Ziels ist dabei der Vergleich der zu entwickelnden Antriebsstrang-Produktgeneration mit vorhandenen Referenzsystemelementen. Für diesen Vergleich wurde eine Normgröße entwickelt, die einerseits für eine Antriebsstrang-Produktgeneration schon auf Basis früh vorliegender Informationen ermittelt und andererseits mit der Belastung der Antriebsstrangkomponenten in Zusammenhang gebracht werden kann. Abbildung 7.3 zeigt diesen Zusammenhang. (Fischer & Albers, 2018, S. 3–11)

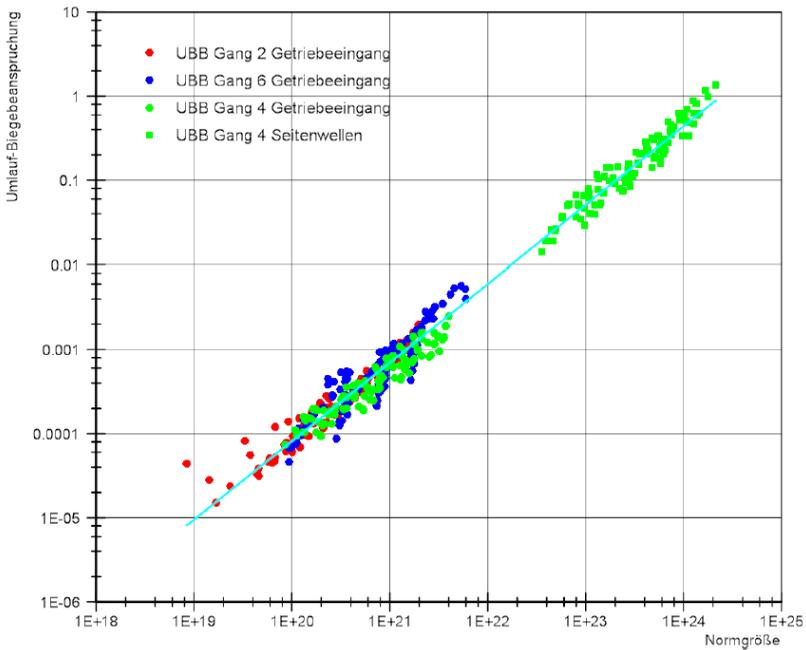


Abbildung 7.3: Zusammenhang zwischen Normgröße zur Charakterisierung eines Antriebsstrangs auf Basis von Informationen, die bereits früh vorliegen, und erwarteter Beanspruchung, hier Umlauf-Biegebeanspruchung. Mit Hilfe dieses Zusammenhangs können früh Lasten für neue Antriebsstrang-Produktgenerationen abgeschätzt werden. (Fischer & Albers, 2018, S. 7).

In FISCHER ET AL. (2019) wird der entwickelte Ansatz zur Berechnung der Normgröße für Hybridantriebsstränge erweitert. Darüber hinaus wird gezeigt, welche Lösungsrichtungen sich für die Entwicklung der neuen Antriebsstrang-Produktgeneration ergeben, wenn die abgeschätzte Belastung mit Einsatzbereichen bereits vorhandener Triebstränge und deren Komponenten abgeglichen wird (Fischer et al., 2019, S. 8–9). Davon ausgehend stellt sich die Frage, inwieweit und wie für ver-

schiedene mögliche Lösungsrichtungen auf Basis der Ergebnisse der Belastungsabschätzung Hinweise für weitere Entwicklungsaktivitäten abgeleitet werden können.

## 7.2.2 Ansätze zur Entwicklungsplanung auf Basis der Einordnung alternativer Lösungen als Variationen

Abbildung 7.4 zeigt ähnlich zu Abbildung 7.3 den Zusammenhang zwischen Normgröße und erwarteter Belastung. Zusätzlich sind entlang der Belastungsdimension exemplarisch Einsatzbereiche dreier bereits vorhandener Antriebsstrangkomponenten aufgetragen.

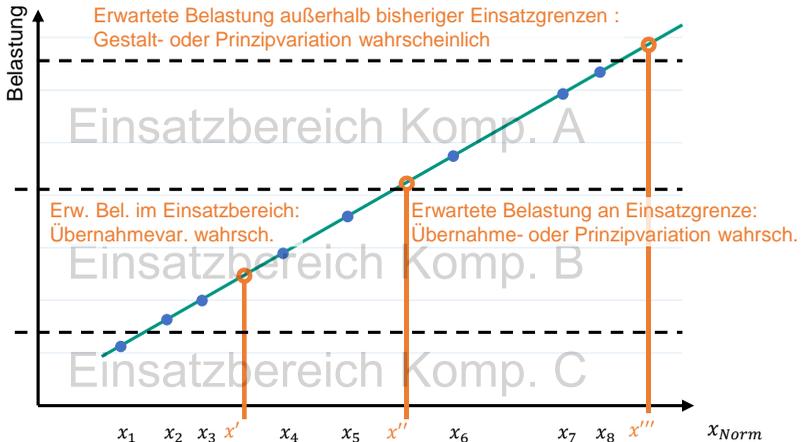


Abbildung 7.4: Zusammenhang zwischen Normgröße und Belastung, hinterlegt mit Einsatzbereichen dreier bereits vorhandener Antriebsstrang-Komponenten (A, B, C). In Orange eingetragen drei unterschiedliche mögliche Ergebnisse der Lastabschätzung für eine neue Produktgeneration und Einordnung der sich daraus ergebenden Lösungsrichtungen als Variationen. (Fischer et al., 2019, S. 9), übersetzt.

In Orange dargestellt sind verschiedene mögliche Ergebnisse, die auf die unterschiedlichen in Tabelle 42 aufgeführten Lösungsrichtungen führen. Diese Lösungsrichtungen können als Variationen eingeordnet werden und so Hinweise im Hinblick auf weitere Entwicklungsaktivitäten gegeben werden. (Fischer et al., 2019, S. 8–9)

Tabelle 42: Mögliche Lösungsrichtungen für die Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten, ausgehend von den Ergebnissen der Lastabschätzung und Gegenüberstellung mit Einsatzbereichen verfügbarer Referenzsystemelemente, sowie Einordnung der Lösungsrichtungen und Implikationen für weitere Entwicklungsaktivitäten (Fischer et al., 2019, S. 8–9).

<b>Betrachteter Fall aus Abbildung 7.4</b>	<b>Potenziell zielführende Lösungsrichtung(en) für die neue Produkt-generation</b>	<b>Einordnung und Implikationen für weitere Entwicklungstätigkeiten</b>
$x'$ : Erwartete Last im Einsatzbereich von Komponente B	Verwende Komponente B	Übernahmevariation. Verhältnismäßig geringes Risiko erwartet. Eventuell Modellieren von Prinzip und Gestalt an den Schnittstellen zur Systemintegration
$x''$ : Erwartete Last über den Einsatzbereichen der Komponenten A, B und C	Entwicklung einer neuen Komponente auf Basis der vorhandenen Komponenten.	Gestalt- oder Prinzipvariation. Weiteres muss aus einer eingehenderen Analyse erfolgen. Es ist tendenziell mit einem im Vergleich zu Fall $x'$ erhöhten Entwicklungsrisiko zu rechnen.
$x'''$ : Erwartete Last an der Grenze der Einsatzbereiche von Komponente A und B	(1) Verwendung von Antriebsstrang A oder (2) Verwendung von Antriebsstrang B oder (3) Verwendung von Antriebsstrang B mit Teilsystem aus Antriebsstrang A oder (4) umgekehrt	(1) und (2) eher ÜV, letztere womöglich mit größerem Risiko behaftet, da die Randbedingungen in der neuen Produktgeneration an der oberen Grenze des bisherigen Einsatzbereichs liegen. Insbesondere für diesen Fall ist mit entsprechenden Validierungsaktivitäten zu rechnen. (3) und (4) zunächst eher Übernahme von Teilsystemen, allerdings aus unterschiedlichen bisherigen Systemen, sodass auf Ebene des Antriebsstrang-Systems neue Schnittstellen entstehen (kann evtl. als Prinzipvariation

		eingeordnet werden). Hier kann im nächsten Schritt eine genauere Analyse zielführend sein, im Rahmen derer auch abgeklärt wird, ob die Annahme von Übernahmevariationen haltbar ist.
--	--	--

Die in der Tabelle beschriebenen Konstellationen, insbesondere Fall (3) und (4) bei  $x''$ , können nicht nur dazu dienen, potenzielle Lösungsrichtungen für die Entwicklung einzelner Triebstrangkomponenten abzuleiten. Es ist auch möglich, die zu verwendende Komponente, beispielsweise aus Kostengründen, vorzugeben und mit Hilfe des beschriebenen Ansatzes Implikationen für die Konfiguration des Antriebsstranges abzuleiten, in den die Komponente integriert werden soll. Diese ist dann so zu spezifizieren, dass die erwartete Last von der zu verwendenden Komponente über die gewünschte Lebensdauer ertragen werden kann.

### 7.2.3 Diskussion und Zwischenfazit

Der Ansatz nach FISCHER UND ALBERS (2018), FISCHER ET AL. (2019) zeigt, wie die Entwicklung einer neuen Produktgeneration durch die systematische Verwendung von verfügbaren Referenzsystemelementen unterstützt werden kann. Er zeigt auch, welche Bedeutung die Menge der zur Verfügung stehenden potenziellen Referenzsystemelemente hat. Das Vorgehen setzt zunächst die Verwendung von Referenzsystemelementen voraus, bei denen die entsprechenden Informationen zu Lastkollektiv, Gestaltspezifikation und daraus resultierender Lebensdauer vorhanden sind. Davon kann bei der Verwendung unternehmensinterner Referenzsystemelemente prinzipiell ausgegangen werden. Bei der Verwendung unternehmensexterner Referenzsystemelemente würden, wie im Modell aus Kapitel 5 abgebildet, entsprechende Analyseaufwände zur Generierung dieser Daten anfallen, falls solche Referenzsystemelemente als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration dienen sollen.

Die Beschreibung möglicher alternativer Lösungen als Variationen kann Hinweise geben zu dem damit assoziierten Entwicklungsrisiko sowie Aktivitäten, die in der anschließenden Entwicklung notwendig sind. Diese Hinweise können unter anderem der Literatur, aber auch – falls vorhanden und entsprechend aufbereitet – Erfahrungen aus vorangehenden Antriebsstrangentwicklungen entnommen werden. In diesem Vorgehen kommen ebenfalls die Zusammenhänge des Modells aus Kapitel 5 über die Auswirkungen von Variationen zum Tragen, wobei der betrachtete Produktbereich in diesem Fall Fahrzeugantriebsstränge umfasst. Für eine Risikoeinschätzung können beispielsweise die Ansätze aus den Abschnitten 6.2 und 6.3 zur

initialen Risikoeinschätzung auf Basis von Variationsanteilen bzw. auch unter Berücksichtigung von Referenzsystemelement-Charakteristika verwendet werden.

## **7.3 Fallbeispiel: Effiziente Gestaltung von Führungslenkern**

In diesem Abschnitt wird als Fallbeispiel die Gestaltung von Führungslenkern für Radführungen bei Fahrzeugen durch einen Automobil-Zulieferer untersucht. Die Gestaltung dieser Bauteile ist zum einen dadurch gekennzeichnet, dass für verschiedene Automobil-OEM Teile gestaltet werden, die in ihren Anforderungsdimensionen vergleichbar sind. Zum anderen führen jedoch teils enge geometrische Randbedingungen zu einer Vielzahl an Gestaltvarianten und mitunter vielen Iterationen im Gestaltungsprozess. Dadurch besteht die Gefahr, Gestaltentwürfe für Bauteile nicht zeit- oder anforderungsgerecht erstellen zu können. Verbesserungspotenzial liegt hier in der systematischen Nutzung bereits früher gestalteter Bauteile als potenzielle Referenzsystemelemente. Im Folgenden werden Ergebnisse einer Untersuchung dieses Potenzials und darauf basierende Verbesserungsansätze für einen effizienteren Gestaltungsprozess der Führungslenkern dargestellt. Die Untersuchung wurde im Rahmen einer durch den Autor der vorliegenden Arbeit co-betreuten studentischen Abschlussarbeit in Kooperation mit einem Automobilzulieferer durchgeführt (Rouby, 2020)<sup>1</sup>.

### **7.3.1 Gestaltungsprozess von Führungslenkern bei einem Automobil-Zulieferer**

Abbildung 7.5 zeigt beispielhaft eine moderne Fahrzeugachse mit typischem Einbaort eines Führungslenkers wie in der untersuchten Fallstudie.

---

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

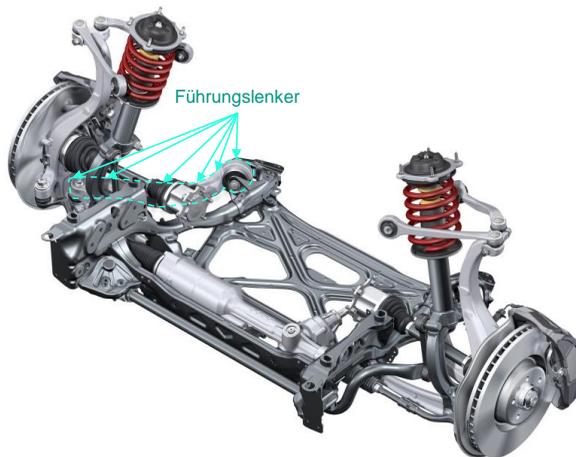


Abbildung 7.5: Beispiel einer modernen Fahrzeugachse mit Einbauort eines Führungslenkers (teilweise verdeckt) vergleichbar zur betrachteten Fallstudie (Darstellung Audi AG, 2020, modifiziert)

Als Zielgrößen für die Gestaltung des Bauteils erhält der Automobilzulieferer vom OEM in der Regel Informationen über eine erforderliche Mindest-Biegesteifigkeit, eine erforderliche Festigkeit, ein Zielgewicht und die Geometrie des möglichen Designraums. (Rouby, 2020)

Zur Festlegung einer initialen Gestalt des Bauteils greifen die Konstruierenden auf bereits früher gestaltete und rechnerisch untersuchte Bauteile zurück, wobei diesem Vorgehen keine explizierte Systematik zu Grunde liegt, sondern vielmehr die Erfahrung der Konstruierenden. Prinzipiell vorhandene unternehmensinterne Referenzelemente werden also vorwiegend implizit identifiziert und allenfalls explizit in Bezug auf die Modifikation bestehender Modelle genutzt. (Rouby, 2020)

Der weitere Gestaltungsprozess besteht aus Iterationen, in denen im Wechsel Gestaltentwürfe rechnerisch auf die Erfüllung der angestrebten Ziele untersucht und bei Bedarf weiter angepasst werden. Abbildung 7.6 zeigt diesen Prozess.

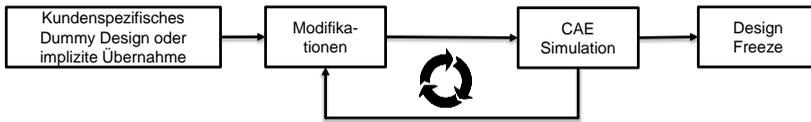


Abbildung 7.6: Ausgangssituation beim Vorgehen zur Gestaltung von Führungslenkern in der Fallstudie (Rouby, 2020, S. 2)<sup>2</sup>, übersetzt.

Die Anzahl notwendiger Iterationen kann dabei sehr hoch ausfallen. Für die iterative Anpassung der Bauteilgestalt gibt es in der Ausgangssituation keine explizite Systematik.

Ziel der Untersuchung, deren Ergebnisse im nächsten Abschnitt dargestellt werden, war es, die Effizienz dieses Vorgehens durch die systematische und explizite Verwendung von Referenzsystemelementen zu erhöhen.

### 7.3.2 Effiziente Gestaltung von Führungslenkern durch systematische Nutzung von Referenzsystemelementen

In Abbildung 7.7 sind drei in der Untersuchung verfolgte Ansatzpunkte zur effizienteren Gestaltung von Führungslenkern dargestellt.

---

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

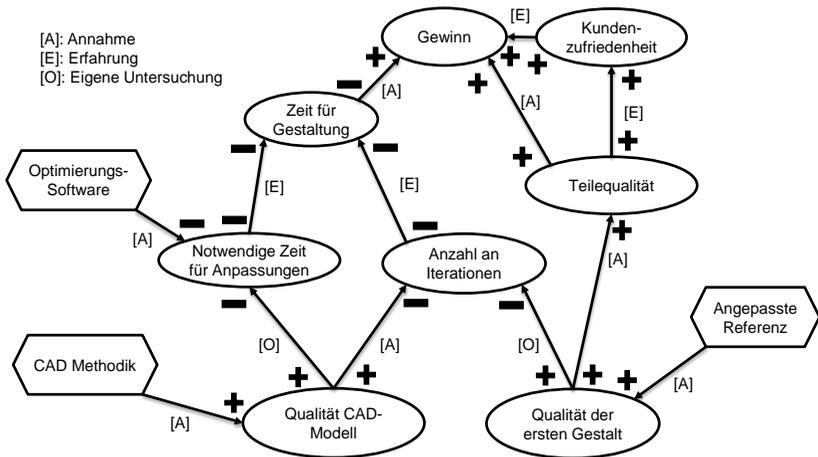


Abbildung 7.7: Ansätze zur Effizienzsteigerung bei der Gestaltung von Führungslenkern (Rouby, 2020, S. 33)<sup>3</sup>, modifiziert.

Zunächst wird die systematische Identifikation von potenziellen Referenzsystemelementen zu Beginn der Gestaltung eines neuen Bauteils betrachtet. Um einen Überblick über bereits vorhandene Bauteile zu gewinnen und diese in relevanten Dimensionen miteinander vergleichen zu können, wurde eine Portfolio-Analyse durchgeführt. Die dafür von den jeweiligen Bauteilen erfassten Informationen sind in Abbildung 7.8 dargestellt.

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

DATAIFLTA	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	4-1
CAD-Modell								
Steifigkeit (kN/mm)	19.66	21.06	21.53	17.78	19.50	28.86	31.98	7.96
Minimale Knickkraft (kN)	62.40	62.40	25.27	54.60	54.60	54.60	23.71	78.00
Zugfestigkeit (kN)	33.54	33.54	33.70	29.64	27.30	24.96	30.11	X

Abbildung 7.8: Informationen zu vorhandenen Bauteilen, die in der Portfolio-Analyse erfasst wurden als Grundlage, um künftig potenzielle Referenzsystemelemente systematisch identifizieren zu können. Werte auf Grund von Vertraulichkeit gegenüber Originalwerkten skaliert. (Rouby, 2020, S. 46)<sup>4</sup>, übersetzt.

Mit Hilfe der gesammelten Informationen können bereits bei Vorliegen der ersten Spezifikationen durch den Kunden potenzielle Referenzsystemelemente identifiziert werden, indem geprüft wird, ob schon bestehende Bauteile ähnliche Anforderungen erfüllen. Diese sind als mögliche erste Gestaltentwürfe für die neue Kundenanfrage zu prüfen. Die Verortung von initial 7 in der Portfolio-Analyse erfassten Bauteilen im Spezifikationsraum ist beispielhaft in Abbildung 7.9 dargestellt.

<sup>4</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

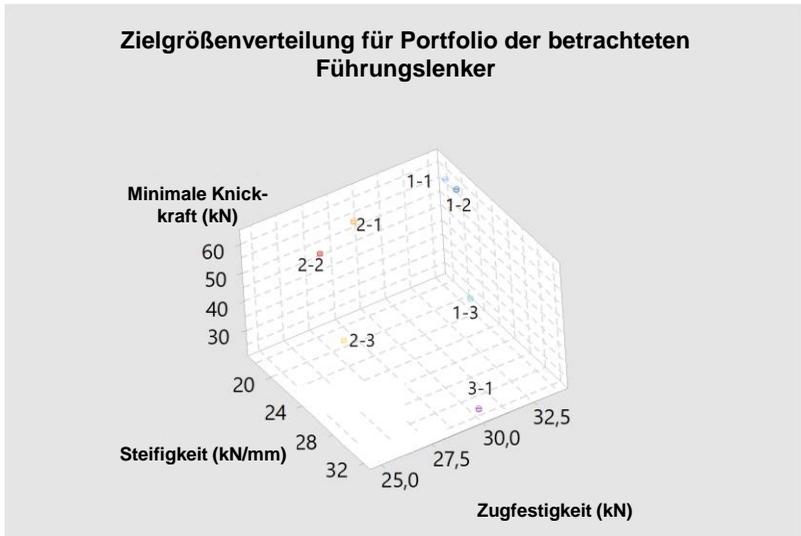


Abbildung 7.9: Verortung der initial für die Portfolio-Analyse untersuchten Bauteile im Raum, der durch die typischen Anforderungsdimensionen für Führungslenker aufgespannt wird. Wird eine neue Kundenanfrage in diesem Raum eingeordnet, kommen in der Nähe befindliche Bauteile als potenzielle Referenzsystemelemente in Frage. Werte auf Grund von Vertraulichkeit gegenüber Originalwerten skaliert. (Rouby, 2020, S. 47)<sup>5</sup>

Weiterhin wurden im Rahmen der Analyse auch Informationen zur Bauteilgeometrie erfasst. Dadurch wird es einerseits beispielsweise möglich, bei einer neuen Kundenanfrage früh anhand bestehender Bauteile zu überprüfen, ob die geforderten Festigkeits- und Steifigkeitsspezifikationen bei den gegebenen geometrischen Einschränkungen voraussichtlich machbar sind.

Werden die Geometrien bestehender Bauteile anhand einheitlicher Parameter erfasst, ist darüber hinaus überprüfbar, inwieweit Zusammenhänge zwischen Anforderungsdimensionen und Geometrieparametern als mathematische Funktion beschrieben und über bereits bestehende Bauteile hinaus extrapoliert werden können.

<sup>5</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

Besondere Bedeutung hat hier die Wahl geeigneter Geometrieparameter. Auf Grund der Komplexität der Bauteilgeometrie kommen mehrere Größen in Frage. Es wurde für eine initiale Festlegung dieser Größen daher untersucht, welche Parameter in Iterationen in vergangenen Projekten häufig geändert wurden und daher wichtige Gestaltungsgrößen zu sein scheinen. Diese Parameter können dann einheitlich als Stellhebel bei der Gestaltung neuer Produktgeneration genutzt werden. (Rouby, 2020)

Bei der Gestaltung künftiger Bauteile eine stärkere Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit zu erreichen sowie Gestaltungsiterationen auf Basis der gefundenen relevanten Gestaltungsgrößen auch teilautomatisiert durch einen Optimierungsansatz auszuführen ist Ziel des zweiten und dritten Ansatzes zur Effizienzsteigerung, der CAD-Methodik und der Optimierung mit dem Programm Isight (TECHNIA, 2020). Für eine ausführlichere Beschreibung dieser Ansätze wird auf (Rouby, 2020) verwiesen.

### 7.3.3 Diskussion und Zwischenfazit

Der beschriebene Ansatz zeigt, wie die explizite und systematische Nutzung von Referenzsystemelementen zu einer Effizienzsteigerung in der Gestaltung von Bauteilen beitragen kann. Dabei greift der Ansatz zunächst primär auf unternehmensinterne Referenzsystemelemente zurück. Die Integration unternehmensexterner Referenzsystemelemente, beispielsweise von Wettbewerbern, ist prinzipiell denkbar. Daten wie Steifigkeit oder Geometriespezifikationen ließen sich dort anhand beschaffter Bauteile ermitteln. Allerdings fehlen dann nach wie vor Informationen zur Vorgehensweise und Parametrisierung bei der Gestaltung dieser Referenzsystemelemente. Sie ließen sich daher nur begrenzt in das Schema des vorgestellten Ansatzes einordnen.

Für unternehmensinterne Referenzsystemelemente folgt aus der Konzeption des beschriebenen Ansatzes, welche Daten, z.B. Geometrieparameter, zu erfassen sind, um eine künftige Nutzung der Referenzsystemelemente zu ermöglichen oder zu begünstigen. Auf Basis einheitlich erfasster Daten können in künftigen Untersuchungen auch Zusammenhänge zwischen Spezifikation und Bauteilgeometrie als Funktion und die Möglichkeit der validen Extrapolation einer solchen Funktion über bestehende Datenpunkte hinaus untersucht werden.

Der beschriebene Ansatz weist Ähnlichkeiten zum Vorgehen von WALCH (2017) für Nockenwellen auf. Im Unterschied dazu wurde in der Untersuchung im vorigen Abschnitt ein einzelnes Bauteil mit dafür komplexerer Geometrie betrachtet.

Schließlich zeigt das Fallbeispiel über die Rolle von Referenzsystemelementen als Ausgangspunkt bei der Gestaltung neuer Bauteile hinaus auch auf, welche Bedeutung das Wissen um die Entwicklungsaktivitäten hat, mit der ein bestimmtes Referenzsystemelement

renzsystelement entwickelt wurde. Eine einheitliche Vorgehensweise bei der Gestaltung von ähnlichen Bauteilen begünstigt im beschriebenen Ansatz deren spätere Verwendung als Referenzsystemelement und gibt Hinweise für erfolgreiche Vorgehensweisen in künftigen Projekten.

## **7.4 Fallbeispiel: Reifegradabsicherung im Serienanlauf von Fahrzeugmotoren**

Im Folgenden wird die Reifegradabsicherung im Serienanlauf von Fahrzeugmotoren näher betrachtet. Im Serienanlauf kann die Überschreitungen geplanter Fristen schnell große wirtschaftliche Auswirkungen für ein Unternehmen haben (Dombrowski, Wullbrandt & Krenkel, 2018; Wiesinger & Housein, 2002 nach Rapp, Heimicke, Weber & Albers, 2020). Variationen und deren Auswirkungen müssen im Serienanlauf insbesondere unter diesem Gesichtspunkt bewertet und geplant werden. Die nachfolgend beschriebene Untersuchung zeigt, wie Wissen aus der Entwicklung von Referenzsystemelementen hierbei helfen kann, die Auswirkungen von Variationen besser einzuschätzen, eventuell Variationen zu vermeiden und im Sinne der Reifegradabsicherung potenziell kritische Teilsysteme früh zu identifizieren. Die Untersuchung wurde im Rahmen einer durch den Autor co-betreuten studentischen Abschlussarbeit in Kooperation mit einem Industrieunternehmen durchgeführt (Weber, 2020)<sup>6</sup> und die Ergebnisse wurden in RAPP UND HEIMICKE ET AL. (2020) auf einer Fachkonferenz veröffentlicht.

### **7.4.1 Reifegradabsicherung im Serienanlauf eines OEM**

In Abbildung 7.10 sind diejenigen Meilensteine in der Entstehung eines neuen Fahrzeugs dargestellt, die für die Reifegradabsicherung im Serienanlauf eines OEM im Fokus stehen.

---

<sup>6</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

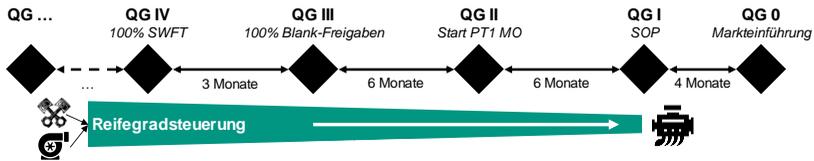


Abbildung 7.10: Relevante Quality Gates für die Reifegradabsicherung im Serienanlauf eines OEM (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 7), Übersetzung (Weber, 2020, S. 91)<sup>7</sup>.

Zu den unterschiedlichen Meilensteinen müssen Bauteile in definierten Reifegradstufen vorliegen. Ist dies nicht der Fall, werden die Bauteile als „kritisch“ geführt im Hinblick auf die Reifegradabsicherung und die Einhaltung weiterer Meilensteine. Ziel der Untersuchung, deren Ergebnisse im nächsten Abschnitt beschrieben sind, war es, die Gründe für kritische Bauteile besser zu verstehen und mögliche Maßnahmen zur Vermeidung von oder den Umgang mit kritischen Bauteilen abzuleiten. Für die Untersuchung wurden zwei Motor-Teilsysteme näher betrachtet, das Kurbelwellengehäuse und ein Turbolader. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 5)

#### 7.4.2 Einflussfaktoren auf die Reifegradabsicherung und Potenziale zur Unterstützung durch Wissen aus der Entwicklung interner Referenzsystemelemente bei zwei Beispielteilsystemen

Zur Identifikation von Gründen, die bisher dazu führten, dass Bauteile im Sinne der Reifegradabsicherung kritisch wurden, wurden zum einen Interviews mit Beteiligten durchgeführt. Zum anderen wurden standardisierte Berichte zu kritischen Bauteilen ausgewertet. Die so ermittelten Gründe für kritische Bauteile sind in Abbildung 7.11 aufgeführt.

<sup>7</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

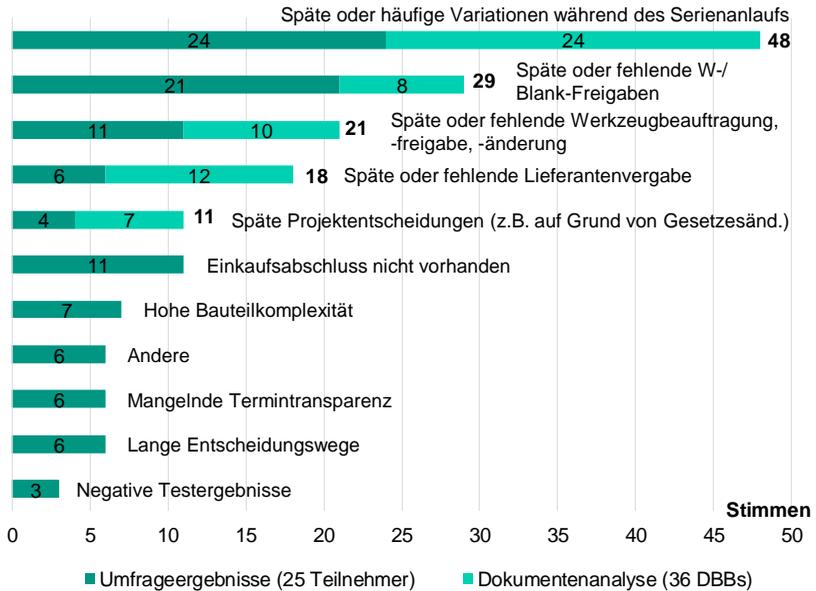


Abbildung 7.11: In Interviews mit Beteiligten und auf Basis von Berichtsanalysen ermittelte Gründe für im Sinne der Reifegradabsicherung kritische Bauteile (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 6), Übersetzung (Weber, 2020, S. 88)<sup>8</sup>.

Man kann erkennen, dass späte oder regelmäßige Variationen im Serienanlauf am häufigsten als Faktor genannt werden. Variationen bedeuten weitere Entwicklungsaktivitäten (vgl. Abschnitt 5.2), die einen entsprechenden Zeitaufwand erfordern. Für das beispielhaft betrachtete Teilsystem „Turbolader“ konnte außerdem festgestellt werden, dass dieses Teilsystem über mehrere Projekte hinweg regelmäßig kritisch im Hinblick auf die Reifegradabsicherung im Serienanlauf ist. Gründe hierfür sind die Komplexität des Teilsystems sowie damit einhergehend verhältnismäßig lange Zeiträume, die für den Aufbau von Prototypen und die Herstellung von Pro-

<sup>8</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

duktionswerkzeugen notwendig sind. Unter diesen Bedingungen führen Variationen, die einen erneuten Prototypenaufbau oder die Anpassung von Werkzeugen erfordern, dazu, dass Zeitpläne nicht mehr eingehalten werden können. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 5)

Im Folgenden wurden die Gründe für späte oder regelmäßige Variationen im Serienanlauf näher untersucht, um Ansatzpunkte für Gegenmaßnahmen zu erhalten. Die gefundenen kausalen Zusammenhänge sind in Abbildung 7.12 dargestellt.

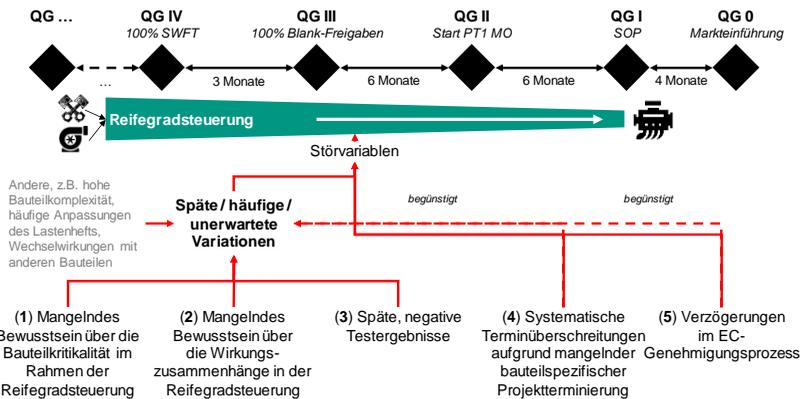


Abbildung 7.12: Identifizierte Gründe für späte oder regelmäßige Variationen im Serienanlauf, die dazu führen, dass Bauteile im Hinblick auf die Reifegradabsicherung im Serienanlauf kritisch werden. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 7), Übersetzung (Weber, 2020, S. 91)<sup>9</sup>.

Dabei handelt es sich bei den Faktoren (1) bis (3) um direkte Ursachen, während (4) und (5) vor allem verstärkende Wirkung haben (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 7).

Um mögliche Maßnahmen zur Adressierung der identifizierten Faktoren abzuleiten, wurde ein Ansatz nach ALBERS, HEIMICKE UND TROST (2020) gewählt. Dabei werden die ermittelten Problemsituationen auf die 9 Grundprinzipien des ASD-Ansatzes (vgl. Abschnitt 2.3.3) zurückgeführt. Über die ASD-Prinzipien sind gewünschte Ver-

<sup>9</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

besserungsrichtungen entsprechend zielführende Maßnahmen zugänglich. In Abbildung 7.13 sind auf diese Art und Weise abgeleitete Erfolgsfaktoren zur Adressierung der Problemursachen (1) und (2) aus Abbildung 7.13 dargestellt.

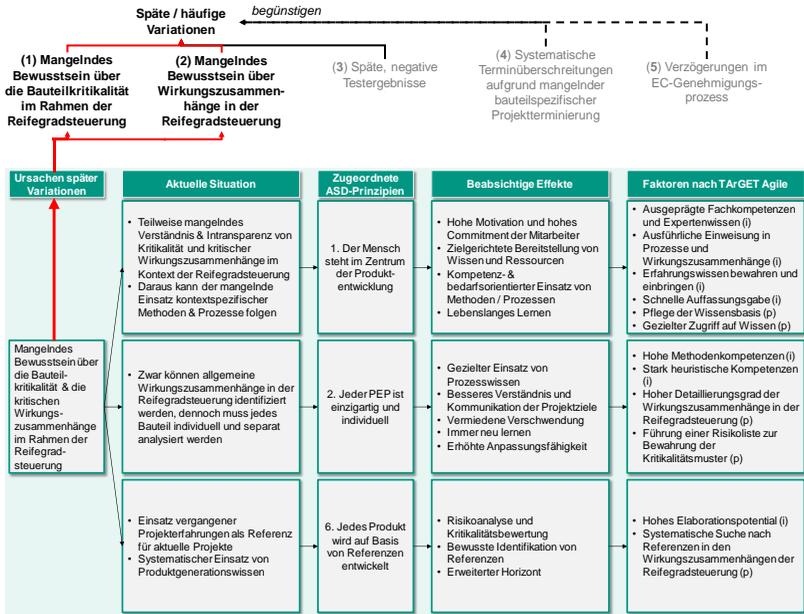


Abbildung 7.13: Mit Hilfe der Methodik von Albers et al. (2020) auf Basis des ASD-Ansatzes abgeleitete Erfolgsfaktoren, um späte oder regelmäßige Variationen, die Bauteile hinsichtlich der Reifegradsteuerung im Serienanlauf kritisch werden lassen, zu vermeiden oder den Umgang mit ihnen zu verbessern. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 8), Übersetzung (Weber, 2020, S. 102–104)<sup>10</sup>.

Aus der Betrachtung der Ursachen für späte oder regelmäßige Variationen kann man erkennen, dass sich solche Variationen, die Bauteile in Bezug auf die Reife-

<sup>10</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit (co-betreut)

gradsteuerung im Serienanlauf kritisch werden lassen, vermutlich nur teilweise vermeiden lassen. So kann beispielsweise unzureichendes Verständnis für Kritikalität wie in Abbildung 7.13 aufgeführt unter anderem durch Schulungsmaßnahmen adressiert werden. Außerdem können, wie zuvor bereits beobachtet, potenziell häufiger kritische Teile durch die Analyse von Informationen zu Referenzsystemelementen identifiziert werden. Gleichzeitig lassen sich aber zum Beispiel vermutlich späte ungünstige Erprobungsergebnisse nie vollständig ausschließen. Daher wurde eine Kombination aus Maßnahmen konzipiert, die sowohl auf das Vermeiden von Variationen abzielen, die Bauteile kritisch werden lassen könnten, als auch Maßnahmen, die den Umgang mit unvermeidbaren Variationen verbessern. (Rapp, Heimicke et al., 2020, S. 9–10)

### 7.4.3 Diskussion und Zwischenfazit

Im betrachteten Fallbeispiel der Reifegradabsicherung im Serienanlauf ist die Rolle von Variationen als Schlüsselfaktor für Entwicklungsrisiken zu erkennen.

Auf Basis von Wissen über die Entwicklung von verwendeten Referenzsystemelementen konnten Maßnahmen konzipiert werden, um in der Reifegradabsicherung im Serienanlauf sowohl Variationen und damit verbundene Risiken zu vermeiden, als auch besser mit ihnen umzugehen. Das Modell aus Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit zu Gründen und Auswirkungen von Variationen wird damit für den Serienanlauf spezifiziert und genutzt.

Die Anwendbarkeit des Wissens aus den Entwicklungsprozessen, die verwendeten Referenzsystemelementen zu Grunde liegen, hängt zum einen davon ab, inwieweit sich die Entwicklung von Referenzsystemelementen und neuem Teilsystem ähneln. Erkenntnisse aus der Entwicklung eines früheren Kurbelgehäuses sind beispielsweise voraussichtlich gut auf die Entwicklung neuer Kurbelgehäuse anwendbar, aber womöglich für die Anwendung in der Entwicklung des Turboladers weniger sicher.

Gleichzeitig können aus der Analyse der Entwicklung von Referenzsystemelementen eher generalisierbare Kriterien gewonnen werden. Als Beispiel sei hier ein hoher Grad an Vernetzung mit anderen Teilsystemen genannt. Dieses Kriterium passt auch zu Forschungsarbeiten über die Fortpflanzung technischer Änderungen (s. Abschnitt 2.5.3.2).

Hierbei wird Wissen über Faktoren, die generell zu einer höheren Bauteilkritikalität führen können, eher über Fachliteratur zugänglich sein. Für bauteilspezifisches Wissen kommt unternehmens-internen Referenzsystemelementen eine erhöhte Bedeutung zu. Für unternehmens-externe Referenzsystemelemente muss davon ausgegangen werden, dass Wissen über die damit assoziierten Entwicklungsprozesse im Allgemeinen weniger zugänglich ist.

## **7.5 Fallbeispiel: Prinzipskizzen in der Maschinenkonstruktionslehre-Projektarbeit**

Die Erkenntnisse aus der Forschung auf Grundlage des Modells der PGE haben in Bezug auf die Maschinenkonstruktionslehre-Ausbildung (MKL) am Institut zu dem Schluss geführt, dass die damit verbundene MKL-Projektarbeit konzeptionell zu erweitern und das Modell der PGE dabei als Grundlage zu nutzen ist (Albers, Matthiesen, Rapp, Hoelz & Bursac, 2018). Ziel war es dabei auch, abzubilden, dass in der Entwicklungspraxis die Arbeit auf Grundlage der Produktdokumentation von Referenzsystemelementen große Bedeutung hat.

Bei den Aktivitäten der Studierenden unter den Bedingungen des erweiterten Konzepts konnte für die Erstellung von Prinzipskizzen ein angepasstes Vorgehen beobachtet werden, das unterschiedlichen Variationsarten und der Arbeit auf Basis der Referenzsystemelement-Produktdokumentation Rechnung trägt. Dieses beobachtete Vorgehen kann als eine mögliche Methode zur Erstellung von Prinzipskizzen auf Basis von Referenzsystemelementen und deren Produktdokumentation dienen.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst das erweiterte Workshop-Konzept erläutert. Anschließend werden die Beobachtungen bei der Erstellung von Prinzipskizzen durch die Studierenden dargestellt und diskutiert.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Abschnitts wurden mit ALBERS UND MATTHIESEN ET AL. (2018) auf einer internationalen Fachkonferenz zur Ingenieurausbildung veröffentlicht sowie im Rahmen einer Arbeit des Autors als Teil des Hochschuldidaktik-Zertifikats Baden-Württemberg dargestellt (Rapp, 2019).

### **7.5.1 Weiterentwicklung des Konzepts zur Maschinenkonstruktionslehre-Projektarbeit auf Grundlage des Modells der PGE**

In der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre IV konstruieren die Studierenden gemäß dem KaLeP – Karlsruher Lehrmodell für Produktentwicklung (Albers, Burkart, Deigendesch & Robens, 2009) in Teams ein technisches System. Die Projektarbeit ist semesterbegleitend und untergliedert sich in drei Phasen, wobei zum Ende jeder Phase der aktuelle Arbeitsfortschritt in einem Workshop Betreuern des Instituts präsentiert wird. Ergebnis der Projektarbeit ist am Ende eine technische Dokumentation des konstruierten Systems, unter anderem in Form von technischen Zeichnungen, Berechnungen, Skizzen und CAD-Modellen. Dieser Prozess ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

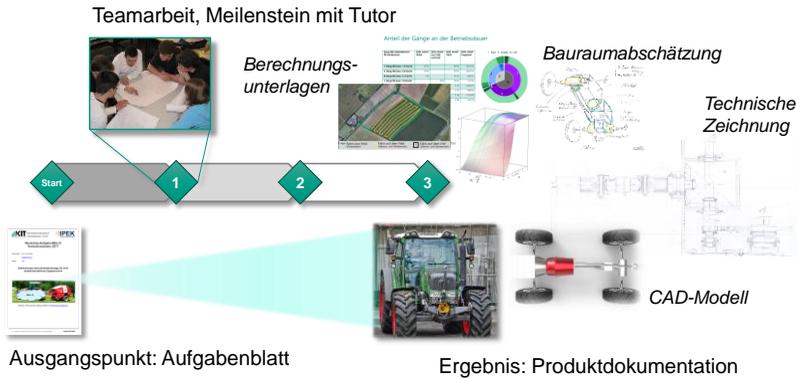


Abbildung 7.14: Bisheriger Prozess der Projektarbeit im Workshop zur Maschinenkonstruktionslehre IV mit Aufgabenblatt als Ausgangspunkt und Produktdokumentation als Ergebnis (Rapp, 2019, S. 3), vgl. auch Vortrag zu (Albers, Matthiesen et al., 2018).

Ausgangspunkt der Entwicklungsaktivitäten der Studierenden ist im ursprünglichen Konzept eine Aufgabenstellung als Dokument, das Anforderungen an die Meilensteinergebnisse sowie weiterführende Hinweise und Randbedingungen enthält. Dabei wurden Aufgabenstellungen in einem dreijährigen Rhythmus wiederholt und häufig nahezu unverändert verwendet.

In Folge der Erkenntnisse aus den Forschungen auf Basis des Modells der PGE wurde angestrebt, in der Projektarbeit Entwicklungsaktivitäten auf der Grundlage zentral bereitgestellter Referenzelemente einschließlich deren Produktdokumentation zu ermöglichen (Albers, Matthiesen et al., 2018, S. 2). Zu diesem Zweck wurde das Konzept der Projektarbeit erweitert, indem einem neuen Jahrgang, wie in Abbildung 7.15 gezeigt, die Ergebnisse des Vorgängerjahrgangs als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration bereitgestellt wurden.

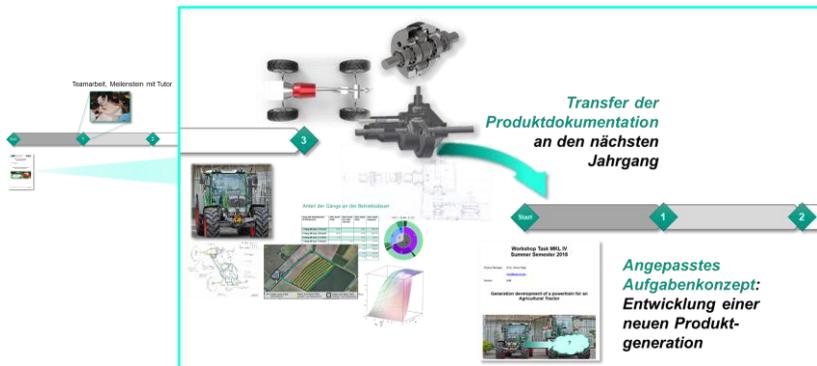


Abbildung 7.15: Konzept, um in der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre IV Entwicklungsaktivitäten auf Basis von Referenzsystemelementen einschließlich deren Produktdokumentation zu ermöglichen, indem in einem neuen Jahrgang die Ergebnisse des Vorgängerjahrgangs als Ausgangspunkt zur Verfügung gestellt werden (Rapp, 2019, S. 8, vgl. auch Vortrag zu Albers, Matthiesen et al., 2018).

Im Zuge dessen wurde auch die Aufgabenstellung angepasst. Hier wird nun nicht mehr im dreijährigen Rhythmus zwischen verschiedenen Aufgaben gewechselt. Stattdessen ist für jeden Jahrgang eine angepasste Aufgabenstellung auszuarbeiten, die auf die Entwicklung einer neuen Produktgeneration abzielt. Durch die gestellte Aufgabe muss es den studentischen Entwicklungsteams möglich sein, sowohl Teilsysteme des zur Verfügung gestellten Referenzsystems zu übernehmen, als auch an ausgewählten Stellen gezielt kreativ tätig zu werden. Dies kann nur erreicht werden, wenn die Aufgabenstellung mindestens in Teilen jährlich erneuert wird.

In unmittelbarer Folge des erweiterten Konzepts für die Projektarbeit konnte bei Studierenden ein angepasstes Vorgehen bei der Erstellung von Prinzipskizzen beobachtet werden. Dieses Vorgehen wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

## 7.5.2 Erstellung von Prinzipskizzen auf Basis der Produktdokumentation von Referenzsystemelementen

Mit Prinzipskizzen werden in der Entwicklung technischer Systeme Lösungsideen dargestellt zu einem Zeitpunkt, zu dem noch keine vollständige Gestaltinformation vorliegt. Prinzipskizzen dienen so dazu, Ideen früh zu explizieren und einer ersten Diskussion und Bewertung zugänglich zu machen. Im Gegensatz zu technischen Zeichnungen sind Prinzipskizzen kaum standardisiert. Abbildung 7.16 zeigt Beispiele von Prinzipskizzen aus der Projektarbeit in der Maschinenkonstruktionslehre, die noch ohne zentral zur Verfügung gestellte Referenzsystemelemente entstanden sind.

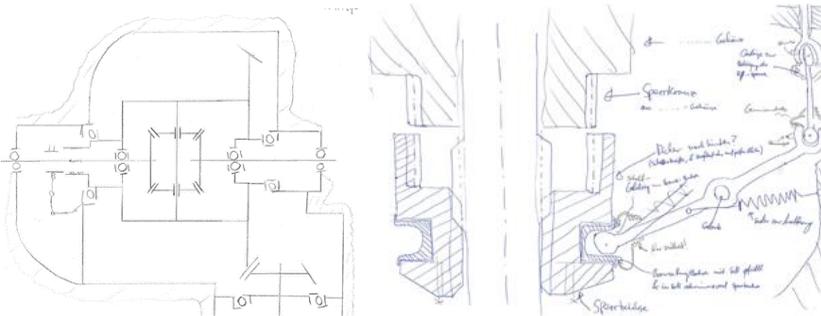


Abbildung 7.16: Beispiele für Prinzipskizzen aus der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre IV. Links schematisch Wellen, Lager, Zahnräder und Gehäuse eines Differentialgetriebes, rechts eine Lösung zur formschlüssigen, lösbaren Verbindung von Wellen (Rapp, 2019, S. 14, vgl. auch Vortrag zu Albers, Matthiesen et al., 2018).

Abbildung 7.17 zeigt ein Vorgehen zur Erstellung von Prinzipskizzen, das von den Studierenden unter den Randbedingungen des erweiterten Konzepts für die Projektarbeit angewandt wurde. Das Vorgehen integriert zum einen die bereitgestellte Produktdokumentation eines Referenzsystemelements und berücksichtigt zum anderen, dass in der Entwicklung auch ein Übernahmevariationsanteil angestrebt werden sollte.

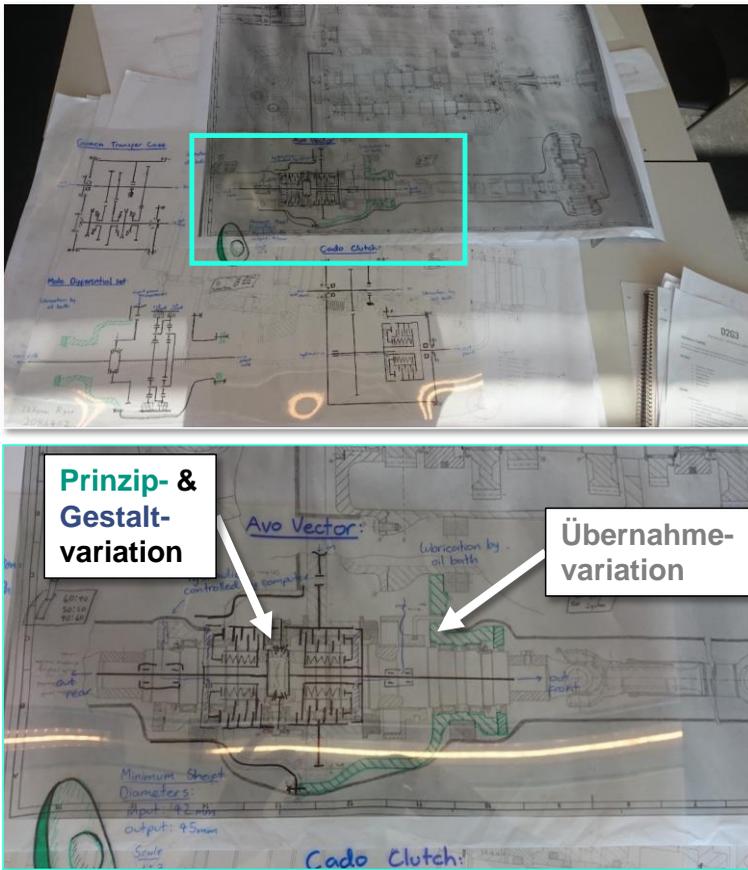


Abbildung 7.17: Vorgehen von Studierenden zur Erstellung von Prinzipskizzen auf der Basis von Referenzsystemelementen und der zugehörigen Produktdokumentation in der Projektarbeit zur Maschinenkonstruktionslehre. Links Gesamtansicht, rechts Ausschnitt. Bereits in den Prinzipskizzen können unterschiedliche Variationen identifiziert werden (Rapp, 2019, S. 15, vgl. auch Vortrag zu Albers, Matthiesen et al., 2018).

Die Studierenden haben dabei zunächst die Zeichnung des Referenzsystemelements ausgedruckt. Anschließend wurde Klarsicht-Folie darübergelegt. Auf der Folie wurden mögliche Lösungen in Form von Prinzipskizzen dargestellt. Wie in Abbildung 7.17 rechts zu sehen können dabei direkt unterschiedliche Variationen von Teilsystemen unterschieden werden. Da die Verbindung der Folie mit der darunter liegenden Zeichnung nicht fest ist, können auf diese Art und Weise mehrere alternative Lösungen erstellt, verglichen und diskutiert werden.

### **7.5.3 Diskussion und Zwischenfazit**

Das dargestellte Vorgehen kann unmittelbar als methodischer Ansatz zur Prinzipskizzen-Erstellung adaptiert werden. Für verschiedene Lösungsansätze sind direkt die erforderlichen Variationsarten unterschiedlicher Teilsysteme identifizierbar. Das kann als Anhaltspunkt für die Bewertung alternativer Lösungen sowie die Planung weiterer Entwicklungsaktivitäten dienen. Weiterhin können eventuelle Restriktionen bei der Lösungsfindung in Bezug auf die Systemgestalt, beispielsweise die Forderung nach der Übernahme bestimmter Teilsysteme, direkt berücksichtigt werden. Die Beobachtung zeigt weiterhin das Potenzial des erweiterten Workshop-Konzepts. Das Modell der PGE beschreibt die Entwicklungspraxis zutreffend; praxisorientierte Lehre ist damit Lehre auf Basis dieses Modells. Wie das dargestellte Beispiel zeigt, werden so unmittelbar methodische Arbeitsweisen möglich, die zur Realität in der Entwicklungspraxis passen. Diese Entwicklungspraxis ist zunehmend von agilen Arbeitsweisen geprägt, wie sie durch das ASD-Framework bereitgestellt werden (s. Abschnitt 2.3.3). Das dort angestrebte inkrementelle und iterative Arbeiten wird durch den hier beschriebenen Ansatz zur Erstellung von Prinzipskizzen unter Einbezug der verwendeten Referenzsystemelemente unmittelbar unterstützt. Die Studierenden in den MKL-Workshops werden zum Träger solcher Arbeitsweisen und des zu Grunde liegenden Verständnisses der Produktentwicklung auf Basis des Modells der PGE. Sie werden damit im Hinblick auf methodische Weiterentwicklung der Entwicklungspraxis unter dem Gesichtspunkt des Modells der PGE zu Inkubatoren und einem der wichtigsten Schlüsselfaktoren.

## **7.6 Nutzung von Modellzusammenhängen in weiteren Forschungsarbeiten**

Für eine weitere initiale Evaluation des in Kapitel 5 vorgeschlagenen Modells wurde ergänzend zu den zuvor vorgestellten Arbeiten eine Erhebung zur Nutzung von Mo-

dellzusammenhängen in laufenden oder geplanten Arbeiten durchgeführt. Das Vorgehen sowie die Ergebnisse dieser Erhebung werden im Folgenden im Überblick dargestellt.

### 7.6.1 Vorgehen

Für die Erhebung wurde ein Online-Fragebogen genutzt. Vor Ausfüllen des Fragebogens wurden die Modellzusammenhänge in einem ca. 10-minütigen Vortrag erläutert und mit Beispielen illustriert. Diese Darstellungen sind in Anhang C der vorliegenden Arbeit aufgeführt. Sie waren auch Bestandteil des Online-Fragebogens, der im Anschluss ausgefüllt wurde. Für das Ausfüllen standen ca. 20 Minuten zur Verfügung. Es konnte je Modellzusammenhang angegeben werden, ob dieser für die eigene Forschung genutzt wurde bzw. wird oder voraussichtlich genutzt werden wird. Dort, wo dies der Fall war, konnte die Nutzung in Stichpunkten konkretisiert werden. Der Online-Fragebogen wurden von  $n = 17$  Forschenden ausgefüllt. Alle Teilnehmenden waren mit dem Modell der PGE vertraut. Die Ergebnisse der Befragung werden zusammengefasst im nächsten Abschnitt dargestellt.

### 7.6.2 Erhebung der Nutzung von Modellzusammenhängen

Tabelle 43 zeigt die von den Befragten genannten laufenden oder geplanten Anwendungen der Modellzusammenhänge in Forschungsthemen. Die Antworten sind zusammengefasst dargestellt. Die vollständigen Antworten sind im Anhang C dieser Arbeit aufgeführt.

Tabelle 43: Von den Befragten genannten Anwendungen von Modellzusammenhängen in Forschungsthemen. Darstellung zusammengefasst, die vollständigen Antworten sind in Anhang C aufgeführt.

Modellzusammenhang	Genannte Anwendung in Forschungsthemen (Auszug, in Stichworten)
Gründe für Variationen entstammen dem Zielsystem.	Verbesserung der Qualität von Wissenstransfer Ableitung von Aktivitäten für Entwicklungsinstrumente Wissensdokumentation Aufbau von XR-Validierungsumgebungen

	<p>Abschätzung von Entwicklungsrisiko</p> <p>Wiederverwendung von Systemmodellen unter geänderten Zielsystemen</p>
<p>Gründe für Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente entstammen dem Zielsystem.</p>	<p>Projekteinschätzung und Vorgehensplanung</p> <p>Integration von Wissen zu Herstellkosten in Design-Entscheidungen</p> <p>Auswahl von Referenzsystemelementen</p> <p>Abschätzung von Entwicklungsrisiko</p>
<p>Variationen können mit Hilfe C&amp;C<sup>2</sup>-A-basierter Indikatoren identifiziert werden.</p>	<p>Standardisierte Beschreibung von Änderungen im Änderungsmanagement</p> <p>Sprintplanung für Entwicklungsgenerationen</p> <p>Identifikation von Neuentwicklungsanteilen</p>
<p>Verschiedene Referenzen und deren Wechselwirkungen werden durch das Modellelement Referenzsystem beschrieben.</p>	<p>Beschreibung von Wissenstransfer, u.a. zwischen Produkt und Produktionssystem</p> <p>Gültigkeitsprüfung bei Änderungen</p> <p>Projektcharakterisierung, bspw. „Produktgeneration 1“</p> <p>Analyse und Synthese des Referenzsystems</p> <p>Mensch-Produkt-Interaktion</p> <p>Wissensdokumentation</p> <p>Modellbasierte Abbildung des Referenzsystems</p>
<p>Der Einfluss von Referenzsystemelementen auf den Entwicklungsprozess kann durch Charakteristika der Elemente erfasst werden.</p>	<p>Beschreibung von Wissenstransfer</p> <p>Änderungen aus verschiedenen Domänen</p> <p>Schlussfolgerungen aus Projektcharakterisierung</p> <p>Bewertung von Entwicklungssituation und Aufwandsabschätzung</p>
<p>Auswirkungen von Variationen sind Aktivitäten der Produktentstehung in verschiedenen Ebenen des iPeM.</p>	<p>Schlussfolgerungen aus Projektcharakterisierung</p> <p>Anforderungen an Wissensdokumentation</p> <p>Finden lösungsspezifischer Elemente</p> <p>Trigger-basierte Ausführung von Entwicklungsaktivitäten</p>
<p>Auswirkungen von Referenzsystemelement-Charakteristika sind Aktivitäten der Produktentstehung in verschiedenen Ebenen des iPeM.</p>	<p>Schlussfolgerungen aus Projektcharakterisierung</p> <p>Anforderungen an Wissensdokumentation</p> <p>Aufbau von Validierungssystem</p>
<p>Variationen und Charakteristika von Referenzsystemelementen können über Aktivitäten der Produktentstehung hinaus zu weiteren Risiken führen.</p>	<p>Unsicherheiten und Risiken im Änderungsmanagement</p> <p>Anforderungen an Wissensdokumentation</p>

	Risikoabschätzung durch Variationen an Produkt und Produktionssystem sowie der Änderungsausbreitung Teilautomatisierte Erstellung von Übersichten für Traceability zu Risikobewertung
--	--

### 7.6.3 Diskussion und Zwischenfazit

Es ist zu erkennen, dass alle genannten Modellzusammenhänge in verschiedenen Themenbereichen Anwendung finden. Da die jeweiligen Vorhaben Größtenteils noch laufen, ist eine abschließende Evaluation der Anwendung der Modellzusammenhänge hier noch ausstehend. Ein Überblick über weitere derzeit laufende Arbeiten auf Basis des Modells der PGE wird zusätzlich im Ausblick in Kapitel 9 gegeben. Im nächsten Kapitel werden Ergebnisse und Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst.



## 8 Zusammenfassung und Fazit

Neue Systeme werden auf Basis bestehender Systeme entwickelt (s. Abschnitt 2.4). Diese Entwicklung ist eine variable Kombination aus Übernahme von den bestehenden Systemen und Neuentwicklung in unterschiedlicher Ausprägung und unterschiedlichem Umfang. Diese Aktivitäten werden ausgehend von einer Abwägung der mit ihnen verbundenen Chancen und Risiken geplant (s. Abschnitt 2.5). Entwicklungsmethodische Forschung muss für diese Chancen-Risiken-Abwägung sowie für die spezifische Planung, Steuerung und methodische Unterstützung der unterschiedlichen Entwicklungsaktivitäten Lösungsansätze bereitstellen. Grundlage muss dabei ein durchgängig verwendbares Modell sein, das die Entwicklung neuer Systeme als Phänomen durch geeignete Konzepte greifbar macht. Diese Konzepte müssen hinreichend formalisiert werden, um die empirisch basierte Entwicklung von Methoden und Prozessen zu ermöglichen, die auf Grund der gemeinsamen Basis abgestimmt und integriert verwendet werden können.

Die Analyse bestehender Ansätze in Kapitel 2, dargestellt in Abbildung 8.1, zeigt, dass das Modell der PGE nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) in dieser Hinsicht großes Potenzial bietet.

Gute Übereinst.						
Teilweise Übereinst.						
Geringe Übereinst.						
Variable Kombination von Übernahme und Neuem	Variable Kombination	Fokus Übernahme	Variable Kombination	Variable Kombination	Variable Kombination	Variable Kombination
Interne und externe Wissensselemente	Intern & extern	Intern & extern	Intern	Intern	Intern & extern	Intern
Verschiedene Detailgrade der Systembeschreibung	Fokus jeweils auf einzelne Konzepte und Knowledge	Variabel	Fest	Variabel	Variabel	Variabel
Formalisierungsgrad	Hoch	Gering	Hoch	Mittel	Hoch	Gering
Übergreifende Anwendbarkeit	Fokus auf Produkt; potenziell auf weitere Systeme übertragbar	Alle	Fokus Produkt-, Produktionssystem	Fokus auf Produkt; potenziell auf weitere Systeme übertragbar	Fokus auf Produkt; potenziell auf weitere Systeme übertragbar	Fokus auf Produkt; potenziell auf weitere Systeme übertragbar
Adressierte Forschungsbereiche	Fokus auf Ontologie	Fokus Wissens- bzw. Datenmanagement	Fokus Ontologie, Wissensmanagement	Potenziell alle	Potenziell alle	Potenziell alle
Potenzielle Anwendungsdomänen	Domänenübergreifend	Domänenübergreifend	Fokus Mechatronik	Domänenübergreifend	Domänenübergreifend	Domänenübergreifend

Abbildung 8.1: Ergebnis der Potenzialanalyse verschiedener Beschreibungsansätze. Zusammengefasste Darstellung auf Basis von Tabelle 5 und Tabelle 6 in Abschnitt 2.8.

Das Modell der PGE nach ALBERS beschreibt die Entwicklung neuer Systeme mit zwei Grundhypothesen:

- Jede Entwicklung basiert auf Referenzen
- Ausgehend von diesen Referenzen lässt sich jede Entwicklung als eine Kombination aus Übernahmevariation von Teilsystemen bestehender Systeme, Gestalt- und Prinzipvariation derselben beschreiben

Aufbauend auf diesem Entwicklungsstand des Modells ergeben sich entsprechend der eingangs beschriebenen Zusammenhänge die in Kapitel 3 beschriebenen und in Abbildung 8.2 nochmals dargestellten Forschungsbedarfe.

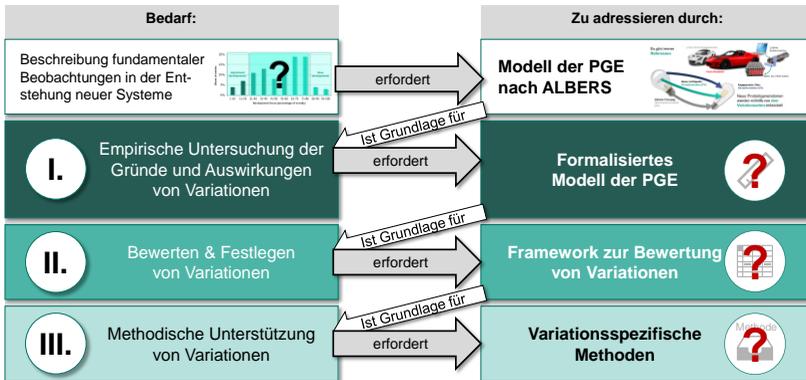


Abbildung 8.2: Forschungsbedarfe, die in der vorliegenden Arbeit adressiert werden.

Aus dem Bestreben, das Modell der PGE mit der Adressierung der genannten Bedarfe für die Erforschung von Entwicklungsmethoden und -prozessen zugänglich zu machen, ergibt sich das in Kapitel 3 formulierte Ziel der vorliegenden Arbeit:

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Variationen auf der Basis von Referenzen zur Realisierung von Innovationspotenzialen mit Gründen von Entwicklungsrisiken in Beziehung zu setzen und so die Bewertung, Festlegung und methodische Unterstützung von Variationen zu ermöglichen.

Dieses Ziel wird in drei Schritten erreicht:

- Zunächst wird in Kapitel 5 ausgehend von den Grundhypothesen des Modells der PGE eine geeignete Formalisierung als Basis für entwicklungs-methodische Forschung vorgeschlagen
- Diese Zusammenhänge werden in Kapitel 6 aufgegriffen, in dem ein Framework zur Ableitung, Bewertung und Planung von Variationen vorgestellt wird
- In Kapitel 7 wird schließlich beispielhaft die Adaption bestehender und die Entwicklung neuer Methoden für die variationsspezifische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten gezeigt

Jedes der drei Kapitel gliedert sich entsprechend der verwendeten Forschungsmethodik, wobei gemäß der Design Research Methodology (Blessing & Chakrabarti, 2009) die Forschungsstadien „Deskriptiv I“, „Präskriptiv“ und „Deskriptiv II“ durchlaufen werden, wie in Kapitel 4 beschrieben.

Die Ergebnisse der einzelnen Schritte werden nachfolgend zusammengefasst.

In Kapitel 5 werden zunächst anhand von 13 Fallbeispielen aus unterschiedlichen Branchen mögliche Gründe und Auswirkungen von Variationen untersucht (Abschnitt 5.1). Die gemachten Beobachtungen werden mit dem Modell in Abbildung 8.3 strukturiert (Abschnitt 5.2).

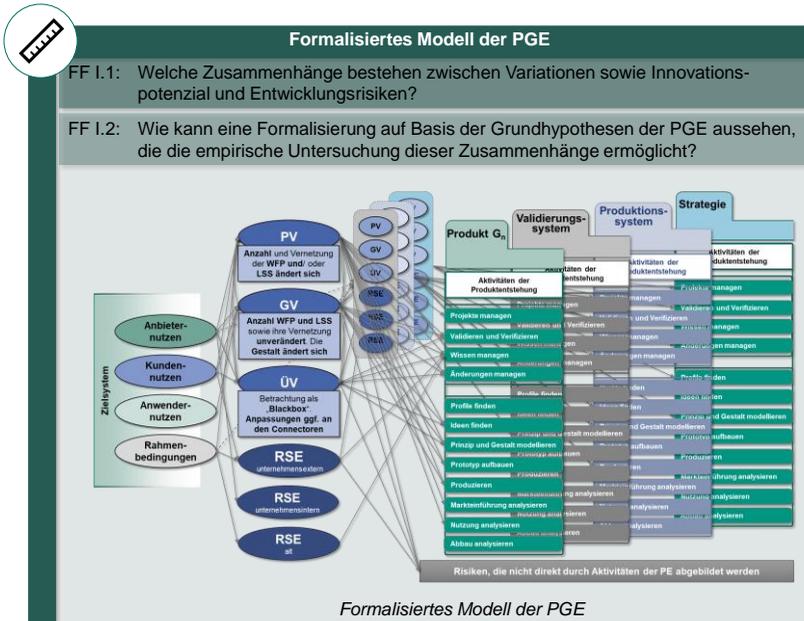


Abbildung 8.3: Ergebnisse von 13 untersuchten Fallbeispielen aus unterschiedlichen Branchen zu Gründen und Auswirkungen von Variationen werden in einem Modell strukturiert. Für Modellbestandteile werden messbare Indikatoren vorgeschlagen. Dadurch entsteht ein formalisiertes Modell der PGE.

Im vorgeschlagenen Modell werden die unterschiedlichen Variationsarten mit C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren gemessen (Abschnitt 5.2.2.1).

Um Beobachtungen abzubilden, dass bei der Entwicklung eines neuen Systems Systeme bzw. Teilsysteme unterschiedlichen Ursprungs als Referenz dienen können, wird das Modellelement des Referenzsystems eingeführt. Davon ausgehend werden im Modell in Abbildung 8.3 Charakteristika von Referenzelementen neben die drei Variationsarten als Schlüsselfaktoren für Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken gestellt (Abschnitt 5.2.2.2).

Gründe für Variationen und gewählte Referenzen können mit dem Zielsystem, beispielsweise in Ausprägung des Produktprofils, in Verbindung gebracht werden (s.

Abschnitt 5.2.2.3). Wichtige Größen sind hier einerseits Anwender-, Kunden- und Anbieternutzen als wesentliche Faktoren für Innovationspotenzial und andererseits Randbedingungen.

Auf der Auswirkungsseite können Variationen zum einen als Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung in unterschiedlichen Ebenen des iPeM verstanden werden (s. Abschnitt 5.2.2.3). Dabei beinhaltet die Variation eines Teilsystems im Allgemeinen mehrere Aktivitäten der Produktentstehung. Diese Beziehungen bestehen in jeder der durch die iPeM-Ebenen beschriebenen Systementwicklungen. Innerhalb definierter Produktbereiche wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass die Zusammenhänge von Variationen und Aktivitäten der Produktentstehung über mehrere Produktgenerationen hinweg Muster bilden können. Damit bietet sich beispielsweise das Potenzial, Templates für die Planung von Entwicklungsprozessen zu entwickeln. In Kombination mit den C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren für Variationen findet an dieser Stelle auch eine Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodellen auf Basis des Modells der PGE statt.

Über diese Zusammenhänge hinaus können Variationen ebenso wie bestimmte Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente zu weiteren Risiken führen, die nicht direkt mit Aktivitäten der Produktentstehung korrespondieren.

Zentrale in Abbildung 8.4 gezeigte Aspekte des Modells werden anschließend evaluiert.



**Formalisiertes Modell der PGE**

FF 1.3: Inwieweit lassen sich mit den vorgeschlagenen Formalisierungen die beobachteten Zusammenhänge zwischen Variationen sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken erfassen?

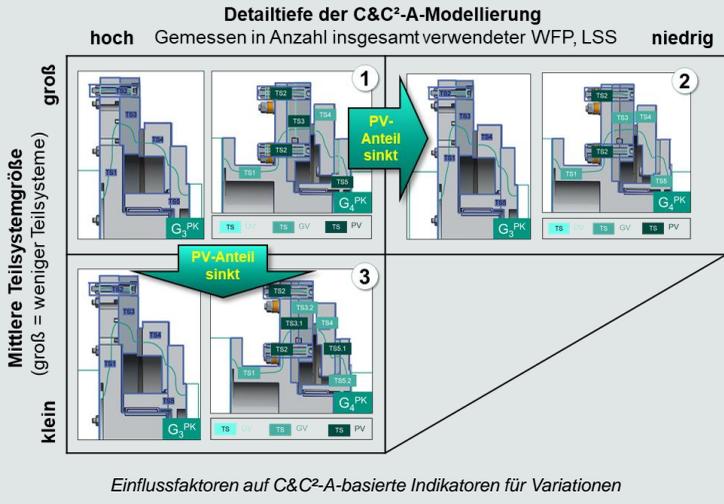


Abbildung 8.4: Evaluierte Aspekte des vorgeschlagenen formalisierten Modells der PGE (Teil 1, Fortsetzung in Abbildung 8.5)

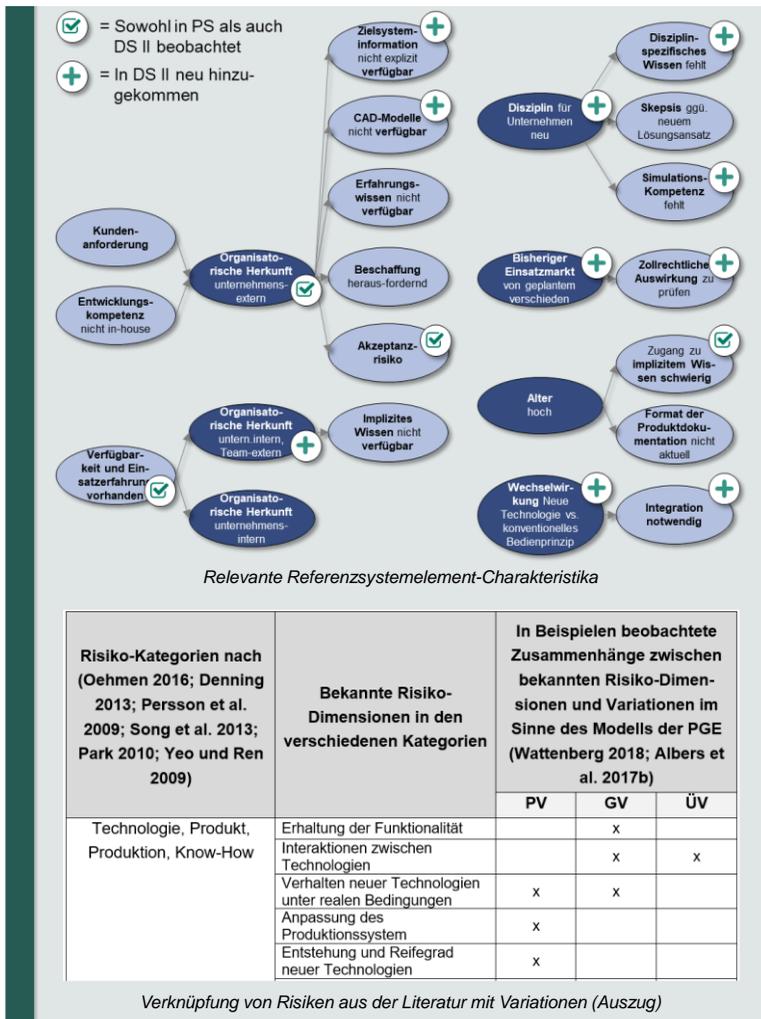


Abbildung 8.5: Evaluerte Aspekte des vorgeschlagenen formalisierten Modells der PGE (Fortsetzung von Abbildung 8.4)

Bei der Untersuchung der C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren in Abschnitt 5.3.2.1 wird festgestellt, dass einerseits eine detailliertere C&C<sup>2</sup>-Modellierung mehr Prinzipvariationen sichtbar werden lässt. Der Prinzipvariationsanteil steigt dadurch tendenziell. Weiter führt eine feinere Untergliederung eines Systems in Teilsysteme bei der Berechnung von Variationsanteilen dazu, dass die Bereiche, die dem Prinzipvariationsanteil zugerechnet werden, kleiner werden, da einzelne Prinzipvariationen enger eingegrenzt werden. Für die empirische Untersuchung von Variationsanteilen ist es also von Bedeutung, die passende Teilsystem-Struktur und C&C<sup>2</sup>-Detailtiefe zu wählen. Dies sind Größen, die in einem Entwicklungsprozess vom Wissensstand zu einem bestimmten Zeitpunkt abhängig und dynamisch sind. Die Informationen über diese zeitlich unterschiedlichen Ausprägungen sind für empirische Analysen essentiell und durch geeignete Erhebungsformen zu beschaffen.

Bei der Analyse von Referenzsystemelement-Charakteristika in vier weiteren Fallbeispielen können einerseits bereits zuvor identifizierte Charakteristika bestätigt werden, die im Hinblick auf Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken relevant sind. Darüber hinaus können weitere relevante Referenzsystem-Charakteristika als mögliche Einflussfaktoren hinzugefügt werden (Abschnitt 5.3.2.2). Mehrfach beobachtet werden konnte insbesondere ein Einfluss der organisatorischen Herkunft eines Referenzsystemelements. Dieser Faktor beeinflusst den Zugang zu unterschiedlichen Formen von Wissen und Dokumentation über das betreffende Referenzsystemelement sowie die Anwendbarkeit der Kompetenzen eines Unternehmens für die Analyse eines Referenzsystemelements.

Abschließend werden in Abschnitt 5.3.2.3 in der Literatur bekannte Entwicklungsrisiken analysiert. Dabei wird gezeigt, dass ein Großteil von in der Literatur bekannten Entwicklungsrisiken mit den Schlüsselfaktoren des vorgeschlagenen formalisierten Modells der PGE in Verbindung gebracht werden kann.

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 wird die erste Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit in Abbildung 8.6 bestätigt.

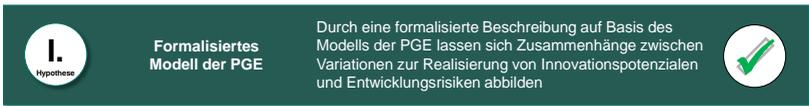


Abbildung 8.6: Die erste Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die Ergebnisse in Kapitel 5 bestätigt.

In Kapitel 6 wird als erstes untersucht, inwieweit die gefundenen Zusammenhänge bisher in Methoden zur Chancen-Risiko-Analyse von Lösungsalternativen bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen berücksichtigt sind (Abschnitt 6.1). Die Ergebnisse werden in Methoden-Benchmarks wie in Abbildung 8.7 gezeigt zusammengefasst.

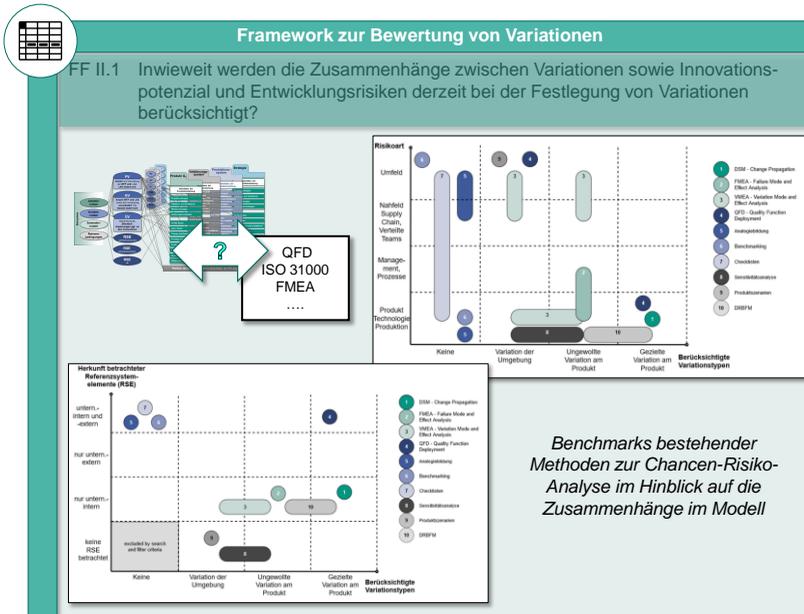


Abbildung 8.7: In Methoden-Benchmarks wird gezeigt, inwieweit die im formalisierten Modell der PGE beschriebenen Zusammenhänge in bestehenden Methoden zur Chancen-Risiken-Analyse berücksichtigt sind.

Es zeigt sich, dass die Zusammenhänge aus dem formalisierten Modell der PGE bisher nur unzureichend in bestehenden Ansätzen berücksichtigt sind. Es wird daher ein Framework zur Ableitung und Bewertung von Variationen entwickelt, wobei drei Bausteine beispielhaft implementiert und evaluiert werden. Abbildung 8.8 zeigt das Ergebnis im Überblick.

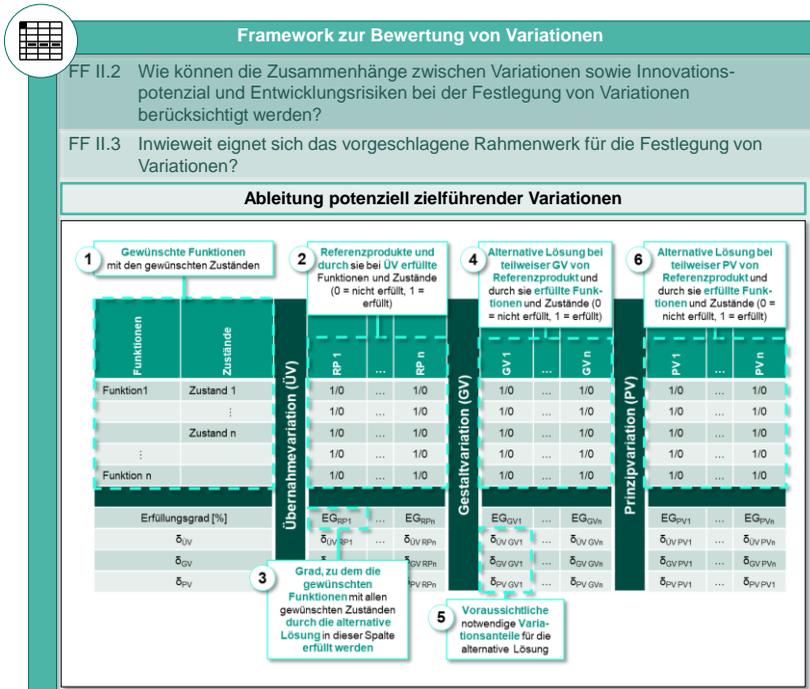


Abbildung 8.8: Zur Adressierung der zuvor erkannten Bedarfe bei bisherigen Methoden zur Chancen-Risiken-Analyse in der Produktentwicklung wird entlang dreier beispielhafter Bausteine ein Framework zur Ableitung und Bewertung von Variationen entwickelt und evaluiert (Teil 1, Fortsetzung in Abbildung 8.9).

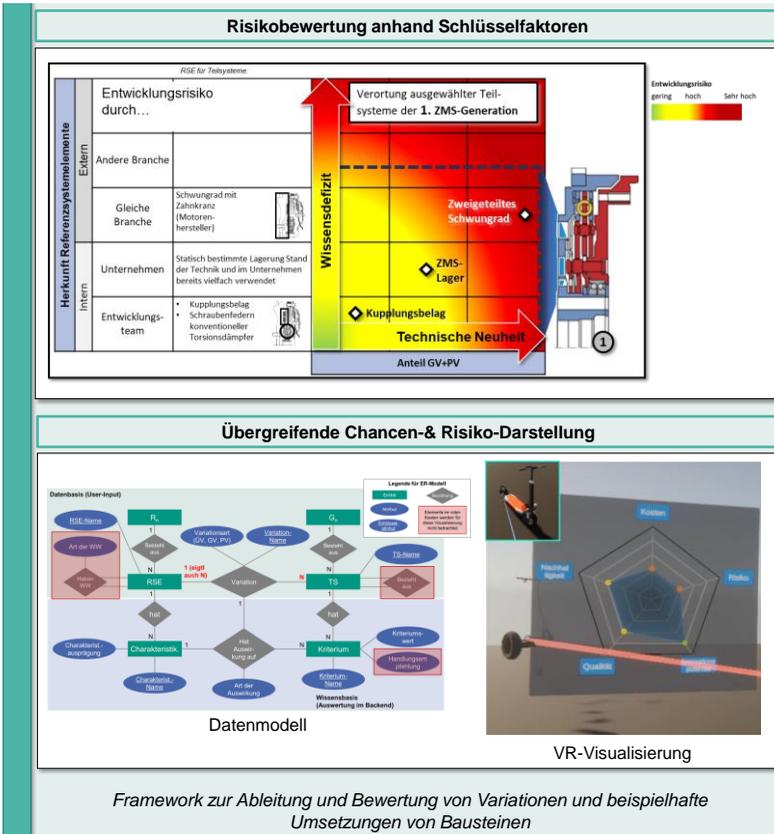


Abbildung 8.9: Zur Adressierung der zuvor erkannten Bedarfe bei bisherigen Methoden zur Chancen-Risiken-Analyse in der Produktentwicklung wird entlang dreier beispielhafter Bausteine ein Framework zur Ableitung und Bewertung von Variationen entwickelt und evaluiert (Fortsetzung von Abbildung 8.8)

Im ersten Baustein wird gezeigt, wie ausgehend von Anforderungen an eine neue Produktgeneration und potenziellen Referenzsystemelementen Variationen für potenziell zielführende Lösungskonzepte abgeleitet werden können (Abschnitt 6.2). Grundlage ist dabei die Analyse des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs der in Frage kommenden Referenzsystemelemente. Dabei stellen sich Übernahmevariationen als zielführend heraus, wenn ein Referenzsystemelement bereits alle an die neue Produktgeneration gestellten Anforderungen erfüllt. Ist eine für die neue Produktgeneration angestrebte Funktion in den verfügbaren Referenzsystemelementen zwar prinzipiell vorhanden, aber nicht in allen gewünschten Funktionszuständen ausgeprägt, kann eine Gestaltvariation zielführend sein. Fehlt eine Funktion völlig in den zur Verfügung stehenden Referenzsystemelementen, lassen sich die Anforderungen an die neue Produktgeneration potenziell durch eine Prinzipvariation erfüllen. Im entwickelten Vorgehen können Referenzsystemelemente aus unterschiedlichen Quellen kombiniert werden. Anhand von Variationsanteilen der abgeleiteten Variationen können sowohl verschiedene alternative Konzepte initial bewertet werden als auch Referenzsystemelemente identifiziert werden, die hohe Übernahmeanteile ermöglichen und sich daher besonders als Ausgangspunkt für die Entwicklung der neuen Produktgeneration eignen. Der Ansatz wird in einem Fallbeispiel eines Automobil-Zulieferers evaluiert. Damit wird ein Lösungskonzept für eine neue Produktgeneration abgeleitet, die anschließend ausführlichen Validierungsaktivitäten unterzogen wurde. Die initiale Konzept- und Referenzsystemelement-Bewertung decken sich dabei mit Experteneinschätzungen. Der Ansatz wird in dieser Hinsicht erfolgreich evaluiert.

Darüber hinaus wird festgestellt, dass die organisatorische Herkunft von Referenzsystemelementen ebenfalls ein wichtiger Faktor bei der Konzeptbewertung und -auswahl darstellt, da er beispielsweise mit der Möglichkeit zur Weiterverwendung vorhandener Produktionskapazitäten verbunden ist. Diese Beobachtung bestätigt die gewählte Modellstruktur in Kapitel 5.

Darauf aufbauend wird im zweiten Baustein ein Ansatz entwickelt, um unter Verwendung von Variationsarten und der organisatorischen Herkunft von Referenzsystemelementen als Schlüsselfaktoren gemäß des vorgeschlagenen formalisierten Modells der PGE Lösungskonzepte für neue Produktgeneration im Hinblick auf das assoziierte Entwicklungsrisiko zu bewerten (Abschnitt 6.3).

Eine Zunahme des kombinierten Gestalt- und Prinzipvariationsanteils erhöht tendenziell das Entwicklungsrisiko auf Grund der damit zunehmenden technischen Neuheit des zu entwickelnden Systems.

Die organisatorische Herkunft von Referenzsystemelementen wirkt sich ebenfalls auf das Entwicklungsrisiko aus, wobei dieses tendenziell zunimmt, wenn verwendete Referenzsystemelemente

- nicht aus dem gleichen Entwicklungsteam stammen, da der Zugang zu implizitem Wissen dann erschwert ist,
- einen unternehmens-externen Ursprung haben, da dann technische Dokumentation und Zielsysteminformationen schwerer zugänglich sind,
- anderen Branchen als der eigenen entstammen, da dann tendenziell weniger Kontext- und Methodenwissen über diese Elemente im eigenen Unternehmen verfügbar ist
- Forschungsaktivitäten entstammen und daher beispielsweise noch nie in einem realen Marktumfeld eingesetzt waren

Die beschriebenen Tendenzen werden mit Hilfe eines Portfolio-Ansatzes visualisiert. Für eine detailliertere Risikoeinschätzung wird der Ansatz ähnlich einer Checkliste mit Wissen aus früheren Entwicklungsaktivitäten ergänzt. In der vorliegenden Arbeit werden dazu Erkenntnisse genutzt, die in den 13 Fallbeispielen in Kapitel 5 gewonnen wurden.

In einer ersten Fallstudie im Rahmen des Live-Labs IP ist der Ansatz geeignet, die Zahl identifizierter Entwicklungsrisiken zu einem bestimmten Zeitpunkt deutlich zu erhöhen. In einer zweiten Fallstudie bei der Entwicklung des Lasthandlings für einen urbanen Logistikassistenten wird eine erste Quantifizierung des Entwicklungsrisikos vorgenommen.

Darüber hinaus kann dort der zeitliche Verlauf der Risikobewertung näher beobachtet werden. Dabei wird deutlich, dass sich die Systemstruktur, auf deren Basis eine Bewertung des Lösungskonzepts stattfindet, mit zunehmendem Wissen über das System konkretisiert. Es findet so eine Konkretisierung von Lösungsräumen statt, wobei die jeweilige Lösungsraumstruktur zum Ende eines Entwicklungsabschnitts Definitionsgrundlage für die Festlegung von Variationen im nächsten Entwicklungsabschnitt darstellt.

Im dritten Baustein (Abschnitt 6.4) werden die Zusammenhänge zwischen Variationen und Charakteristika von Referenzsystemelementen sowohl mit Innovationspotenzial als auch mit Entwicklungsrisiken zur Bewertung von Lösungskonzepten umfassend dargestellt. Für den Umgang mit der damit einhergehenden Informationsmenge wird für die Tool-Umsetzung auf eine VR-Umgebung und ein Konzept zur bedarfsgerechten Anzeige detaillierter Informationen zurückgegriffen. Es wird so eine ganzheitliche Entscheidungsunterstützung für die Bewertung von Variationen auf Basis eines Referenzsystems gegeben.

Damit wird die zweite Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit in Abbildung 8.10 bestätigt.



**II.**  
Hypothese

**Framework zur Bewertung von Variationen**



Die Festlegung von Variationen bedarf einer Chancen-Risiken-Abwägungen, für die die Auswirkungen von Variationen auf Entwicklungsrisiken ebenso zu berücksichtigen sind wie die Erfüllung von Zielen zur Realisierung von Innovationspotenzial

Abbildung 8.10: Die zweite Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die Ergebnisse in Kapitel 6 bestätigt.

In Kapitel 7 wird anhand der fünf ausgewählten Beispiele in Abbildung 8.11 gezeigt, wie Entwicklungsaktivitäten mit Hilfe der Erkenntnisse aus den vorangehenden Kapiteln variationspezifisch methodisch unterstützt werden können.

Methode

**Variationsspezifische Methoden**

FF III.1 Inwieweit ist die Planung und methodische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten bisher auf unterschiedliche Variationen abgestimmt?

FF III.2 Wie können Entwicklungsaktivitäten und ihre methodische Unterstützung auf unterschiedliche Variationsarten abgestimmt werden?

FF III.3 Inwieweit eignen sich die vorgeschlagenen Vorgehensweisen zur zielgerichteten Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten in der PGE?



**Beispiele methodischer Unterstützung**

**Optimierung von Fliehkraftpendeln in Antriebsstranganwendungen**



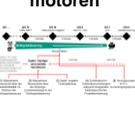
**Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten**



**Effiziente Gestaltung von Führungslenkern**



**Reifegradabsicherung im Serienanlauf von Fahrzeugmotoren**



**PGE in Workshops zur Maschinenkonstruktionslehre**



Abbildung 8.11: Anhand von fünf ausgewählten Beispielen wird in Kapitel 7 gezeigt, wie Entwicklungsaktivitäten variationspezifisch unterstützt werden können.

Im Fallbeispiel der Optimierung von Fliehkraftpendeln werden prinzipiell unterschiedliche Lösungsrichtungen als Variationen eingeordnet (Abschnitt 7.1). Den verschiedenen Variationsarten können direkt unterschiedliche zu erwartende Entwicklungsaktivitäten zur Realisierung zugeordnet werden. Damit wird es möglich, einzelne Lösungskonzepte anhand der dafür notwendigen Variationsart zielgerichtet zu planen und methodisch zu unterstützen. Darüber hinaus kann das Wissen um erforderliche Entwicklungsaktivitäten bei der Umsetzung eines Konzepts bei der Konzeptbewertung und -auswahl unterstützen.

Am Fallbeispiel der Last- und Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten in Abschnitt 7.2 wird gezeigt, wie durch die systematische Nutzung von Informationen über Referenzsystemelemente Entwickelnde früh bei der Gestaltung von Teilsystemen unterstützt werden können. Im gewählten Beispiel können früh Aussagen über Teilsystembeanspruchungen in neuen Antriebsstrang-Produktgenerationen und damit verbundene Lebensdauerabschätzungen gemacht werden, noch bevor die Gestalt oder Konfiguration der künftigen Antriebsstrang-Produktgeneration vollständig spezifiziert sind. Damit wird es für Entwickelnde zum einen möglich, Variationsarten für einzelne Teilsysteme zu konkretisieren. Es kann beispielsweise abgeschätzt werden, ob bestimmte Anforderungen noch mit einer Übernahmevariation eines zur Verfügung stehenden Referenzsystemelements erfüllt werden können oder nicht. Umgekehrt kann auch, sofern der Lösungsraum in Form einer anzustrebenden Variationsart spezifiziert ist, abgeleitet werden, welche Anforderungen sich daraus bei der Gestaltung des Restsystems ergeben.

Auch im Fallbeispiel der Gestaltung von Zugstreben für Fahrzeuglenkungen (Abschnitt 7.3) spielt die systematische Nutzung von Wissen über Referenzsystemelemente eine Schlüsselrolle. Durch Prozess- und Bauteilanalysen von unternehmensinternen Referenzsystemelementen wird es hier möglich, bei Eingang einer neuen Kundenspezifikation durch Vergleich mit bereits bestehenden Bauteilen einen Startpunkt für die Gestaltung des neuen Bauteils zu identifizieren, von dem aus möglichst wenig Iterationen benötigt werden. Weiterhin erlaubt ein Vergleich gegebener Design-Restriktionen in der neuen Kundenspezifikation mit Gestaltparametern von Referenzsystemelementen früh eine Einschätzung darüber, ob die geforderte Kundenspezifikation unter den beigegebenen Randbedingungen überhaupt realisierbar ist. Außerdem können mit Hilfe der Analyse von Gestaltungsaktivitäten bei Referenzsystemelementen aus einer auf Grund der Bauteilkomplexität großen Menge an Gestaltparametern ausgewählte Stellhebel identifiziert werden. Auf Basis dieser Stellhebel sind zum einen Optimierungsansätze möglich, um Entwickelnde bei der Gestaltung von Zugstreben weiter zu unterstützen. Zum anderen können anhand der identifizierten Stellhebel erfolgreiche Vorgehensweisen bei der Bauteilgestaltung expliziert und damit unabhängig von der Erfahrung einzelner Entwickelnder bereitgestellt werden. Darüber hinaus begünstigt eine Vereinheitlichung des Vorge-

hens bei der Bauteilgestaltung die künftige Wiederverwendung als Referenzsystemelement.

Im Fallbeispiel der Reifegradabsicherung von Fahrzeugteilsystemen im Serienanlauf werden aus der Analyse von Referenzsystemelementen und deren Entwicklungsprozessen Erkenntnisse darüber gewonnen, wie Variationen in der Reifegradabsicherung im Hinblick auf die Erreichung von Projektzielen kritisch sein können (Abschnitt 7.4). Dabei gelingt es, wiederkehrende Muster und Ursachen zu identifizieren, anhand derer für künftige Serienanläufe Maßnahmen zur Vermeidung oder, falls dies nicht möglich ist, besseren Handhabung von kritischen Variationen abzuleiten. Zusätzlich können anhand der exemplarisch betrachteten Teilsysteme Faktoren beobachtet werden, die auch bei anderen Teilsystemen und in anderen Projekten dazu führen können, dass Variationen kritische Auswirkungen haben. Mit Hilfe dieser in der Analyse von Referenzsystemelementen und deren Entwicklungsprozessen erhobenen Faktoren kann daher die Reifegradabsicherung projektübergreifend unterstützt werden.

In jedem der ersten vier Fallbeispiele kommt unternehmensinternen Referenzsystemelementen und dem damit verbundenen Produkt- und Prozesswissen eine besondere Bedeutung zu. Im fünften Fallbeispiel wird beschrieben, wie ausgehend von dieser Erkenntnis das Konzept zur Projektarbeit in der Veranstaltung Maschinenkonstruktionslehre IV erweitert wird (Abschnitt 7.5). Dabei wird die Praxisorientierung der Projektarbeit von studentischen Entwicklungsteams weiter gesteigert, indem gezielt eine Entwicklung auf Basis zentral bereitgestellter Referenzsystemelemente und der zugehörigen technischen Dokumentation ermöglicht wird. Dadurch wird ein Umfeld geschaffen, in dem bereits im Studium Methoden für die variationsspezifische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten entwickelt, evaluiert und vermittelt werden können.

Das gewählte Konzept für die Projektarbeit führt sogar dazu, dass die Studierenden am Beispiel der Erstellung von Prinzipskizzen von sich aus methodische variations-spezifische Arbeitsweisen entwickeln, die unmittelbar als Methoden für inkrementelles und iteratives Arbeiten im Agile Systems Design in der Entwicklungspraxis von Unternehmen genutzt werden können.

Mit diesen Ergebnissen und Erkenntnissen aus Kapitel 7 wird die dritte Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit in Abbildung 8.12 bestätigt.

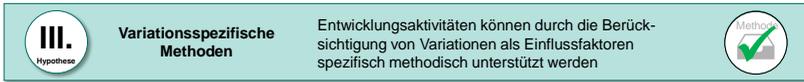


Abbildung 8.12: Die dritte Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die Ergebnisse in Kapitel 7 bestätigt.

Insgesamt wird in der vorliegenden Arbeit eine formalisierte Beschreibung des Modells der PGE mit einem Rahmenwerk zur Chancen-Risiken-Analyse bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen und einer situationsspezifischen methodischen Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten verknüpft. Es wird damit auch die zentrale Forschungshypothese der Arbeit in Abbildung 8.13 bestätigt (s. Abschnitt 3.3).

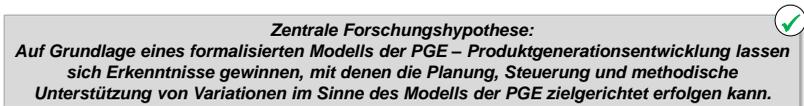


Abbildung 8.13: Die zentrale Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit wird durch die gewonnenen Erkenntnisse bestätigt.

Die Erkenntnisse der Arbeit beruhen auf Fallbeispielen, Beobachtungen und Ergebnissen eines Querschnitts aus unterschiedlichen Branchen mit dem Schwerpunkt auf verschiedenen mechatronischen Systemen. Mit der Arbeit wird aufgezeigt, welche Zusammenhänge zwischen Variationen und Charakteristika gewählter Referenzsystemelemente einerseits sowie Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiken andererseits bestehen können. Eine vergleichende Relevanzeinschätzung und Gewichtung unterschiedlicher Zusammenhänge, einhergehend mit einer empirisch basierten Quantifizierung unterliegt verschiedenen Einflüssen, die in unterschiedlichen Produkt-, Unternehmens- und Branchenumfeldern unterschiedlich ausgeprägt sein können. Diese Einflüsse näher und spezifisch zu untersuchen muss Gegenstand künftiger Arbeiten sein. Mit der vorliegenden Arbeit ist hierfür die konzeptionelle Grundlage auf Basis des Modells der PGE gegeben.

Mit der vorliegenden Arbeit wird in diesem Sinne ein Beitrag geleistet zur empirisch basierten Planung, Steuerung und methodischen Unterstützung von Variationen auf der Basis eines Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Mit diesem Beitrag wird ein einheitliches Fundament gelegt für künftige Untersuchungen zur abgestimmten Entwicklung integriert verwendbarer Methoden und Prozesse auf der Basis des Modells der PGE. Diese Aktivitäten werden am IPEK operativ im Forschungsfeld der PGE – Produktgenerationsentwicklung gebündelt und koordiniert. Im nächsten Kapitel wird ein Überblick über zentrale laufende und künftige Vorhaben in diesem Forschungsfeld auf Grundlage der vorliegenden Arbeit gegeben.



# 9 Ausblick

Die Erforschung von Methoden und Prozessen der Produktgenerationsentwicklung auf Basis des Modells der PGE wird am IPEK im Forschungsfeld PGE gruppenübergreifend koordiniert. In Abbildung 9.1 ist die Struktur des Forschungsfelds ausgehend von dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten formalisierten Modell der PGE sowie weiteren Ergebnissen zu sehen sowie die Verortung laufender Vorhaben in den verschiedenen Bereichen.

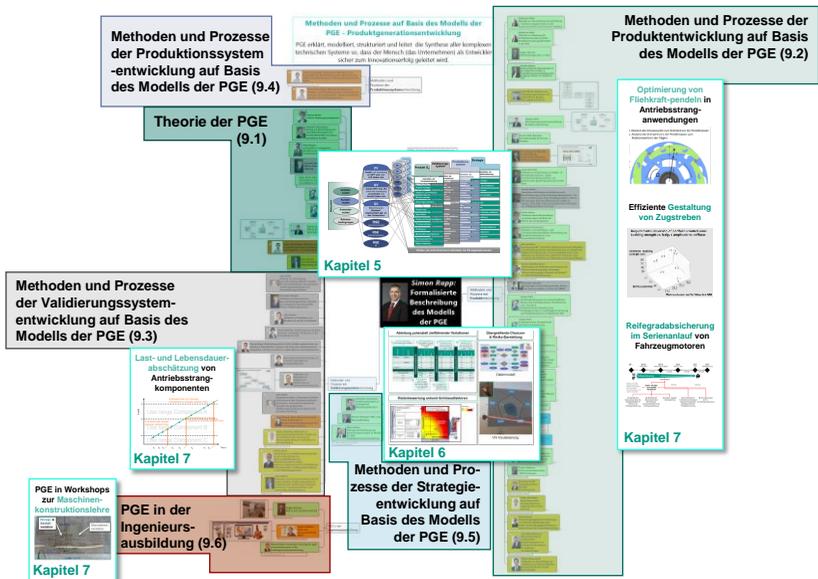


Abbildung 9.1: Struktur des Forschungsfelds PGE am IPEK, ausgehend von dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Modell und den weiteren Ergebnissen, sowie Verortung laufender Arbeiten in den verschiedenen Teilbereichen. Auf die Teilbereiche wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Die Erforschung von Methoden und Prozessen ist dabei entsprechend den Ebenen des iPeM (s. Abschnitt 2.3.2) gegliedert. Weitere Teilbereiche im Forschungsfeld sind darüber hinaus die Theorie der PGE und PGE in der Ingenieursausbildung. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die einzelnen Bereiche und ausgewählte dort laufende und kommende Aktivitäten gegeben. Mehrere Vorhaben haben dabei die Methoden- und Prozessentwicklung über mehrere Bereiche hinweg zum Gegenstand. Sie sind im Forschungsfeld in diesen Fällen entsprechend ihrem Schwerpunkt verortet.

## 9.1 Theorie und Modell der PGE

Abbildung 9.3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten zur Theorie und zum Modell der PGE.



Abbildung 9.2: Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten zur Theorie und dem Modell der PGE.

In der vorliegenden Arbeit stellen die C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren für Variationen auf die Gestalt bzw. den Gestalt-Funktion-Zusammenhang von Systemen ab. Beobachtungen zeigen, dass vergleichbare Phänomene wie die variationspezifischen



Unter Berücksichtigung dieses Aspekts sowie der zunehmenden Bedeutung der Entwicklung von Systemen innerhalb eines Systemverbunds, der System-of-Systems-Charakter hat, kann darüber hinaus in Weiterentwicklung des Modells der PGE von einem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung gesprochen werden (Albers, Rapp et al., 2017).

Gerade in der Entwicklung komplexer Systeme sind dort große Datenmengen zu erwarten, wenn während des Entwicklungsprozesses Variationen und relevante Charakteristika verwendeter Referenzsystemelemente erfasst werden sollen. Eine informationstechnische Unterstützung dieser Analysen ist daher essentiell. Sie setzt jedoch eine hinreichend formale mathematische Beschreibung der Abbildung eines Referenzsystems in eine neue Systemgeneration voraus. Hierfür laufen zum Zeitpunkt der Einreichung der vorliegenden Arbeit Kooperationsaktivitäten unter anderem mit dem KIT-Zentrum „Mathematics in Sciences, Engineering, and Economics“ (KIT-Zentrum MathSEE, 2020).

Aufbauend auf derartigen Daten und Mechanismen können zum einen auf Basis von Variationen in den unterschiedlichen Sichten eines Systems sowie Charakteristika der verwendeten Referenzsystemelemente Kennzahlen zur Potenzial- und Risikoeinschätzung bei der Entwicklung einer neuen Systemgeneration entwickelt und berechnet werden. Zum anderen ist zu untersuchen, welche statistischen Korrelationen zwischen den verschiedenen Variationsarten in den unterschiedlichen Sichten auf ein System bestehen. Ein Beispiel ist die Wahrscheinlichkeit, mit der die Prinzipvariation einer Eigenschaft auch zu einer Prinzipvariation in der Funktionssicht und auf Ebene der physischen Ausgestaltung führt. Erste Anhaltspunkte hierzu beschreiben ALBERS UND FAHL ET AL. (2020).

Mit Hilfe von Variationsanteilen, auch in Produktions- und Validierungssystem sowie Charakteristika von Referenzsystemelementen können darüber hinaus weit verbreitete, bisher aber außerhalb des Modells der PGE oft unscharf definierte und unterschiedlich aufgefasste Konstrukte wie eine „Produktgeneration 1“ näher beschrieben werden. Diese Beschreibung bietet mit Hilfe von Zusammenhängen, wie sie in der vorliegenden Arbeit dargestellt wurden, zwischen Variationsarten und -anteilen sowie Charakteristika von Referenzsystemelementen auf der einen Seite und erforderlichen Entwicklungsaktivitäten und zu erwartenden Entwicklungsrisiken auf der anderen Seite, Anhaltspunkte zur Ableitung von Maßnahmen für den Umgang mit den besonderen Herausforderungen einer „Produktgeneration 1“. Dies wird unter Einbezug mehrerer Fallbeispiele aus Promotionsvorhaben von ALBERS, EBERTZ ET AL. (2020) untersucht und beschrieben.

Die Entstehung neuer Produktgenerationen als Ergebnis des Wechselspiels bestehender technischer Systeme mit sich ändernden Marktbedingungen kann, wie auch im Konzept der technischen Vererbung angedeutet (s. Abschnitt 2.4.3), als Analogie zur natürlichen Evolution betrachtet werden. Das Modell der PGE bietet mit der Be-

schreibung von Variationen auf der Ebene von Teilsystemen sowie den vorgeschlagenen C&C<sup>2</sup>-A-basierten Indikatoren Zugang zur „DNA“ technischer Systeme. Gleichzeitig besteht über die Beziehung zwischen Variationen und Zielsysteminhalten eine Verbindung zu den veränderlichen Marktbedingungen. Davon ausgehend kann untersucht werden, ob über mehrere Produktgenerationen, ggf. auch bei verschiedenen Produkten, Muster in der „DNA“-Entwicklung als erfolgreiche Reaktion auf veränderliche Marktbedingungen beobachtet werden können. Eine explizite Beschreibung dieser Reaktionen und Überführung in Vorgehensstrategien für die Entwicklung neuer Produkte bietet das Potenzial, technische Evolutionsmechanismen gezielt zu steuern und zu nutzen. Dieser Frage wird im Rahmen eines Forschungsantrags bei der DFG nachgegangen<sup>1</sup>.

## **9.2 Methoden & Prozesse: Produktentwicklung auf Basis des Modells der PGE**

Auf Basis des Modells der PGE wird am IPEK ein großes Spektrum an Methoden und Prozessen zur Entwicklung neuer Systemgenerationen erforscht und entwickelt. Einen Überblick mit einem entsprechenden Ausschnitt des Forschungsfelds PGE ist in Abbildung 9.8 zu sehen.

---

<sup>1</sup> Aktuell in Ausarbeitung befindlicher Forschungsantrag, an der der Autor der vorliegenden Arbeit mitwirkt



Abbildung 9.4: Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten zur Entwicklung von Methoden und Prozessen der Produktentwicklung.

Die adressierten Themen reichen von Geschäftsmodellentwicklung und standortverteilter Zusammenarbeit über Änderungsmanagement, Gewichtsverzielung, Modellierung von Prinzip und Gestalt bis hin zu systemgenerations-übergreifenden MBSE- und Wissensmanagementansätzen, um nur einige zu nennen. In den folgenden Abschnitten wird eine Auswahl laufender Projekte vorgestellt.

Im Hinblick auf den Entwicklungsprozess ist eine nähere Modellierung und empirische Untersuchung der zeitlich veränderlichen Lösungsraumstruktur von Interesse, auf deren Grundlage jeweils iterativ Variationen für das nächste Entwicklungskrement definiert werden (vgl. auch Abschnitt 5.3.3 und 6.3.3). Für die sukzessive Strukturierung des Lösungsraums und dessen Charakterisierung in Form der Ableitung potenziell zielführender Variationen sind geeignete Ansätze notwendig. Hierfür wird derzeit in einem DFG-geförderten Vorhaben am IPEK, unter anderem aufbauend auf der Arbeit von WINTERGERST (2015) zur deduktiven Gestaltvariation, eine „Methodik zur Ableitung von Variationen in der PGE auf der Basis teil-quantifizierter Gestalt-Funktion-Modelle am Beispiel zwangserregten Kupplungsrupfens“<sup>2</sup> erforscht. Gleichzeitig müssen Entwickelnde befähigt werden, von sich aus zu wissen, welche Variation sie durchführen. Dies ist notwendig, um von sich aus zu erkennen, ob sich ihr Handeln noch im Rahmen getroffener Planungsprämissen bewegt oder nicht, um gerade im letztgenannten Fall gegebenenfalls notwendige Abstimmungsprozesse zu veranlassen.

Als Grundlage zur Planung von Variationen ist zu untersuchen, inwiefern Muster im Zusammenhang zwischen Gründen für Variationen, der schließlich gewählten Variationsart selbst und deren Auswirkungen, insbesondere in Form von notwendigen Aktivitäten der Produktentstehung, zu finden sind. Dabei ist zu untersuchen, welchen Gültigkeitsbereich im Sinne von Produkt, Produktfamilie oder Unternehmen diese Muster haben und welchen Streuungen die gefundenen Zusammenhänge über mehrere Produktgenerationen hinweg unterliegen. Auf Grundlage solcher Erkenntnisse können Entwicklungsgenerationen im ASD (s. Abschnitt 2.3.3) agil geplant werden. Auf Grundlage der Zusammenhänge zwischen Variationen und Aktivitäten der Produktentstehung können Planungsunterstützungen für Entwickler bereitgestellt und in gängigen Tools, beispielsweise Jira, implementiert werden.

Variationen führen bei der systemgenerations-übergreifenden Verwendung von Produktmodellen (s. Abschnitt 2.2.3) zu partiellen Änderungen und damit zu Inkonsistenzen. Diese können, selbst bei Verknüpfung von Modellen, in aller Regeln nur teilweise automatisiert beseitigt werden. Zur vollständigen Behebung von Inkonsistenzen sind daher geeignete Methoden bereitzustellen. Dies ist Gegenstand eines

---

<sup>2</sup> Titel des Vorhabens: „Erarbeitung einer Methodik zur Ableitung von Variationen in der PGE auf der Basis teil-quantifizierter Gestalt-Funktion-Modelle am Beispiel zwangserregten Kupplungsrupfens“

zum Zeitpunkt der Einreichung der Arbeit in Beantragung befindlichen Vorhabens<sup>3</sup>. Weitere Herausforderungen für die künftige Produktentstehung ergeben sich unter anderem durch die zunehmende Vernetzung und Integration verschiedener Domänen bei der Entwicklung eines Systems, einschließlich Geschäftsmodellen, Entwicklung in System-Verbänden mit System-of-Systems-Charakter sowie die weiter fortschreitende Digitalisierung. Diese Herausforderungen werden im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Wissenschaftliches Projekt ‚Vernetzung der Akteure zur disziplinübergreifenden Entwicklung komplexer vernetzter sozio-technischer Systeme für die Wertschöpfung von morgen (Advanced Systems Engineering)‘ (AdWiSE)“<sup>4</sup> detailliert untersucht. Schlüssel zur Bewältigung der Herausforderungen ist ASE – Advanced Systems Engineering. Dabei handelt es sich um eine modellbasierte und systemorientierte Entwicklungssystematik, die unter anderem Elemente des Systems Engineering und des ASD integriert. Wesentliche Grundlage für die Beschreibung der Entstehung neuer Systeme ist dabei das Modell der PGE. In AdWiSE identifizierte Herausforderungen werden darauf aufbauend im Projekt „MoSys - Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems“<sup>5</sup> adressiert.

Weiter sind künftig im ASD Ansätze zur Entwicklung von Produktarchitekturen zu untersuchen, in denen Variationen in agilen Entwicklungsumfeldern begünstigt werden. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass durch gewählte Produktarchitekturen Auswirkungen der Variation einzelner Teilsysteme begrenzt werden.

Ein weiteres wichtiges Themenfeld stellen Methoden der Referenzsystementwicklung und des variationsspezifischen Wissensmanagements dar. Eine zentrale Aufgabe von Entwickelnden ist die kontinuierliche Entwicklung und Analyse des Referenzsystems. Hier bedarf es geeigneter Methoden zur Suche nach potenziellen Referenzsystemelementen sowie der Analyse und schlussendlichen Auswahl dieser.

Im Wechselspiel mit variationsspezifischen Methoden stehen die variations- und situationsspezifische Bereitstellung von Wissen. Hier ist ein zum Zeitpunkt der Einreichung der vorliegenden Arbeit bereits laufendes, von der DFG gefördertes und vom IPEK in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik – Prozesse und

---

<sup>3</sup> In Beantragung befindliches SFB-Vorhaben, Mitwirkung des Autors der vorliegenden Arbeit

<sup>4</sup> In Bearbeitung befindliches Verbundvorhaben mit Beteiligung IPEK, neben aca-tech, Fraunhofer IEM, Fraunhofer IPK und Fraunhofer IAO, Mitarbeit des Autors der vorliegenden Arbeit

<sup>5</sup> Verbundvorhaben im Rahmen der BMBF-Ausschreibung „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA\_ASE)“

Systeme der Universität Potsdam durchgeführtes Vorhaben, verortet<sup>6</sup>. Ziel dabei ist es, insbesondere die Qualität des Wissenstransfers in der Frühen Phase der PGE zu verbessern. Besondere Bedeutung hat die situationsspezifische Wiederverwendung von Wissen auch für eine systemgenerations-übergreifend effiziente Validierung von komplexen Systemen. Hierzu tragen Methoden und Prozesse der Validierungssystementwicklung bei.

### **9.3 Methoden & Prozesse: Validierungssystementwicklung auf Basis des Modells der PGE**

Die Erforschung von Methoden und Prozessen der Validierungssystementwicklung ist ebenfalls Gegenstand des bereits angesprochenen Vorhabens MoSys. Weitere laufende, in Abbildung 9.5 aufgeführte Vorhaben adressieren verschiedene Teilaspekte einer systemgenerations-übergreifend effizienten Validierung am Beispiel der Fahrzeugvalidierung.

---

<sup>6</sup> In Bearbeitung befindliches Vorhaben „Faktoren der Beeinflussung der Wissensübertragung im Prozess der Produktentwicklung – Fortsetzungsantrag: Qualitätssteigerung des Wissenstransfers in der Produktgenerationsentwicklung“



Abbildung 9.5: Laufende Vorhaben zur Erforschung von Methoden und Prozessen der Validierungssystementwicklung auf Basis des Modells der PGE (ausschnittsweise Darstellung aus Abbildung 9.1).

In einem weiteren, in Beantragung befindlichen Vorhaben soll am IPEK in Kooperation mit dem Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart untersucht werden, inwieweit Wissen aus der Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen nach Variationen wiederverwendet werden kann und inwiefern neue Absicherungsaktivitäten notwendig sind<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Zum Zeitpunkt der Einreichung der vorliegenden Arbeit bei der DFG in Beantragung befindliches Vorhaben, an dem der Autor der vorliegenden Arbeit mitgewirkt hat

## 9.4 Methoden & Prozesse: Produktionssystementwicklung auf Basis des Modells der PGE

Ebenso wie die Entwicklung des Validierungssystems muss die Entwicklung des Produktionssystems parallel zur Produktentwicklung erfolgen. Variationen am Produkt können Variationen am Produktionssystem und damit Aktivitäten der Produktionssystementwicklung erforderlich machen (vgl. z.B. Abschnitt 5.1). Umgekehrt können sich aus dem Produktionssystem Variationen beispielsweise die Vorgabe zur Übernahmevariation bestehender Produktionsanlagen auf die Produktentwicklung auswirken (s. z.B. Abschnitt 6.2). Darüber hinaus können Daten aus der laufenden Produktion eines Systems einen wichtigen Informationsrückfluss in die Produktentwicklung darstellen. Die Untersuchung der Wechselwirkung von Produkt und Produktionssystem auf Basis des Modells der PGE findet am IPEK unter anderem im Rahmen des Projekts I4TP statt. „Ziel des Forschungsprojekts I4TP ist (...) die Entwicklung einer softwaregestützten, modellbasierten, deutsch-chinesischen Fabrikautomatisierungsplattform zur schnellen und einfachen Konzeption und Inbetriebnahme schlüsselfertiger Produktionssysteme (Turnkeyproduktionssysteme) mit integrierter Produktberatung und Erstellung maßgeschneiderter Geschäftsmodelle“ (I4TP, 2020). Diese Vorhaben sind in dem Forschungsfeld-Ausschnitt in Abbildung 9.6 zu sehen.



Abbildung 9.6: Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit Arbeiten zur Wechselwirkung von Produkt und Produktionssystem.

In einem weiteren Vorhaben soll in Weiterentwicklung klassischer Recycling- und Aufbereitungsverfahren (Refurbishing) untersucht werden, wie Produktgenerationen am Ende einer Time-in-Market als Ausgangspunkt für die Herstellung einer

Nachfolgegeneration dienen können<sup>8</sup>. Dies erfordert als Grundlage eine systemgenerations-übergreifende Planung. Ansätze, um eine solche Planung zu ermöglichen werden am IPEK im Feld der Methoden und Prozesse zur Strategieentwicklung auf Basis des Modells der PGE erforscht.

## 9.5 Methoden & Prozesse: Strategieentwicklung auf Basis des Modells der PGE

Abbildung 9.7 zeigt laufende Arbeiten im Forschungsfeld PGE, die in Verbindung mit der Strategieentwicklung stehen.



Abbildung 9.7: Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE mit laufenden Arbeiten, die mit der Strategieentwicklung in Verbindung stehen.

Darüber hinaus werden künftig aufbauend auf den in Abschnitt 2.5.1.2 beschriebenen Arbeiten zur Zielsystementwicklung auf Basis des Modells der PGE in einem DFG-geförderten Projekt Ansätze der strategischen Vorausschau und der PGE integriert<sup>9</sup>. In Kooperation des Fraunhofer Institut Entwurfstechnik Mechatronik (IEM) und des IPEK wird untersucht werden, wie Systeme sowie die zugehörigen Service-systeme und Geschäftsmodelle zukunftsrobust über mehrere Systemgenerationen

<sup>8</sup> Geplante Projektbeantragung bei der DFG mit Beteiligung IPEK, Mitwirkung des Autors der vorliegenden Arbeit bei der Ausarbeitung des Projektantrags

<sup>9</sup> DFG-gefördertes Vorhaben „Zukunftsrobuste Produktentwicklung: Systematische Erweiterung des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung durch Adaption von Methoden der strategischen Produktplanung“, der Autor der vorliegenden Arbeit hat am Antrag mitgewirkt

und Produktlinien eine Produktportfolios hinweg (s. Abbildung 9.8) geplant und entwickelt werden können. Hierbei gilt es insbesondere, zielführende Variationen und Variationsanteile abzuleiten, zeitlich zu staffeln und in Abstimmung mit dem jeweiligen Entwicklungsfortschritt zu adaptieren und zu konkretisieren.

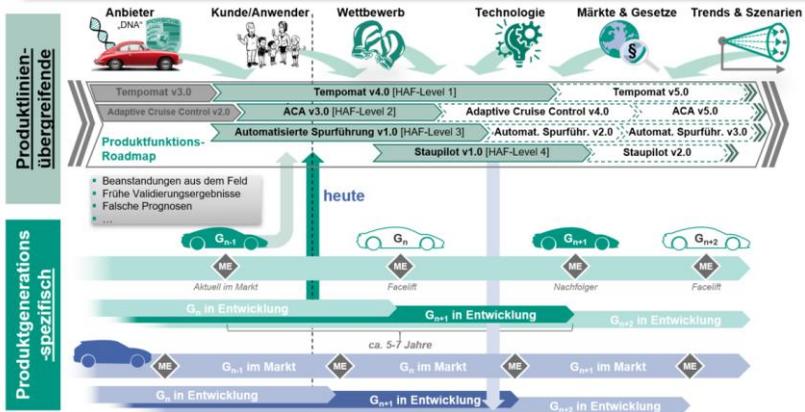


Abbildung 9.8: Beispielhafte Darstellung der Entwicklung von Produktfunktionen über mehrere Produktgenerationen und Produktlinien hinweg. Darstellung (IPEK, 2020b) auf Basis von Albers und Fahl et al. (2020).

Ziel ist eine Systematik auf Basis des Modells der PGE, die unter Verwendung von Ansätzen der strategischen Produktplanung eine solche Planung methodisch unterstützt. Aufbauend auf einer solchen Systematik können über langfristige Unternehmensziele hinaus beispielsweise auch gesellschaftliche Zielsetzungen an die Entwicklung neuer Produkte und Systeme mit erforderlichen Variationen in Verbindung gebracht werden.

Die Umsetzung langfristiger Ziele durch die dafür erforderlichen Variationen erfordert weiterhin auch eine entsprechende Adaption des Handlungssystems. Auch hier bildet die Beschreibung der Systementwicklung durch das Modell der PGE eine gute Ausgangsbasis. (Albers, Haug et al., 2016; Arslan et al., 2016)

Zur ersten Evaluation entwickelter Ansätze sind auch Live-Labs des Instituts von Bedeutung, die gleichzeitig dazu dienen, die auf Basis des Modells der PGE gewonnenen Erkenntnisse angehenden Ingenieurinnen und Ingenieuren zu vermitteln (s. auch Abschnitt 7.4).

## 9.6 PGE in der Ingenieursausbildung

Die Bedeutung von Live-Labs sowohl zur praxisorientierten Ausbildung als auch als Evaluationsmöglichkeit für neue methodische Ansätze wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel der Maschinenkonstruktionslehre (MKL) deutlich (s. Abschnitt 7.5). Eine Herausforderung in den Workshops der MKL ist bisher, dass die entwickelten Systeme im Allgemeinen auf Grund der gegebenen Rahmenbedingungen (Teilnehmerzahl, verfügbare Ressourcen) nicht prototypisch als Entwicklungsgenerationen realisiert werden können. Zur Untersuchung von Phänomenen, die dies erfordern, können jedoch zwei weitere Live-Labs des IPEK genutzt werden, die im Forschungsfeld-Ausschnitt in Abbildung 9.9 dargestellt sind.



Abbildung 9.9: Ausschnitt aus dem Forschungsfeld PGE zur Ingenieursausbildung, unter anderem mit den Live-Labs HECTOR School und MSuP (Mechatronische Systeme und Produkte).

Dies ist zum einen eine Projektarbeit mit berufsbegleitenden Studierenden der Hector School (HECTOR School, 2020), in der aufeinander aufbauende Produktgenerationen eines Roboters entwickelt werden. Zum anderen ist dies die Projektarbeit zur Veranstaltung Mechatronische Systeme und Prozesse (MSuP) (IPEK, 2020c). In MSuP werden in Abbildung 9.10 beispielhaft gezeigte Systeme entwickelt, deren Aufgabe es ist, auf einem definierten Spielfeld Bauklötze einzusammeln und zu Türmen zu stapeln. Dabei treten mehrere Teams in einem Wettbewerb gegeneinander an.

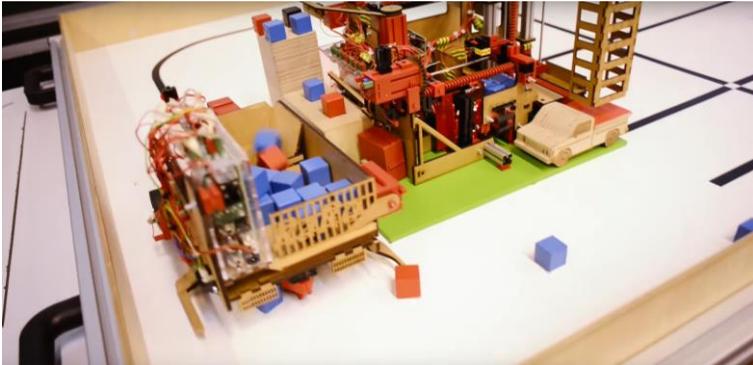


Abbildung 9.10: Im Rahmen von MSuP entwickeltes System. Die blauen und roten Klötze müssen aufgesammelt und vom entwickelten System zu Türen aufgestapelt werden. Bildschirmfoto von Video der MSuP Abschlussveranstaltung (KIT - Karlsruher Institut für Technologie, 2020).

MSuP bietet besonderes Potenzial zur empirischen Untersuchung von Phänomenen in der PGE mechatronischer Systeme, da durch ähnliche „Marktrandbedingungen“ in Form der Wettbewerbsbedingungen über verschiedene Jahrgänge hinweg eine gute Grundlage gegeben ist, Prozesse und Ergebnisse miteinander zu vergleichen, und so wichtige Einflussfaktoren auf die Ergebnisqualität erkennen zu können (S. Matthiesen, persönl. Mitteilung, 06.05.2020).

Die in den Abschnitten 9.1 bis 9.5 beschriebenen laufenden und kommenden Vorhaben auf Basis des Modells der PGE zeigen in Summe dessen Bedeutung für die entwicklungsmethodische Forschung von der Produkt- über die Produktionssystem- und Validierungssystem- bis hin zur Strategieentwicklung. Es bietet hier eine durchgängige Grundlage zur Erforschung von Methoden, Prozessen und Tools und ermöglicht als gemeinsame Basis deren integrierte Verwendung. Die explizite Ausrichtung von Live-Labs am Modell der PGE ergibt zum einen Forschungsumgebungen, in denen Methoden, Prozesse und Tools auf Basis des Modells der PGE unter kontrollierten und gleichzeitig praxisnahen Bedingungen entwickelt und evaluiert werden können. Zum anderen erlernen und erleben zukünftige Ingenieurinnen und Ingenieure das Modell der PGE als elementares Konzept der Produktentstehung und ihrer Methoden, Prozesse und Tools.



# Literaturverzeichnis

- Abernathy, W. J. (1981). *The Productivity Dilemma – Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Abramovici, M. & Chasiotis, C. (2002). Integrated Documentation of Procedural Knowledge in Product Development. In S. Susz (Hrsg.), *Proceedings of Integrated Product and Process Development (IPPD)* (S. 1–12). Wrocław: Oficyna Wydawnicza PW.
- Agogué, M. & Kazakçi, A. (2014). 10 Years of C–K Theory: A Survey on the Academic and Industrial Impacts of a Design Theory. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design. Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 219–235). London, UK: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_11)
- Ahmad, N., Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2010). When should design changes be allowed to accumulate? In *Proceedings of IDMME - Virtual Concept 2010* (n. p.). Bordeaux, Frankreich.
- Ahmad, N., Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2013). Change impact on a product and its redesign process: a tool for knowledge capture and reuse. *Research in Engineering Design*, 24(3), 219–244. <https://doi.org/10.1007/s00163-012-0139-8>
- Akao, Y. (1992). *QFD - Quality Function Deployment. Wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen* (Mi-Japan-Service). Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.
- Albers, A. (1994a). Fortschritte beim ZMS – Geräuschkomfort für moderne Kraftfahrzeuge. *LuK Kolloquium*, 5(5), 5–41.
- Albers, A. (1994b). Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In *Deutscher Konstruktivtag - Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel* (VDI-Berichte, Bd. 1120, S. 73–106). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Albers, A. (2003). Produktentwicklung - Heute und Morgen. *Konstruktion*, (11/12), 3–5. Editorial.
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In I. Horvath, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010 Symposium* (S. 343–356). Ancona, Italien.
- Albers, A. (07.12.2020). *Fotos von ZMS-Modellen* (Mail).
- Albers, A., Alink, T., Thau, S. & Matthiesen, S. (2008). Support of design engineering activity through C&CM – Temporal decomposition of design problems. In I.

- Horvath & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of the TMCE 2008* (n. p.). Izmir, Türkei.
- Albers, A., Basedow, G. N., Heimicke, J., Marthaler, F., Spadinger, M. & Rapp, S. (2020). Developing a common understanding of business models from the product development perspective. In K. Mporu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, 875-882).
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Carl Hanser Verlag.  
<https://doi.org/10.3139/9783446445819.019>
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Reiß, N. & Bursac, N. (2017). Agile Product Engineering through Continuous Validation in PGE – Product Generation Engineering. *Design Science*, 3(5), 16–35. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.5>
- Albers, A. & Braun, A. (2011). A Generalised Framework to Compass and to Support Complex Product Engineering Processes. *International Journal of Product Development*, 15(1-3), 6–25. Verfügbar unter: [http://www.inderscience.com/search/index.php?action=record&rec\\_id=43659&prevQuery=&ps=10&m=or](http://www.inderscience.com/search/index.php?action=record&rec_id=43659&prevQuery=&ps=10&m=or)
- Albers, A., Burkardt, N., Deigendesch, T. & Robens, G. (2009). Das Karlsruher Lehrmodell für Produktentwicklung (KaLeP) als Beispiel zur ganzheitlichen Integration von Projektarbeit in die universitäre Lehre. In H.-J. Linke (Hrsg.), 1. *Darmstädter Ingenieurkongress Bau und Umwelt* (o. S.). Darmstadt.
- Albers, A., Burkardt, N. & Ohmer, M. (2004). Principles for design on the abstract level of the Contact & Channel Model C&CM. In I. Horvath & P. Xirouchakis (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2004* (S. 87–94). Rotterdam: Millpress.
- Albers, A. & Bursac, N. (2019, Juli). *IPEK Roundtable: ASD – Agile Systems Design*, Karlsruhe.
- Albers, A., Bursac, N., Heimicke, J., Walter, B. & Reiß, N. (2017). 20 Years of Co-creation Using Case Based Learning. An Integrated approach for Teaching Innovation and Research in Product Generation Engineering. In M. E. Auer, D. Guralnick & I. Simonics (Hrsg.), *Teaching and Learning in a Digital World. Proceedings of the 20th ICL Conference* (Bd. 2, S. 636–647). Cham: Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-73204-6\\_69](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73204-6_69)
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2016). PGE – Product Generation Engineering – Case Study of the Dual Mass Flywheel. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojetic & S. Skec (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2016* (S. 791–800). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81(1), 13–31. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>

- Albers, A., Bursac, N., Urbanec, J., Lüdcke, R. & Rachenkova, G. (2014). Knowledge Management in Product Generation Development – an Empirical Study. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 25. DfX-Symposium* (S. 13–24). Hamburg: TuTech-Verlag.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2015. Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft* (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Albers, A. & Deigendesch, T. (2010). Patterns in Product Development. In I. Horvath, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010 Symposium* (n. p.). Ancona, Italien.
- Albers, A., Deigendesch, T., Turki, T. & Müller, T. (2010). Patterns for Design in Microtechnology. *Microsystem Technologies*, 16(8-9), 1537–1545. <https://doi.org/10.1007/s00542-010-1042-8>
- Albers, A. & Düser, T. (2008, September). *Integrierte Validierungsumgebung für energieeffiziente Fahrerassistenzsysteme am Rollenprüfstand*. IPG Technology Conference apply and innovate 2008, Ettlingen.
- Albers, A., Ebertz, J., Rapp, S., Heimicke, J., Kürten, C., Zimmermann, V., Bause, K. & Blattner, R. (2020). *Produktgeneration 1 im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Verständnis, Zusammenhänge und Auswirkungen in der Produktentwicklung* (KIT Scientific Working Papers, Bd. 149). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000127971>
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Ewert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Driving. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, S. 665–677). Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120308817>
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sendler & R. Stark (Hrsg.), *Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung* (acatech DISKUSSION, April 2012, S. 17–29). Berlin: Springer. [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., Kniel, J., Aschoff, M. & Meyer A. (2016). Integration von Versuchsergebnissen in C&C<sup>2</sup>-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. In K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg, R. Stelzer, P. Köhler, N. Müller & G. Scharr (Hrsg.), *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016. Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion* (S. 10–20). Aachen: Shaker Verlag.

- Albers, A., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T., Reinemann, J. & Rapp, S. (2018). Customer-Oriented Product Development: Supporting the Development of the Complete Vehicle through the Systematic Use of Engineering Generations. In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* (S. 1–8). Rom, Italien.
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Arslan, M., Rapp, S. & Bursac, N. (2016). Produktgenerationsentwicklung - Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen Produktentwicklung. In J. Gausemeier (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*. 8. und 9. Dezember 2016 Berlin (S. 227–242). Paderborn.
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Fahl, J. & Hirschter, T. (2019). Entwicklungsgenerationen zur Steuerung der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Von der Bauteil- zur Funktionsorientierung in der Automobilentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 253–262). Stuttgart: Universität Stuttgart. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000095932>
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Richter, T., Reiß, N., Maier, A. & Bursac, N. (2018). Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD – Agile Systems Design. In The Design Society (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2018. Design in the Era of Digitalization* (n. p.). Linköping, Schweden: The Design Society.
- Albers, A., Heimicke, J., Müller, J. & Spadinger, M. (2019). Agility and its Features in Mechatronic System Development: A Systematic Literature Review. In *ISPIM Innovation Conference. Celebrating Innovation: 500 Years Since da-Vinci*. Florenz, Italien.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiß, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N. & Marthaler, F. (2019a). A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD - Agile Systems Design. In G. D. Putnik (Hrsg.), *29th CIRP Design Conference 2019* (Procedia CIRP, Bd. 84, Bd. 84, S. 1015–1022). Póvoa de Varzim, Portugal.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiß, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N. & Marthaler, F. (2019b). *Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD – Agile Systems Design* (KIT Scientific Working Papers, Bd. 113). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000091847>
- Albers, A., Heimicke, J. & Trost, S. (2020). Effects and Interactions of agile Principles in the Process of Mechatronic System Development: Building a basic Understanding for adaptive Process Design. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deininger (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2020. Balancing Innovation and operation* (n. p.). Kopenhagen, Dänemark: The Design Society.

- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N., Ott, S. & Bursac, N. (2018). Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In F. Laroche & A. Bernard (Hrsg.), *28th CIRP Design Conference 2018* (Procedia CIRP, Bd. 70, S. 253–258). Nantes, Frankreich.
- Albers, A., Heitger, N., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T. & Bursac, N. (2018). Supporting Potential Innovation in the Early Phase of PGE – Product Generation Engineering: Structuring the Development of the Initial System of Objectives. In *Proceedings of the R&D Management Conference 2018* (n. p.). Mailand, Italien.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Reinemann, J., Spadinger, M., Hünemeyer, S. & Heimicke, J. (2019). Identification of Indicators for the Selection of Agile, Sequential and Hybrid Approaches in Product Development. In G. D. Putnik (Hrsg.), *29th CIRP Design Conference 2019* (Procedia CIRP, Bd. 84, S. 838–847). Póvoa de Varzim, Portugal.
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic & N. Bojetic (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference* (S. 81–90). Cavtat, Kroatien.
- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Ebel, B. (2011). Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAlloone, T. J. Howard & Y. Reich (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11). Impacting Society through Engineering* (ICED, Bd. 2, S. 256–265). Lyngby/ Kopenhagen, Dänemark: The Design Society.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. *Konstruktion*, 54(7-8), 55.
- Albers, A., Matthiesen, S., Bursac, N., Moeser, G., Schmidt, S. & Lüdcke, R. (2015). Abstraktionsgrade der Systemmodellierung - von der Sprache zur Anwendung. In M. Maurer & S.-O. Schulze (eds.), *Tag des Systems Engineering. Bremen, 12. - 14. November 2014* (S. 183–192). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A., Matthiesen, S., Rapp, S., Hoelz, K. & Bursac, N. (2018). PGE – Product Generation Engineering in Engineering Education: Real-World Problems for Beginners in Student Projects. In E. Bohemia, A. Kovacevic, L. Buck, P. Childs, S. Green, A. Hall & A. Dasan (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE 2018)* (S. 68–73). London, UK: Imperial College.

- Albers, A., Matthiesen, S., Revfi, S., Schönhoff, C., Grauberger, P. & Heimicke, J. (2019). Agile Lightweight Design - The Extended Target Weighing Approach in ASD - Agile Systems Design Using Functional Modelling with the C&C<sup>2</sup>-approach. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (Bd. 1, S. 2667–2676). Delft, Niederlande: The Design Society.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design (ICED, 611-612 (exec. Summ.), full paper no. DS42\_P\_537)*. Paris, Frankreich.: The Design Society.
- Albers, A. & Moeser, G. (2016). Modellbasierte Prinzip- und Gestaltvariation. In K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg, R. Stelzer, P. Köhler, N. Müller & G. Scharr (Hrsg.), *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016. Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion* (96-104). Aachen: Shaker Verlag.
- 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* (o. S.). 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*, 2235–2244. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.315>
- Albers, A., Rapp, S., Heitger, N., Wattenberg, F. & Bursac, N. (2018). Reference Products in PGE – Product Generation Engineering: Analyzing Challenges Based on the System Hierarchy. In F. Laroche & A. Bernard (Hrsg.), *28th CIRP Design Conference 2018* (Procedia CIRP, Bd. 70, S. 469–474). Nantes, Frankreich. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.046>
- Albers, A., Rapp, S., Krause, D. & Sankowski, O. (2019). Zukunftsrobuste Produktgenerationen. Workshop “Cross-generational Design of Future Product Architectures” auf der 22. International Conference on Engineering Design (ICED19). *WiGeP-News - Mitteilungen der WiGeP*, (2), 14–15. Zugriff am 20.12.2020. Verfügbar unter: [http://www.wigep.de/fileadmin/download/wigep/WiGeP-News\\_2\\_2019\\_01.pdf](http://www.wigep.de/fileadmin/download/wigep/WiGeP-News_2_2019_01.pdf)
- Albers, A., Rapp, S., Peglow, N., Stürmlinger, T., Heimicke, J., Wattenberg, F. & Wessels, H. (2019). Variations as Activity Patterns: A Basis for Project Planning in PGE – Product Generation Engineering. In G. D. Putnik (Hrsg.), *29th*

- CIRP Design Conference 2019* (Procedia CIRP, Bd. 84, S. 966–972). Póvoa de Varzim, Portugal.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M. & Marthaler, F. (Autor). (2018). *Forschungsergebnisse & weiteres Forschungsdesign. Wissenschaftliches Gespräch Simon Rapp am 18.12.2018* [Tonaufnahme].
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019c). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (Bd. 1, S. 1693–1702). Delft, Niederlande: The Design Society.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019d). *Das Referenzsystem im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Vorschlag einer generalisierten Beschreibung von Referenzprodukten und ihrer Wechselbeziehungen* (KIT Scientific Working Papers, Bd. 96). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000093227>
- Albers, A., Reinemann, J., Hirschter, T. & Fahl, J. (2019). Augmented Reality for Product Validation: Supporting the Configuration of AR-Based Validation Environments. In J. Chen & G. Fragomeni (Hrsg.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications and Case Studies. HCI 2019*. (Lecture Notes in Computer Science, Bd. 11575, S. 429–448). Cham, Schweiz: Springer. Verfügbar unter: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21565-1\\_29](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21565-1_29)
- Albers, A., Reinemann, J., Hirschter, T., Fahl, J. & Heitger, N. (2019). Validation-Driven Design in the Early Phase of Product Development. In G. D. Putnik (Hrsg.), *29th CIRP Design Conference 2019* (Procedia CIRP, Bd. 84, S. 630–637). Póvoa de Varzim, Portugal. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119308558>
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2016* (S. 411–420). Bristol, United Kingdom: The Design Society.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM - integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. In L. Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), *26th CIRP Design Conference* (Procedia CIRP, Bd. 50, 100–105). Stockholm, Schweden.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Walter, B. & Gladysz, B. (2015). InnoFox-Situationspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2015. Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft* (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

- Albers, A., Saak, M. & Burkardt, N. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In *47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* (S. 83–84). Ilmenau.
- Albers, A., Scherer, H., Bursac, N. & Rachenkova, G. (2015). Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. In M. Shpitalni, A. Fischer & G. Molcho (Hrsg.), *CIRP 25th Design Conference. Innovative Product Creation* (Procedia CIRP, Bd. 36, S. 129–134). Haifa, Israel. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.044>
- Albers, A., Walch, M. & Bursac, N. (2016). Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung. *Konstruktion*, (07-08), 67–71.
- Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N. (2018). Live-Labs as Real-World Validation Environments for Design Methods. In D. Marjanovic, M. Storga, S. Skec, N. Bojcevic & N. Pavkovic (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 13–24). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0303>
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design. Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). London, UK: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_8)
- Alblas, A. & Jayaram, J. (2015). Design resilience in the fuzzy front end (FFE) context: an empirical examination. *International Journal of Production Research*, 53(22), 6820–6838. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.899718>
- Alexander, C. (1980). *The Timeless Way of Building* (Center for Environmental Structure series, vol. 1, 2. print). New York: Oxford University Press.
- Alexander, C., Ishikawa, S. & Silverstein, M. (1977). *A Pattern Language. Towns, Buildings, Construction* (Center for Environmental Structure series, v. 2). New York: Oxford University Press.
- Altshuller, G. S. (1984). *Creativity as an Exact Science. The Theory of the Solution of Inventive Problems* (Studies in cybernetics, vol. 5). New York: Gordon and Breach.
- Andreasen, M. M., Hansen, C. T. & Cash, P. (2015). *Conceptual Design. Interpretations, Mindset and Models*. Cham, Schweiz: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19839-2>
- Arslan, M., Haug, F., Heitger, N., Kraemer, L. & Albers, A. (2016). Don't Get Stuck in Complexity: Coping With Strategic Complexity in the Context of Product Generation Engineering. In *R&D Management Conference 2016. From Science to Society: Innovation and Value Creation* (n. p.). Cambridge: University of Cambridge.

- Audi AG. (2020, 4. November). *Vorderachse - Audi Technology Portal*. Zugriff am 04.11.2020. Verfügbar unter: <https://www.audi-technology-portal.de/de/fahrwerk/radaufhaengungen-lenkung/vorderachse>
- Auriscchio, M. & Bracewell, R. (2013). Capturing an integrated design information space with a diagram-based approach. *Journal of Engineering Design*, 24(6), 397–428. <https://doi.org/10.1080/09544828.2012.757693>
- Auto-motor.at. (2020, 23. November). *BMW-Erfindungen im Deutschen Patentamt gewürdigt :: auto-motor.at*. Zugriff am 23.11.2020. Verfügbar unter: <https://auto-motor.at/auto-fotos/Auto/Neuwagen/Automarken-Automodelle-Neuigkeiten/BMW-News/BMW-Erfindungen/BMW-Technologie-Skizze.html>
- Bavendiek, A., Inkeremann, D. & Vietor, T. (2014). Konzept zur Methodenbeschreibung und -auswahl auf Basis von Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 25. DfX-Symposium* (S. 215–226). Hamburg: TuTech-Verlag.
- Baxter, D., Gao, J., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S. & Dani, S. (2007). An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling. *Research in Engineering Design*, 18(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s00163-007-0028-8>
- Bernard, A., Labrousse, M. & Véron, P. (2002). Numerical reference system for motorcycle development: proposition of a base conceptual model. In *Annals of 2002 Int'l CIRP Design Seminar* (n. p.). Honkong.
- Bertsche, B. & Lechner, G. (Hrsg.). (2004). *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten* (VDI-Buch, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. <https://doi.org/10.1007/3-540-34996-0>
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology* (1. Aufl., 1 Band). London: Springer.
- Boehm, B. & Turner, R. (2003). Using risk to balance agile and plan-driven methods. *Computer*, 36(6), 57–66. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1204376>
- Bracewell, R. H., Ahmed, S. & Wallace, K. M. (2004). DReD and Design Folders, a Way of Capturing, Storing and Passing on, Knowledge Generated During Design Projects. In *30th Design Automation Conference (ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Bd. 1, S. 235–246)*. Salt Lake City, Utah, USA: The American Society of Mechanical Engineers.
- Brotzer, A. (2020, 11. November). *HECTOR School - Technology Business School of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Home page*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter: <http://www.hectorschool.kit.edu/>

- Bursac, N. (2016a, September). *Method Support in Product Generation Engineering*. Vortrag im Rahmen von Workshop der Special Interest Group MMEP der DESIGN Society, Karlsruhe.
- Bursac, N. (2016b). *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 93). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Chakhunashvili, A., Johansson, P. M. & Bergman, B.L.S. (2004). Variation Mode and Effect Analysis. In *Proceedings Annual Reliability & Maintainability Symposium, 2004*. (S. 364–369). Piscataway, New Jersey, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Chakrabarti, A. & Blessing, L. T. M. (Hrsg.). (2014). *An Anthology of Theories and Models of Design. Philosophy, Approaches and Empirical Explorations*. London, UK: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1>
- Chapman, C. & Ward, S. (2003). *Project Risk Management. Processes, Techniques and Insights* (2nd ed.). Chichester: Wiley.
- Chen, J., Zhang, S., Wang, M. & Xu, C. (2017). A Novel Change Feature-Based Approach to Predict the Impact of Current Proposed Engineering Change. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.06.002>
- Clarkson, P. J., Simons, C. & Eckert, C. M. (2001). Predicting Change Propagation in Complex Design. In *Proceedings of DETC 01* (ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, n. p.). Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers.
- Colombo, E. F., Cascini, G. & Weck, O. L. de (2015). Impact of Architecture Types and Degree of Modularity on Change Propagation Indices. In C. Weber, S. Hunsung, M. Cantamessa, G. Cascini, D. Marjanovic & F. Montagna (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)* (S. 187–198). Glasgow: Design Society.
- (2020, 18. April). *Daimler Global Media Site*. Zugriff am 18.04.2020. Verfügbar unter: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=8000733>
- Denkena, B. & Mörke, T. (Hrsg.). (2017). *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence - Keys to Industry 4.0*. London: Academic Press.
- Denning, S. (2013). What Went Wrong at Boeing. *Strategy & Leadership*, 41(3), 36–41. <https://doi.org/10.1108/10878571311323208>
- DIN EN, 60812:2015-08. *DIN EN 60812:2015-08, Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse\_(FMEA) (IEC 56/1579/CD:2014)*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN ISO, 31000:2018. *Risikomanagement - Leitlinien*. Berlin: Beuth Verlag.

- Djari, C. & Arrouf, A. (2019). The Impact of Viewing Images of Precedents on the Cognitive Process of Architectural Idea Generation. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (n. p.). Delft, Niederlande: The Design Society.
- Dombrowski, U., Wullbrandt, J. & Krenkel, P. (2018). Industrie 4.0 in Production Ramp-Up Management. *Procedia Manufacturing*, 17, 1015–1022.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.085>
- Dörner, D. (1979). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Dorst, K. & Cross, N. (2001). Creativity in the Design Process: Co-Evolution of Problem–Solution. *Design Studies*, 22(5), 425–437.  
[https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00009-6)
- Duffy, A. H.B., Smith, J. S. & Duffy, S. M. (1998). Design Reuse Research : A Computational Perspective. In *Engineering Design Conference on Design Reuse* (S. 43–56). London.
- Duffy, S. M., Duffy, A. H. B. & MacCallum, K. J. (1995). A Design Reuse Model. In V. Hubka (ed.), *Proceedings of ICED 95. 10th International Conference on Engineering Design* (Schriftenreihe WDK, S. 490–495). Zürich: Heurista.
- Eckert, C. M., Clarkson, P. J. & Stacey, M. K. (2003). The Spiral of Applied Research: A Methodological View on Integrated Design Research. In A. Folkson, K. Galen, M. Norell & U. Sellgren (Hrsg.), *Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design (ICED )*. Glasgow: The Design Society.
- Eckert, C. M., Wynn, D. C., Maier, J. F., Albers, A., Bursac, N., Xin Chen, H. L., Clarkson, P. J., Gericke, K., Gladysz, B. & Shapiro, D. (2017). On the Integration of Product and Process Models in Engineering Design. *Design Science*, 3(3), n. p. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.2>
- Eckert, C. M., Zanker, W. & Clarkson, P. J. (2001). Aspects of a Better Understanding of Changes. In S. Culley (Hrsg.), *13th International Conference on Engineering Design - ICED 01* (WDK publications, Bd. 28, S. 147–154). Bury St. Edmunds, UK: Professional Engineering Publ.
- Eckert, T. (2016, 14. Oktober). *Was humorvolle Menschen gemeinsam haben*. Zugriff am 18.10.2016. Verfügbar unter: <http://ze.tt/was-humorvolle-menschen-gemeinsam-haben/>
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München: Carl Hanser Verlag.  
<https://doi.org/10.3139/9783446449084>
- Eppinger, S. D. & Browning, T. R. (2012). *Design Structure Matrix Methods and Applications* (Engineering systems). Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press.

- Eppinger, S. D., Whitney, D. E., Smith, R. P. & Gebala, D. A. (1994). A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development. *Research in Engineering Design*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/BF01588087>
- Estefan, J. (2007). *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies*. Pasadena, Kalifornien, USA: INCOSE MBSE Initiative. Verfügbar unter: [http://www.omg.sysml.org/mbse\\_methodology\\_survey\\_revb.pdf](http://www.omg.sysml.org/mbse_methodology_survey_revb.pdf)
- Fahl, J., Hirschter, T., Kamp, J., Endl, M. & Albers, A. (2019). Functional Concepts in the Model of PGE - Product Generation Engineering by the Example of Automotive Product Development. In *5th IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (S. 1–8). Edinburgh, UK: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Fairley, R. E. & Willshire, M. J. (2005). Iterative Rework: the Good, the Bad, and the Ugly. *Computer*, 38(9), 34–41. <https://doi.org/10.1109/MC.2005.303>
- (2020, 18. Aprilb). *Federseemuseum. Dauerausstellung „15.000 Jahre Leben am See“ @ Federseemuseum Bad Buchau*. Zugriff am 18.04.2020. Verfügbar unter: <http://www.federseemuseum.de/das-federseemuseum/neue-dauerausstellung/>
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollständig überarbeitete Auflage). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>
- Fink, A., Schlake, O. & Siebe, A. (2001). *Erfolg durch Szenario-Management. Prinzip und Werkzeuge der strategischen Vorausschau*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- Fink, A. & Siebe, A. (2016). *Szenario-Management. Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen*. Frankfurt, New York: Campus Verlag.
- Fischer, J. & Albers, A. (2018). Charakteristische Normgröße für den relativen Schädigungsvergleich von Triebsträngen in frühen Phasen der Entwicklung. In *19. VDI Kongress SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung*. Düsseldorf: VDI Wissensforum GmbH.
- Fischer, J., Rapp, S., Bause, K. & Albers, A. (2019). Assessing the Relative Endurance Capacity of Hybrid Drivetrain Components in an Early Development Stage with an Indicator Based on Preceding drivetrain generations. In *CTI SYMPOSIUM 2019. 18th International Congress and Expo*. Berlin: Springer Vieweg.
- Flanagan, T., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). Externalizing Tacit Overview Knowledge: A Model-Based Approach to Supporting Design Teams. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, (21), 227–242.

- Fricke, E. & Schulz, A. P. (2005). Design for Changeability (DfC): Principles to Enable Changes in Systems Throughout Their Entire Lifecycle. *Systems Engineering*, 8(4), 342–359. <https://doi.org/10.1002/sys.20039>
- Gärtner, T., Rohleder, N. & Schlick, C. M. (2009). DeSiM – A Simulation Tool for Project and Change Management on the Basis of Design Structure Matrices. In M. Kreimeyer, J. Maier, G. Fadel & U. Lindemann (Hrsg.), *DSM 2009: Proceedings of the 11th International DSM Conference* (S. 259–270). München: Carl Hanser Verlag.
- Gassmann, O. (2006). Innovation und Risiko — zwei Seiten einer Medaille. In O. Gassman & C. Kobe (Hrsg.), *Management von Innovation und Risiko. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen* (S. 3–24). Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-33755-5\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-33755-5_1)
- Gladysz, B. (2019). *Gestalt- und wirkzusammenhangsbasierte Beschreibung von Fehlermechanismen für eine effektivere und effizientere Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und -ursachen* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 119). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000098444>
- Gladysz, B., Waldeier, L., Jahn, H. & Albers, A. (2018). Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(1-2), 42–45. <https://doi.org/10.3139/104.111827>
- Grant, M. J. & Booth, A. (2009). A Typology of Reviews: an Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies. *Health Information and Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthiesen, S. & Albers, A. (2019). The Contact and Channel Approach – 20 Years of Application Experience in Product Engineering. *Journal of Engineering Design*, 81(1), 241–265. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1699035>
- Grösser, S. (Springer Gabler Verlag, Hrsg.). (2017). *Galber Wirtschaftslexikon*. Stichwort: *Digitaler Zwilling*. Zugriff am 23.08.2017. Verfügbar unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2045879713/digitaler-zwilling-v1.html>
- Hamraz, B., Caldwell, N. H. M. & Clarkson, P. J. (2013). A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management. *Systems Engineering*, 16(4), 473–505. <https://doi.org/10.1002/sys.21244>
- Hanna, M., Schwenke, J. & Krause, D. (2020). Inconsistency Management for Product Families with Many Variants Through a Model-Based Approach in Modular Lightweight Design. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 917–926. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.309>
- Hars, A. (1994). *Referenzdatenmodelle. Grundlagen effizienter Datenmodellierung* (Schriften zur EDV-orientierten Betriebswirtschaft). Wiesbaden: Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-90397-6>

- Hatchuel, A. & Weil, B. (2003). A New Approach of Innovative Design: an Introduction to CK Theory. In A. Folkesson, K. Gralen, M. Norell & U. Sellgren (Hrsg.), *Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design* (ICED, 109-110 (exec. summ.), full paper no. DS31\_1794FPC). Glasgow: The Design Society.
- Hay, L., Duffy, A. H. B., McTeague, C., Pidgeon, L. M., Vuletic, T. & Greal, M. (2017). A Systematic Review of Protocol Studies on Conceptual Design Cognition: Design as Search and Exploration. *Design Science*, 3(10), n. p. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.11>
- Heckendorf, K. (2016). *Ingenieure: Kommt ihr klar?* Deutsche Ingenieure gelten als besonders gut ausgebildet. Stimmt das noch? Experten und Berufseinsteiger erzählen., ZEIT ONLINE GmbH. Zugriff am 14.11.2016. Verfügbar unter: <http://www.zeit.de/campus/2016/06/ingenieure-deutschland-ausbildung-studium-praxis/komplettansicht>
- HECTOR School. (2020, 4. Juli). *HECTOR School - Technology Business School of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Programs - Master Programs - M.Sc. MPD: Product Development*. Zugriff am 04.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.ectorschool.kit.edu/MPD.php>
- Heesen, M. (2009). *Innovationsportfoliomanagement. Bewertung von Innovationsprojekten in kleinen und mittelgroßen Unternehmen der Automobilzulieferindustrie*. Dissertation. Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Universität Duisburg-Essen. Wiesbaden: Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8392-3>
- Heimicke, J., Reiß, N., Albers, A., Walter, B., Breitschuh, J., Knoche, S. & Bursac, N. (2018). Agile Innovative Impulses in Product Generation Engineering: Creativity by Intentional Forgetting. International Conference on Design Creativity. In E. Dekonick, A. Wodehouse, C. Snider, G. Georgiev & G. Cascini (Hrsg.), *Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC 2018)* (ICDC, S. 183–190). Bath, UK: The Design Society.
- Heitger, N. (2019). *Methodische Unterstützung der initialen Zielsystembildung in der Automobilentwicklung im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 120). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Henderson, R. M. & Clark, K. B. (1990). Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 9–30. <https://doi.org/10.2307/2393549>
- Herring, S. R., Chang, C.-C., Krantzler, J. & Bailey, B. P. (2009). Getting inspired! In D. R. Olsen, R. B. Arthur, K. Hinckley, M. R. Morris, S. Hudson & S. Greenberg (eds.), *CHI 2009 - Digital Life, New World. The 27th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 87–96). New York, USA: ACM.

- Herstatt, C., Buse, S. & Napp, J. J. (2007). *Kooperationen in den frühen Phasen des Innovationsprozess - Potentiale für kleine und mittlere Unternehmen*. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg; Institut für Technologie- und Innovationsmanagement. <https://doi.org/10.15480/882.272>
- Hirschter, T., Heitger, N., Haug, F., Fahl, J., Mandel, C., Marthaler, F., Walter, B. & Albers, A. (2018). Zukunftsorientierte PGE-Produktgenerationsentwicklung: Ein Ansatz zur systematischen Überführung von Szenarien in Produktprofile in der Frühen Phase der PGE. In J. Gausemeier, W. Bauer & R. Dumitrescu (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung. 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung* (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 385). Paderborn: Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut.
- Hooshmand, Y., Köhler, P. & Korff-Krumm, A. (2014). Varianten- und Komplexitätsmanagement für individualisierte Produkte. In K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg & R. Stelzer (Hrsg.), *Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess. Tagungsband, 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014* (S. 151–160). Bayreuth: Universität Bayreuth Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD.
- Houdek, F. (2003). Requirements Engineering Erfahrungen in Projekten der Automobilindustrie. *Softwaretechnik-Trends*, 23(1), o. S.
- Huang, G. Q. & Mak, K. L. (2003). *Internet Applications in Product Design and Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55778-1>
- I4TP. (2020, 4. Juli). *Deutsch-Chinesische Industrie 4.0 Fabrikautomatisierungsplattform*. Zugriff am 04.07.2020. Verfügbar unter: <http://www.i4tp.de/>
- Inkermann, D., Hanna, M., Richter, T., Wortmann, N., Vietor, T. & Krause, D. (2019). Die Produktarchitektur als zentrales Konzept in der Produktentwicklung. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X*. Jesteburg: The Design Society.
- IPEK. (2014, 5. November). *IPEK - Ausstattung*. Zugriff am 07.11.2019. Verfügbar unter: [https://www.ipek.kit.edu/60\\_2887.php](https://www.ipek.kit.edu/60_2887.php)
- IPEK. (2020a). *Glossar der KaSPro*. Zugriff am 25.05.2020. Verfügbar unter: [https://vm-glossar.ipek.kit.edu/\\_layouts/15/start.aspx#/SitePages/Homepage.aspx?View={18CA9DC0-703F-4004-B701-7B471A8AC2F7}&FilterField1=LinkTitle&FilterValue1=Produktprofil](https://vm-glossar.ipek.kit.edu/_layouts/15/start.aspx#/SitePages/Homepage.aspx?View={18CA9DC0-703F-4004-B701-7B471A8AC2F7}&FilterField1=LinkTitle&FilterValue1=Produktprofil)
- IPEK. (2020b). *IPEK - Bewilligung DFG-Antrag: Einsatz des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung zur integrierten Planung und Entwicklung*. Zugriff am 04.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/7726.php>
- IPEK. (2020c). *IPEK - Studieren - IPEK Lehre Höhepunkte - Pflichtmodul MSuP*. Zugriff am 04.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/3390.php>

- Isaksson, O., Eckert, C., Borgue, O., Hallstedt, S. I., Hein, A. M., Gericke, K., Panarotto, M., Reich, Y. & Öhrwall Rönnbäck, A. B. (2019). Perspectives on Innovation: The Role of Engineering Design. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (S. 1235–1244). Delft, Niederlande: The Design Society.
- Jarratt, T., Eckert, C. M., Caldwell, N. H. M. & Clarkson, P. J. (2011). Engineering Change: an Overview and Perspective on the Literature. *Research in Engineering Design*, 22(2), 103–124. <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0097-y>
- Jarratt, T., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2004). Development of a Product Model to Support Engineering Change Management. In I. Horvath & P. Xirouchakis (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2004* (S. 331–344). Rotterdam: Millpress.
- Jarratt, T., Eckert, C., Clarkson, P. J. & Schwankl, L. (2002). Product Architecture and the Propagation of Engineering Change. In D. Marjanovic (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference (DESIGN)*, S. 75–80. Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.
- Johansson, P., Chakhunashvili, A., Barone, S. & Bergman, B. (2006). Variation Mode and Effect Analysis: a Practical Tool for Quality Improvement. *Quality and Reliability Engineering International*, 22(8), 865–876. <https://doi.org/10.1002/qre.773>
- Kaiser, R. (2014). *Qualitative Experteninterviews. Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung* (Lehrbuch). Wiesbaden: Springer VS. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02479-6>
- Kattner, N., Wang, T. & Lindemann, U. (2016). Performance Metrics in Engineering Change Management - Key Performance Indicators and Engineering Change Performance Levels. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (S. 1180–1184). Bali, Indonesien: IEEE.
- Kestel, P., Luft, T., Schon, C., Kügler, P., Bayer, T., Schleich, B., Staab, S. & Wartzack, S. (2017). Konzept zur zielgerichteten, ontologiebasierten Wiederverwendung von Produktmodellen. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium, Oktober 2017* (1. Auflage, S. 241–252). Hamburg: TuTech Verlag.
- King, A. M. & Sivaloganathan, S. (1998). Flexible Design: a Strategy for Design Reuse. In S. Sivaloganathan & T. M. M. Shahin (Hrsg.), *Proceedings of Engineering Design Conference '98* (n. p.). London, UK: Professional Engineering Publishing Limited.
- Kissel, M. & Lindemann, U. (2013). System Architecture Change Decisions in Multi-Variant Product Portfolios. In U. Lindemann, S. Venkatamaran, Y. S. Kim, S. W. Lee, P. J. Clarkson & G. Cascini (Hrsg.), *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED 13)* (ICED, S. 11–20). Seoul, Korea: The Design Society.

- KIT - Karlsruher Institut für Technologie. (2020, 4. Juli). *KIT EMSP Final - YouTube*. Zugriff am 04.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=hv7iMTJQnVg>
- KIT-Zentrum MathSEE. (2020, 4. Juli). *KIT - MathSEE - KIT-Zentrum MathSEE*. Zugriff am 04.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.mathsee.kit.edu/index.php>
- Klotz, T., Ott, S. & Albers, A. (2019). Analyse des Schädigungs- und Erholungsverhaltens trockenlaufender Friktionspaarungen. *Forschung im Ingenieurwesen*, (83), 209–218.
- Küchenhof, J., Schwede, L.-N. & Krause, D. (2020). Planning & Tracking the Changes - Matrix Mapping of Modular Product Family Generations. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deininger (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2020. Balancing Innovation and operation*. Kopenhagen, Dänemark: The Design Society.
- Küchenhof, J., Tabel, C. & Krause, D. (2020). Assessing the Influence of Generational Variety on Product Family Structures. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, S. 796–801).
- Lachmayer, R., Mozgova, I., Reimche, W., Colditz, F., Mroz, G. & Gottwald, P. (2014). Technical Inheritance: A Concept to Adapt the Evolution of Nature to Product Engineering. In K.-D. Thoben, M. Busse, B. Denkena & J. Gausemeier (Hrsg.), *2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering* (Procedia Technology, Bd. 15, S. 178–187). Bremen: Elsevier.
- Langer, S., Maier, A., Wilberg, J., Münch, T. J. & Lindemann, U. (2012). Exploring Differences Between Average and Critical Engineering Changes: Survey Results from Denmark. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic & N. Bojcetic (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference* (DESIGN, S. 223–232). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.
- Langer, S., Wilberg, J., Maier, A. & Lindemann, U. (2012). *Änderungsmanagement-Report 2012. Studienergebnisse zu Ursachen und Auswirkungen, aktuellen Praktiken, Herausforderungen und Strategien in Deutschland*. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung.
- Library of Congress. (2011, 9. Dezember). *Library of Congress*. Zugriff am 18.04.2020. Verfügbar unter: <https://www.loc.gov/exhibits/world/images/s123.jpg>
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (3. korrigierte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Lindemann, U. (Hrsg.). (2016). *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag.

- Lindemann, U., Kleedörfer, R. & Gerst, M. (1998). The Development Department and Engineering Change Management. In E. Frankenberger, H. Birkhofer & P. Badke-Schaub (Hrsg.), *Designers. The Key to Successful Product Development* (S. 169–182). London: Springer.
- Lohmeyer, Q. (2013). *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme: Dissertation* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 59). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Marthaler, F., Orsolani, E., Uhlig, P., Kühlfuss, D., Siebe, A., Bursac, N. & Albers, A. (2019). Strategische Potentialfindung zur generationsübergreifenden Produktentwicklung mit langfristigem Zeithorizont: Eine qualitative Studie im Live-Lab IP-Integrierte Produktentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (233-242). Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Martin, M. V. & Ishii, K. (2002). Design for Variety: Developing Standardized and Modularized Product Platform Architectures. *Research in Engineering Design*, 13(4), 213–235. <https://doi.org/10.1007/s00163-002-0020-2>
- Marxen, L. (2014). *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 74). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Marxen, L. & Albers, A. (2012). Supporting Validation in the Development of Design Methods. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic & N. Bojetic (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference* (DESIGN, S. 1009–1018). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.
- Matthiesen, S. (2002). *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme* (mkl Forschungsberichte, Bd. 6). Dissertation. Karlsruhe: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau Universität Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (06.05.2020). *Gespräch zu Potenzialen für Lehre und Forschung in MSuP auf Basis des Modells der PGE*.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflieger, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018). *Modellbildung mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz in der Gestaltung – Techniken zur Analyse und Synthese* (KIT Scientific Working Papers, Bd. 58). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000080744>
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation – Using the C&C<sup>2</sup>-Approach to Support the Modelling of a Dynamic

- System. In F. Laroche & A. Bernard (Hrsg.), *28th CIRP Design Conference 2018* (Procedia CIRP, Bd. 70, S. 475–480). Nantes, Frankreich.
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Dültgen, P., Pelshenke, C. & Gittel, H.-J. (2017). Realitätsnahe Komponententests zur Unterstützung der Produktentwicklung bei der Validierung von Power-Tools. *Konstruktion*, (7-8), 76–81.
- Matthiesen, S. & Ruckpaul, A. (2012). New Insights on the Contact & Channel-Approach – Modeling of Systems With Several Logical States. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic & N. Bojcetic (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference* (DESIGN, S. 1019–1028). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.
- Maul, L. (2015). *Vernetzte Kreativitaet - Menschzentrierte Gestaltung und Integration einer Community-Plattform für Innovationsimpulse* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 87). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).  
<https://doi.org/10.5445/IR/1000049740>
- McMahon, C. A. (1994). Observations on Modes of Incremental Change in Design. *Journal of Engineering Design*, 5(3), 195–209.  
<https://doi.org/10.1080/09544829408907883>
- Meboldt, M. (2009). *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 29). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Mirdamadi, S., Addouche, S.-A. & Zolghadri, M. (2018). A Bayesian Approach to Model Change Propagation Mechanisms. In F. Laroche & A. Bernard (Hrsg.), *28th CIRP Design Conference 2018* (Procedia CIRP, Bd. 70, S. 1–6). Nantes, Frankreich.
- Mozgova, I., Lachmayer, R. & Gottwald, P. (2015). Formulations of Paradigms of Technical Inheritance. In C. Weber, S. Husung, M. Cantamessa, G. Cascini, D. Marjanovic & F. Montagna (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)* (S. 271–278). Glasgow: Design Society.
- Oehmen, J. (2016). Risiko- und Chancenmanagement in der Produktentwicklung. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 59–98). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.004>
- Otto, K., Hölttä-Otto, K., Simpson, T. W., Krause, D., Ripperda, S. & Ki Moon, S. (2016). Global Views on Modular Design Research: Linking Alternative Methods to Support Modular Product Family Concept Development. *Journal of Mechanical Design*, 138(7), n. p. <https://doi.org/10.1115/1.4033654>
- Park, Y. H. (2010). A Study of Risk Management and Performance Measures on New Product Development. *Asian Journal on Quality*, 11(1), 39–48.  
<https://doi.org/10.1108/15982681011051813>

- Pavasson, J. & Karlberg, M. (2011). Variation Mode and Effect Analysis Compared to FTA and FMEA in Product Development. In *Proceedings of the 19th AR2TS Advances in Risk and Reliability Technology Symposium* (S. 252–260). Nottingham, UK: University of Nottingham.
- Peglow, N., Heimicke, J. & Albers, A. (2019). Agiler Bewertungsprozess in einer variantenreichen PGE - Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 183–192). Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Peglow, N., Powelske, J., Birk, C., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In K. Brökel, G. Scharr, K.-H. Grote, R. Stelzer, F. Rieg, J. Feldhusen, N. Müller, A. Lohrengel & P. Köhler (Hrsg.), *15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Interdisziplinäre Produktentwicklung* (o. S.). Duisburg: Universität Duisburg-Essen.
- Persson, J. S., Mathiassen, L., Boeg, J., Madsen, T. S. & Steinson, F. (2009). Managing Risks in Distributed Software Projects: An Integrative Framework. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 56(3), 508–532. <https://doi.org/10.1109/TEM.2009.2013827>
- Pluto Project. (2020, 11. November). *Pluto Project*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter: <https://plutorobot.wordpress.com/>
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2005). Navigation durch die Produktkonkretisierung. In H. Meerkamm (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 16. Symposium* (S. 87–98). Erlangen-Nürnberg: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität.
- Rapp, S. (2019). *Reflexion zum Lehrexperiment: PGE – Produktgenerationsentwicklung in den Workshops zur Maschinenkonstruktionslehre III/IV. Arbeit im Rahmen des HDZ-Zertifikats Baden-Württemberg*. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Rapp, S., Altner, M. & Albers, A. (2020). Benchmarking of Risk Management Methods with Regard to Variations as Source of Risk. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 677–686.
- 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. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, S. 781–788).
- Rapp, S., Moeser, G., Eichhorn, P. & Albers, A. (2018). Identifying Expedient Variations in PGE – Product Generation Engineering. In P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2018* (n. p.). Linköping, Schweden: The Design Society.

- Rapp, S., Heimicke, J., Weber, J. & Albers, A. (2020). Development of Strategic Guidelines for Agile Parts Maturity Management of Engine Subsystems in the Automotive Industry During Series Ramp-up. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deininger (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2020. Balancing Innovation and operation* (n. p.). Kopenhagen, Dänemark: The Design Society.
- Reich, Y. & Levy, E. (2004). Managing Product Design Quality under Resource Constraints. *International Journal of Production Research*, 42(13), 2555–2572. <https://doi.org/10.1080/0020754042000208394>
- Reich, Y. & Paz, A. (2008). Managing Product Quality, Risk, and Resources through Resource Quality Function Deployment. *Journal of Engineering Design*, 19(3), 249–267. <https://doi.org/10.1080/09544820701327947>
- Reinemann, J., Hirschter, T., Mandel, C., Heimicke, J. & Albers, A. (2018). Methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. 29. DfX-Symposium 2018. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X - Beiträge zum 29. DfX-Symposium September 2018* (o. S.). Tutzing.
- Ropohl, G. (1979). *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Roth, K. (2000). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Konstruktionslehre* (Bd. 1, 3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Saatweber, J. (2016). Produkte entwickeln mit QFD - Quality Function Deployment. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 629–671). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.022>
- Sabisch, H. & Tintelnot, C. (1997). *Integriertes Benchmarking für Produkte und Produktentwicklungsprozesse* (Innovations- und Technologiemanagement). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Safoutin, M. J. & Smith, R. P. (1996). The Iterative Component of Design. In *Managing virtual enterprises. A Convergence of Communications Computing, and Energy Technologies: IEMC 96 Proceedings, International Conference on Engineering and Technology Management, August 18 to 20, 1996, Vancouver, British Columbia, Canada* (S. 564–569). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Sahin, T., Cudok, A., Rapp, S., Inkermann, D., Albers, A., Wattenberg, F., Bursac, N. & Vietor, T. (2018). How to Foster Innovation? Findings and Hypotheses for Collaborations Between Research and Industry. In D. Marjanovic, M. Storga, S. Skec, N. Bojetic & N. Pavkovic (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 1945–1956). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.

- Savci, S. & Kayis, B. (2006). Knowledge Elicitation for Risk Mapping in Concurrent Engineering Projects. *International Journal of Production Research*, 44(9), 1739–1755. <https://doi.org/10.1080/00207540500445321>
- Schaeffler. (2020, 2. April). *Pioniergeist | Schaeffler Gruppe*. Zugriff am 23.11.2020. Verfügbar unter: [https://www.schaeffler.com/content.schaeffler.com/de/innovation/pioneering\\_spirit/pioneering\\_spirit.jsp](https://www.schaeffler.com/content.schaeffler.com/de/innovation/pioneering_spirit/pioneering_spirit.jsp)
- Schaper, N. (2015). Validitätsaspekte von Kompetenzmodellen und -tests für hochschulische Kompetenzdomänen. In F. Musekamp & G. Spöttl (Hrsg.), *Kompetenz im Studium und in der Arbeitswelt. Nationale und internationale Ansätze zur Erfassung von Ingenieurkompetenzen* (S. 18–41). Frankfurt: Peter Lang GmbH Internationaler Verlag der Wissenschaften.
- Scherer, H. (2016). *Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 97). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.). (2014). *Komplexitätsmanagement in Unternehmen. Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*. Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01284-7>
- Schottmüller, M., Rapp, S., Bause, K. & Albers, A. (2019). Steigerung des Systemverständnisses in Bezug auf das Schwingungsverhalten des Fliehkraftpendels durch eine gezielte Analyse der Variationsanteile in Produktgenerationen. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 213–222). Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Schumpeter, J. (1927). The Explanation of the Business Cycle. *Economica*, (21), 286–311. <https://doi.org/10.2307/2548401>
- Serf, M. & Albers, A. (2019). Unterstützung bei der Herstellung optimierter Orthesen mithilfe gekoppelter CAE-Methoden. *NAFEMS Online-Magazin*, (1), 74–82.
- Shimizu, H. & Noguchi, H. (2005). Reliability Problem Prevention Method of Stimulating Creativity and Visualizing Problems (2nd Report, Reliability Problem Prevention Method for System Development). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, 71(706), 2020–2027. <https://doi.org/10.1299/kikaic.71.2020>
- Shimizu, H., Otsuka, Y. & Noguchi, H. (2010). Design Review Based on Failure Mode to Visualise Reliability Problems in the Development Stage of Mechanical Products. *International Journal of Vehicle Design*, 53(3), 149–165. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2010.033827>

- Simpson, T. W., Bobuk, A., Slingerland, L. A., Brennan, S., Logan, D. & Reichard, K. (2012). From User Requirements to Commonality Specifications: an Integrated Approach to Product Family Design. *Research in Engineering Design*, 23(2), 141–153. <https://doi.org/10.1007/s00163-011-0119-4>
- Sivaloganathan, S., Evbuomwan, N.F.O., Jebb, A. & Wynn, H. P. (1995). Design Function Deployment — a Design System for the Future. *Design Studies*, 16(4), 447–470. [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(95\)00020-R](https://doi.org/10.1016/0142-694X(95)00020-R)
- Sivaloganathan, S. & Shahin, T. M. M. (1999). Design Reuse: an Overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 213(7), 641–654. <https://doi.org/10.1243/0954405991517092>
- Song, W., Ming, X. & Xu, Z. (2013). Risk Evaluation of Customer Integration in New Product Development under Uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 65(3), 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.04.001>
- Specht, M. (2018, 30. Dezember). *Chinesischer Autohersteller: Chinakracher? Das war einmal*. Zugriff am 02.01.2019. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-12/chinesischer-autohersteller-design-sicherheitstechnik-byd-tang-westliches-niveau/komplettansicht>
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer Verlag.
- Stenholm, D., Catic, A. & Bergsjö, D. (2019). Knowledge Reuse in Industrial Practice: Evaluation from Implementing Engineering Checksheets in Industry. *Design Science*, 5(15), 1–30. <https://doi.org/10.1017/dsj.2019.10>
- Tang, D., Zhu, R., Tang, J., Xu, R. & He, R. (2010). Product Design Knowledge Management based on Design Structure Matrix. *Advanced Engineering Informatics*, 24(2), 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.08.005>
- TECHNIA. (2020, 1. Juli). *SIMULIA Isight*. Zugriff am 28.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.technia.de/software/simulia/simulia-isight/>
- Ulrich, K. (2012). Fundamentals of Product Modularity. In S. Dasu & C. Eastman (Hrsg.), *Management of Design. Engineering and Management Perspectives* (S. 219–231). Dordrecht, Niederlande: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1390-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1390-8_12)
- Unger, D. W. & Eppinger, S. D. (2009). Comparing Product Development Processes and Managing Risk. *International Journal of Product Development*, 8(4), 382–402.
- Vajna, S. & Wegner, B. (1997). Autogenetische Konstruktionstheorie - Evolutionärer Ansatz einer erweiterten Konstruktionstheorie. In H. Meerkamm (Hrsg.), *DFX 1997: Proceedings of the 8th Symposium on Design for Manufacturing* (S. 116–125). Schnaittach/ Erlangen.
- Vajna, S., Clement, S., Jordan, A. & Bercsey, T. (2005). The Autogenetic Design Theory: An Evolutionary View of the Design Process. *Journal of Engineering Design*, 16(4), 423–440. <https://doi.org/10.1080/09544820500267781>

- VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*. Berlin: Beuth Verlag.
- Walch, M. (2017). *Variantenentwicklung im ZHO-Modell im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung – Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase auf Basis abgeleiteter Varianten* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 103). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Walter, B., Albers, A., Haupt, F. & Bursac, N. (2016). Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X - Beiträge zum 27. DfX-Symposium* (S. 283–295). Hamburg: TuTech Verlag.
- Walter, B., Rapp, S., Albers, A. & The Design Society (2016). Selecting Appropriate Tools for Synchronous Communication and Collaboration in Locally Distributed Product Development. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2016* (S. 258–267). Bristol, United Kingdom: The Design Society.
- Weber, C. & Husung, S. (2016). Solution Patterns - Their Role in Innovation, Practice and Education. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojcetic & S. Skec (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2016* (S. 99–108). Dubrovnik, Kroatien.
- Wegner, B. (1999). *Autogenetische Konstruktionstheorie. Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie auf der Basis Evolutionärer Algorithmen*. Dissertation. Universität Magdeburg, Magdeburg.
- Welt.de, Birger, N. (Mitarbeiter). (2016). *hermes-JPG.jpg (JPEG-Grafik, 1300 x 731 Pixel)*. Zugriff am 03.03.2020.
- Wesner, E. (1977). *Die Planung von Marketing-Strategien auf der Grundlage des Modells des Produktlebenszyklus*. Dissertation. Berlin: Freie Universität Berlin.
- Wessels, H., Heimicke, J., Rapp, S., Grauberger, P., Richter, T., Matthiesen, S. & Albert, A. (2019). Sprintplanung in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis von Referenzsystemelementen. In B. Corves, K. Gericke, K.-H. Grote, A. Lohrengel, N. Müller, A. Nagarajah, F. Rieg, G. Scharr & R. Stelzer (Hrsg.), *17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: Agile Entwicklung physischer Produkte* (S. 200–211). Aachen: RWTH Aachen University.
- Wheelwright, S. C. & Clark, K. B. (1992). Creating Project Plans to Focus Product Development. *Harvard Business Review*, 70(2), 70–82.
- Wiesinger, G. & Housein, G. (2002). Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten: Wettbewerbsvorteile durch ein anforderungsgerechtes Anlaufmanagement. *wt-online*, (10-2002), 505–508.
- Wintergerst, E. (2015). *Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 86). Dissertation. Karlsruhe: IPEK - Institut für

- Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).  
<https://doi.org/10.5445/IR/1000048477>
- Wißler, F. E. (2006). *Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. <https://doi.org/10.18419/OPUS-6609>
- Wright, I. C. (1997). A Review of Research into Engineering Change Management: Implications for Product Design. *Design Studies*, 18(1), 33–42.  
[https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(96\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(96)00029-4)
- Wynn, D. C. & Eckert, C. M. (2017). Perspectives on Iteration in Design and Development. *Research in Engineering Design*, 28(2), 153–184.  
<https://doi.org/10.1007/s00163-016-0226-3>
- Wynn, D. C., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). Modelling Iteration in Engineering Design. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design* (ICED, 693-694 (exec. Summ.), full paper no. DS42\_P\_561). Paris, Frankreich.: The Design Society.
- Yeo, K. T. & Ren, Y. (2009). Risk Management Capability Maturity Model for Complex Product Systems (CoPS) Projects. *Systems Engineering*, 12(4), 275–294.  
<https://doi.org/10.1002/sys.20123>

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

- Altner, M. (2019). *Erstellung eines Methoden-Benchmark zur Bewertung von Variationen in der PGE*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Barg, M. (2019). *Einflussfaktoren auf die retrospektive Bestimmung von Variationsanteilen auf der Grundlage von C&C<sup>2</sup>-A basierten Kriterien*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Eichhorn, P. (2017). *Methode zur Systemanalyse und –synthese in der PGE – Produktgenerationsentwicklung – am Beispiel der Entwicklung eines Magnetventils im Thermomanagement von E-Fahrzeugen*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Erdmann, J. (2017). *Chancen- und Risikomanagement in der PGE am Beispiel einer fahrbaren Betonpumpe*. Bachelorarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Pfaff, F. (2020). *Entscheidungsunterstützung bei der Festlegung von Variationen im Sinne des Modells der PGE - Produktgenerationsentwicklung durch Visualisierung auf Basis des Referenzsystems*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Rouby, Q. (2020). *Optimierung des Schmiedelenkerenauslegungsprozesses*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Tran, Q. (2020). *Konzeptionierung eines Traceabilitymodells innerhalb eines globalen Produktionsnetzwerkes der era-contact GmbH*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Wattenberg, F. (2018). *Modell und Methode zur Unterstützung bei der Festlegung von Variationen in der PGE*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Weber, J. (2020). *Entwicklung strategischer Handlungsempfehlungen für eine agile Reifegradsteuerung von Motorsubsystemen in der Automobilentwicklung während des Serienanlaufs*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Winter, M. (2018). *Kontinuierliche Risikobewertung in der PGE auf Basis zeitabhängiger Variationsanteile in der Entwicklung eines Lasthandlings für einen mobilen, urbanen Logistikkassistenten*. Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

### **Vorveröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind:**

- Albers, A., Basedow, G. N., Heimicke, J., Marthaler, F., Spadinger, M. & Rapp, S. (2020). Developing a common understanding of business models from the product development perspective. In K. Mpopu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, 875-882).
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2016). PGE – Product Generation Engineering – Case Study of the Dual Mass Flywheel. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojetic & S. Skec (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2016* (S. 791–800). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81(1), 13–31. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Ewert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Dri-

- ving. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, S. 665–677). Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120308817>
- Albers, A., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T., Reinemann, J. & Rapp, S. (2018). Customer-Oriented Product Development: Supporting the Development of the Complete Vehicle through the Systematic Use of Engineering Generations. In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* (S. 1–8). Rom, Italien.
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Arslan, M., Rapp, S. & Bursac, N. (2016). Produktgenerationsentwicklung - Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen Produktentwicklung. In J. Gausemeier (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*. 8. und 9. Dezember 2016 Berlin (S. 227–242). Paderborn.
- Albers, A., Matthiesen, S., Rapp, S., Hoelz, K. & Bursac, N. (2018). PGE – Product Generation Engineering in Engineering Education: Real-World Problems for Beginners in Student Projects. In E. Bohemia, A. Kovacevic, L. Buck, P. Childs, S. Green, A. Hall & A. Dasan (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE 2018)* (S. 68–73). London, UK: Imperial College.
- 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* (o. S.). 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*, 2235–2244. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.315>
- Albers, A., Rapp, S., Heitger, N., Wattenberg, F. & Bursac, N. (2018). Reference Products in PGE – Product Generation Engineering: Analyzing Challenges Based on the System Hierarchy. In F. Laroche & A. Bernard (Hrsg.), *28th CIRP Design Conference 2018* (Procedia CIRP, Bd. 70, S. 469–474). Nantes, Frankreich. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.046>
- Albers, A., Rapp, S., Krause, D. & Sankowski, O. (2019). Zukunftsrobuste Produktgenerationen. Workshop “Cross-generational Design of Future Product Architectures” auf der 22. International Conference on Engineering Design (ICED19). *WiGeP-News - Mitteilungen der WiGeP*, (2), 14–15. Zugriff am 20.12.2020. Verfügbar unter: [http://www.wigep.de/fileadmin/download/wigep/WiGeP-News\\_2\\_2019\\_01.pdf](http://www.wigep.de/fileadmin/download/wigep/WiGeP-News_2_2019_01.pdf)

- Albers, A., Rapp, S., Peglow, N., Stürmlinger, T., Heimicke, J., Wattenberg, F. & Wessels, H. (2019). Variations as Activity Patterns: A Basis for Project Planning in PGE – Product Generation Engineering. In G. D. Putnik (Hrsg.), *29th CIRP Design Conference 2019* (Procedia CIRP, Bd. 84, S. 966–972). Póvoa de Varzim, Portugal.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019c). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (Bd. 1, S. 1693–1702). Delft, Niederlande: The Design Society.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019d). *Das Referenzsystem im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Vorschlag einer generalisierten Beschreibung von Referenzprodukten und ihrer Wechselbeziehungen* (KIT Scientific Working Papers, Bd. 96). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000093227>
- Fischer, J., Rapp, S., Bause, K. & Albers, A. (2019). Assessing the Relative Endurance Capacity of Hybrid Drivetrain Components in an Early Development Stage with an Indicator Based on Preceding drivetrain generations. In *CTI SYMPOSIUM 2019. 18th International Congress and Expo*. Berlin: Springer Vieweg.
- Rapp, S. (2019). *Reflexion zum Lehrexperiment: PGE – Produktgenerationsentwicklung in den Workshops zur Maschinenkonstruktionslehre III/IV. Arbeit im Rahmen des HDZ-Zertifikats Baden-Württemberg*. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Rapp, S., Altner, M. & Albers, A. (2020). Benchmarking of Risk Management Methods with Regard to Variations as Source of Risk. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1*, 677–686.
- 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. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Enhancing Design Through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Procedia CIRP, Bd. 91, S. 781–788).
- Rapp, S., Moeser, G., Eichhorn, P. & Albers, A. (2018). Identifying Expedient Variations in PGE – Product Generation Engineering. In P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2018* (n. p.). Linköping, Schweden: The Design Society.
- Rapp, S., Heimicke, J., Weber, J. & Albers, A. (2020). Development of Strategic Guidelines for Agile Parts Maturity Management of Engine Subsystems in the Automotive Industry During Series Ramp-up. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen

- & M. Deininger (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2020. Balancing Innovation and operation* (n. p.). Kopenhagen, Dänemark: The Design Society.
- Sahin, T., Cudok, A., Rapp, S., Inkermann, D., Albers, A., Wattenberg, F., Bursac, N. & Vietor, T. (2018). How to Foster Innovation? Findings and Hypotheses for Collaborations Between Research and Industry. In D. Marjanovic, M. Storga, S. Skec, N. Bojcetic & N. Pavkovic (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 1945–1956). Dubrovnik, Kroatien: The Design Society.
- Schottmüller, M., Rapp, S., Bause, K. & Albers, A. (2019). Steigerung des Systemverständnisses in Bezug auf das Schwingungsverhalten des Fliehkraftpendels durch eine gezielte Analyse der Variationsanteile in Produktgenerationen. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 213–222). Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Walter, B., Rapp, S., Albers, A. & The Design Society (2016). Selecting Appropriate Tools for Synchronous Communication and Collaboration in Locally Distributed Product Development. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2016* (S. 258–267). Bristol, United Kingdom: The Design Society.
- Wessels, H., Heimicke, J., Rapp, S., Grauberger, P., Richter, T., Matthiesen, S. & Albert, A. (2019). Sprintplanung in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis von Referenzsystemelementen. In B. Corves, K. Gericke, K.-H. Grote, A. Lohrengel, N. Müller, A. Nagarajah, F. Rieg, G. Scharr & R. Stelzer (Hrsg.), *17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: Agile Entwicklung physischer Produkte* (S. 200–211). Aachen: RWTH Aachen University.



# Anhang A: Umfrage zur Wiederverwendung von Wissen

Die Studie wurde mit Forschern im Gebiet Design Research durchgeführt im Rahmen des Rigi-Meeting, das vom 13.03.2018 – 17.03.2018 in Karlsruhe stattfand. Tag der Umfrage: 15.03. Nachfolgend sind die Umfrageergebnisse zusammengestellt.

Einleitender Text:

*In the development of a new product, knowledge from previous development projects is used to some extent. This knowledge can come from specific product related sources like existing product models (CAD, FEM, ...) as well as from generalised knowledge like design guidelines which was deduced from analysis of products and design processes.*

Die Fragen wurden jeweils in Bezug auf zwei unterschiedliche Produktgruppen gestellt:

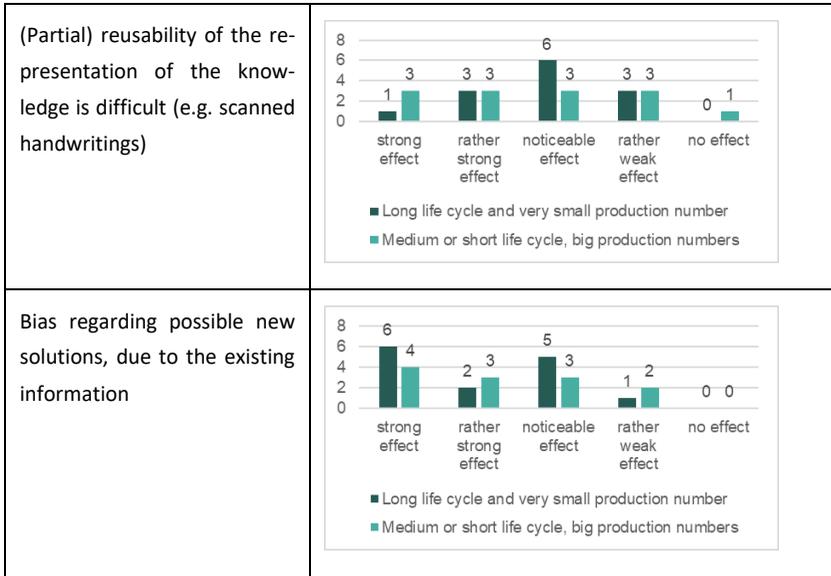
- „Product category: i. Long life cycle and very small production numbers, e.g. Container ships or tunneling machines”
- „Product category: ii. Medium or short life cycle, big production numbers, typically consumer goods, e.g. cars, washing machines, mobile phones”

Frage I:

*Please rate, to which extent the listed factors impair the efficiency of development processes, for example in terms of overall development time, number of necessary iterations or (avoidable) costs. The development of three product categories are considered.*

Faktor	Anzahl Nennungen in Skala																		
Potential challenge/barrier for the reuse of knowledge	<table border="1"> <caption>Data for Potential challenge/barrier for the reuse of knowledge</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>5</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>5</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	2	3	rather strong effect	5	4	noticeable effect	5	4	rather weak effect	1	2	no effect	0	0
Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	2	3																	
rather strong effect	5	4																	
noticeable effect	5	4																	
rather weak effect	1	2																	
no effect	0	0																	
Incompleteness of knowledge	<table border="1"> <caption>Data for Incompleteness of knowledge</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>7</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	3	4	rather strong effect	7	5	noticeable effect	3	3	rather weak effect	0	1	no effect	0	0
Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	3	4																	
rather strong effect	7	5																	
noticeable effect	3	3																	
rather weak effect	0	1																	
no effect	0	0																	
Necessary time to know which information is essential	<table border="1"> <caption>Data for Necessary time to know which information is essential</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>3</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>3</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	2	3	rather strong effect	3	5	noticeable effect	4	4	rather weak effect	3	1	no effect	0	0
Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	2	3																	
rather strong effect	3	5																	
noticeable effect	4	4																	
rather weak effect	3	1																	
no effect	0	0																	
Necessary time to find the required information	<table border="1"> <caption>Data for Necessary time to find the required information</caption> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>6</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	1	4	rather strong effect	3	3	noticeable effect	6	3	rather weak effect	2	3	no effect	0	0
Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	1	4																	
rather strong effect	3	3																	
noticeable effect	6	3																	
rather weak effect	2	3																	
no effect	0	0																	

<p>Application of generalised knowledge to the specific task</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Effect Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>3</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	3	2	rather strong effect	2	4	noticeable effect	5	3	rather weak effect	2	3	no effect	0	0
Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	3	2																	
rather strong effect	2	4																	
noticeable effect	5	3																	
rather weak effect	2	3																	
no effect	0	0																	
<p>Assessment of the effect (e.g. risk,...) of partial changes compared to the existing set of information</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Effect Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>3</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>4</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	3	5	rather strong effect	4	2	noticeable effect	4	5	rather weak effect	1	1	no effect	0	0
Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	3	5																	
rather strong effect	4	2																	
noticeable effect	4	5																	
rather weak effect	1	1																	
no effect	0	0																	
<p>Uncertainty regarding the area of validity of the knowledge</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Effect Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>4</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>3</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	4	3	rather strong effect	3	6	noticeable effect	5	3	rather weak effect	1	0	no effect	0	0
Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	4	3																	
rather strong effect	3	6																	
noticeable effect	5	3																	
rather weak effect	1	0																	
no effect	0	0																	
<p>Traceability of dependencies and reasons</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Effect Category</th> <th>Long life cycle and very small production number</th> <th>Medium or short life cycle, big production numbers</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>strong effect</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>rather strong effect</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>noticeable effect</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>rather weak effect</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>no effect</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers	strong effect	4	4	rather strong effect	5	6	noticeable effect	2	3	rather weak effect	1	0	no effect	0	0
Effect Category	Long life cycle and very small production number	Medium or short life cycle, big production numbers																	
strong effect	4	4																	
rather strong effect	5	6																	
noticeable effect	2	3																	
rather weak effect	1	0																	
no effect	0	0																	



Frage II:

Please answer the following questions.

i. What is the biggest challenge regarding the reuse of knowledge from former product generations in current product development projects from your point of view? Why?

Antworten:

finding the root causes  
 expressing issues in terms of design knowledge/axioms  
 Documentation, knowledge and share of best practices  
 people move on, knowledge is lost  
 knowledge is not easily captured or transmitted - also change in format, in hardware  
 ego of the designer, missing documentation  
 To reuse knowledge, one needs to know what knowledge could be generalized and how.  
 It is a question of methodology

Assessment of effect/risk of partial changes.. new changes often bring new characteristics and are seldom as independent as thought. Few established techniques exists to assess

Attention to detent ownership

Documentation, Time to find existing information

Believe that to improve, one must pre-invent

Personel changes. Poor documentation of changes after release

that this is proven knowledge and we should not challenge or change it

knowledge is not stored from rejected concepts. Normally the final concept is documented

time efficiency because time is nowadays the most critical ressource and with a short-term perspective we keep studying on every- day duties

Poor records "At the end of the design process we have a bunch of drawings and a bunch of e-mails"

To capitalize information is such a way that it can be reused by someone else

Taxonomy/ Store of data to find it easily "right data to the right person at the right moment"

*ii. What are the reasons why the systematic use of reference products (e. g. previous product generations) for the development of a new product generation in design research has so far been little researched?*

Antworten:

lack of respect/ awareness of the power of design methods/ knowledge in academic and industry

Is it?

innovation is the systematic of our age

time, it has been researched

missing data, no real invention

I don't know, probably lack of awareness and to much focus on problem solving

Hmm... Platform based development look into this, but it als has to do with industrial, practice which are not "sexy" to present

lack of researchers training, competitive reasons, IPR

That is not true. Has been done often

Companies do not look at past projects -> lessons learned etc. too much focus on present

this is not the focus of agile approaches

unclear statement of what is the scientific problem to be researched

not sure

Has it? The whole knowledge management community disagree with this statement

lack of time perspective

Because we know what the design outcomes were, but the rationals for decisions may be lost

not agree

No

# Anhang B: Fragebogen der Interviewstudie zu Variationen

Leitfaden für die Experteninterviews in Abschnitt 5.1 (Wattenberg, 2018, S. 85)

## **Kurze Vorstellung der Person und Arbeit**

### **Kurzer Überblick über das bevorstehende Gespräch (Erwartungshaltung und Art der Durchführung)**

#### **Einleitung (5-10 min)**

Wie hat sich die der Beginn des Entwicklungsprozesses für Sie persönlich dargestellt? Was ist Ihr Fallbeispiel?

#### **Modellbildung**

##### 1. Planung von Entwicklungsumfängen

- 1.1. Wie kam es dazu, dass ein neues Produkt entwickelt wurde? (gezielt Nachfragen bzgl. expliziten Einflussfaktoren). Woher kam der Impuls? (Markt vs. Unternehmen)
- 1.2. **Wie haben Sie festgelegt**, welche Bestandteile/Teilsysteme neu entwickelt werden sollen?
- 1.3. Wie hoch war der **Neuentwicklungsanteil** des jeweiligen Teilsystems in Ihrem Fallbeispiel?
- 1.4. **Woher kam das Referenzprodukt** für die Neuentwicklungen in den jeweiligen Teilsystemen?
- 1.5. Wie haben Sie entschieden, wie Sie das **Referenzprodukt in Ihr Produkt einbringen**? Wie kam es dazu? Welche Aspekte haben Sie in Betracht gezogen? Welche Unsicherheitsfaktoren spielten eine Rolle?

##### 2. Konsequenzanalyse von Entscheidungen/Aktivitäten

- 2.1. Welchen **Herausforderungen und Schwierigkeiten** standen Sie nach einer Neuerung in einem Teilsystem gegenüber? "Rechte Seite"
- 2.2. Welche **positiven Konsequenzen** ergaben sich durch Ihre Entscheidung für eine bestimmte Art der Neuentwicklung? "Rechte Seite"
- 2.3. Was hatten Sie sich bei Ihrer Entscheidung außerhalb der erreichten Ergebnisse erhofft?
- 2.4. Wie gestaltete sich die **Kostenentwicklung** der Entwicklung des **Teilsystems** nach der Umsetzung Ihrer Entscheidung für eine Art der Neuentwicklung? Wo sind die Kosten entstanden?
- 2.5. Wie gestaltete sich die **Kostenentwicklung** der Entwicklung des **Gesamtsystems** nach der Umsetzung Ihrer Entscheidung für eine Art der Neuentwicklung? Wo sind die Kosten entstanden?
- 2.6. Wie gestaltete sich die **Risikoeentwicklung** der Entwicklung des **Teilsystems** nach der Umsetzung Ihrer Entscheidung für eine Art der Neuentwicklung? "Rechte Seite"
- 2.7. Wie gestaltete sich die **Risikoeentwicklung** der Entwicklung des **Gesamtsystems** nach der Umsetzung Ihrer Entscheidung für eine Art der Neuentwicklung? "Rechte Seite"

## Anhang C: Erhebung zur Modellnutzung

Nachfolgend sind für die evaluierten Modellbestandteile die Darstellungen aufgeführt, die zur Erläuterung genutzt wurden. Diese besteht jeweils aus einer Aussage sowie Beispielen. In der Umfrage war anzugeben, ob der durch Aussage beschriebene Zusammenhang genutzt wurde. Falls ja, konnten zur Nutzung weitere Erläuterungen gemacht werden. Diese Angaben sind im Folgenden unter der jeweiligen Darstellung aufgeführt.

**Gründe für Variationen aus dem Zielsystem heraus** 

**Gründe für Variationen** im Sinne des Modells der PGE sind **Anwender-, Kunden- oder Anbieternutzen sowie Randbedingungen** aus dem Zielsystem zur Entwicklung einer neuen Produktgeneration

**Beispiele:**

- Integration von **Tablet-Technologie in Fahrzeuge** realisiert neuen **Kundennutzen** (hier PV).
- Verwendung von elektromechanischem Aktor statt hydraulischem Aktor **reduziert Fertigungskosten** einer neuen Produktgeneration (**Anbiaternutzen, PV**)

Zielsystem



2    02.08.2020    IPEK – Institut für Produktentwicklung, am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 

### Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

(geplant) Durch die Verbesserung der Qualität eines Wissenstransfers in der PGE soll herausgefunden werden, welcher (neue) Nutzen bspw. durch die Analyse von Produktionsdaten in der Produktentwicklung entstehen/ verbessert werden kann

Ich nutze diesen Zusammenhang, um in einem ggf. agilen Projekt - mindestens aber in der Realisierung einer EG zu identifizieren, welche Funktion diejenige sein sollte, die im nächsten Inkrement umgesetzt werden soll. D.h. nicht, dass ich diesen Zusammenhang erforsche, sondern nutze.

Ähnlich ist es mit dem Thema Anbieternutzen. Viel von dem Wissen, dass man bzgl. Handlungssystem hat aus Vorgängergenerationen soll im Agilen dazu genutzt werden, eine robustere Entscheidungsfähigkeit zu ermöglichen.

PV in Bsp. 1 ist Teil der Motivation meiner Diss

- Ich frage mich da nur, ob da wirklich ein "neuer" Kundennutzen realisiert wird. Wir diskutieren es bei Porsche auch teilweise als Nutzen Integration (wenn der Nutzen die Interaktionsmöglichkeit mit dem Produkt/techn. System ist)

Zur Wissensdokumentation über meine Produktgeneration --> Begründung für Variationen (Aufbau eines Referenzsystem(element)modells)

Noch nicht verwendet, wird aber natürlich interessant werden in Bezug auf Auswirkungen des Umfelds

Im Rahmen der Masterarbeit, um in XR Validierungsumgebungen GV und PV zu visualisieren, bei denen dann Anbieternutzen (Entwicklungsabteilung) und Kundennutzen (Kunde für Küchenumgebungen) mittels eines Fragebogens abgeprüft wurde.

Berechnung Risiko im Modell der PGE

Berechnung Entwicklungsrisiko

aktueller in der Analyse: Wo und wie wirkt sich eine Änderung im ZS bei der (teilweisen) Wiederverwendung eines Systemmodells aus?

**Gründe für Charakteristika gewählter RSE**

**Gründe für** Charakteristika gewählter **Referenzsystemelemente (RSE)** (z. B. die organisatorische Herkunft) sind **Anwender-, Kunden- oder Anbieternutzen** sowie **Randbedingungen** aus dem Zielsystem zur Entwicklung einer neuen Produktgeneration

**Beispiel:**  
(Erstmalige) Integration eines **Touch-Displays** in Gerät zur Herstellung von Salben & Cremes in Apotheken für **übersichtlichere Bedienung**

**Kundennutzen** → **organisatorische Vorteile für Unternehmenskunden**

nach Walterberg 2018

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**IPEK**

3 02.08.2020 IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

Diesen Punkt nutze ich des Öfteren in kooperativen Abschlussarbeiten, um die "Projektart" einzuschätzen. Denn je weiter weg das Wissen, desto weniger Robust ist eine Langfristplanung (also in Tendenzen gedacht natürlich). Das habe ich mit der

Abschlussarbeit Christin Scheib mal initial gemacht.

Romina Blattner (Stratec) hat es (leider nicht so gut) genutzt, um in "Sprint 0" das Vorhaben zu charakterisieren - sicher ist das nicht alles Gold, was glänzt, aber nach einer diesbezüglichen Einschätzung folgt die Wahl des Vorgehens im Projekt. Hier lese ich aktuell die Abschlussarbeit korrektur und kann dir die entsprechenden Passagen zukommen lassen. wird aber ein Sperrvermerk (dh ich lasse es ins Kondensat bringen).

[Anonymisiert] wird es ebenfalls nutzen, um die Art des Vorgehens im Projekt einzuschätzen.

[geplante noch unspezifische Arbeit] Steigerung des Anbieternutzens durch Designentscheidungen mit vergrößertem Herstellkostenwissen (Bereitstellung von Herstellkosteninformationen von Referenzprodukten)

Organisatorische Herkunft im Sinne von Risikoeinschätzungen (Risiko-Portfolio...) genutzt in G1-Einordnungssystematik

- Bedingt genutzt

- im Zuge der Auswahl von Referenzsystemelementen wird der prognostizierte Kunden- (& Anwendernutzen) mittels Kano-Modell dargestellt

- auf Basis dessen folgt Auswahl der RSE

Auch hier Link zur Motivation meiner Diss. Aber eher als Fakt und weniger als "wenn RSE extern, dann xyz"

Geplant

Berechnung von Risiko im Modell der PGE

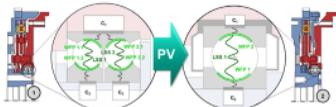
Berechnung Entwicklungsrisiko

**Indikatoren für Variationen im GFZ**



Als **Indikatoren für Variationen** im Sinne des Modells der PGE können **Veränderungen in der mit C&C<sup>2</sup>-A modellierten Wirkstruktur** eines Teilsystems der neuen Produktgeneration **ggü. dem zu Grunde liegenden Referenzsystemelement** genutzt werden

**Beispiel:**  
Übergang von **zweireihigem auf einreihiges Rillenkugellager**  
bei der zweiten ZMS-Produktgeneration



Albers, A., Bunsac, N., & Rapp, S. (2017). PGE-Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweiradmassenschwings. Forschung im Ingenieurwesen, 81(1), 13-31.

4 02.08.2020 IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK

### Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

Ziel in meiner Forschung ist die Zuordnung von Variationen nach der PGE zu bestehenden Änderungsbeschreibungen. Dieser Ansatz kann als Ausgangspunkt dienen.

In der VÖ mit [anonymisiert] - Sprintplanung auf Basis von EGs haben wir die Detailtiefe des GFZ angeschaut und wie diese sich über das Projekt hinweg verändert hat.

Grundlage für Betrachtung von PGE – FGZ

Genutzt um Neuentwicklungsanteile zu identifizieren. Genutzt, nicht daran geforscht!

Ableitung generischer Variationsart im Systemkontext. Nachweis zur Abhängigkeit von Merkmal, Eigenschaft, Funktion, Gestalt und deren Variationen

eAWS-Studie

## Indikatoren für Variationen in weiteren Sichten/ Systemen

KIT  
Karlsruher Institut für Technologie

Anhand von **Eigenschaften und Funktionen** eines Systems sowie für **weitere Systemarten** neben mechatronischen Systemen können **weitere Indikatoren** für die verschiedenen Variationsarten gefunden werden

**Beispiel:**  
Indikatoren für „Prinzipvariation“ bei

- einer **Eigenschaft**
- einem **System gekoppelter Simulationsmodelle**
- einem **Produktions(tell-)system**

Albert, Albert, Rapp, Simon, Falt, Joshua, Hrachter, Tobias, Gail, Sven, Schulz, Mike, Ströminger, Tobias, Siewinger, Markus  
PROPOSING A GENERALIZED DESCRIPTION OF VARIATIONS IN DIFFERENT TYPES OF SYSTEMS BY THE MODEL OF PGE.  
(DESIGN Conference 2020 (in Veröffentlichung))

5    02.08.2020    IPEK – Institut für Produktentwicklung, am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

Ziel in meiner Forschung ist eine generalisierte Beschreibung von technischen Änderung unter Berücksichtigung von Variationen nach der PGE. Am Beispiel des Leitsatz.

Geplante Verwendung: Im Zusammenhang der Vorentwicklung eines automobilen Zulieferers. Kunden bzw. Anwendernutzen werden anhand von Eigenschaften und Funktionen beschrieben. Bei Veränderung des Kunden und damit der Ausprägung von Eigenschaften/ Funktionen werden noch während des Vorentwicklungsprozesses "Produkt"-Variationen durchgeführt. Einhergehend können damit auch Variationen am Validierungssystem notwendig sein.

Geplant

Variationsarten am Produktionssystem betrachtet

Im Rahmen von VR gestützten Validierungsstudien konnten durch Variation der Funktionen, und Eigenschaften der CS verschiedene Variationsarten für die Synthese eines auf Autos angebrachten Verkehrszeichens identifiziert werden. (VR Studie IP Team 2 Bosch)

Für die Bewertung von Risiko im Modell der PGE. Für die Initiale Bewertung von Produktprofilen

- Klassische Traceability Frage im MBSE: Wie wirkt sich die Änderung eines Elements einer Modellelement-Art (Anforderungen, Funktion, techn. Teilsystem etc.)

auf Elemente anderer Modell-Element-Arten aus und wie mache ich diesen Zusammenhang sichtbar

**Modellelement Referenzsystem**



Mit dem Modellelement des **Referenzsystems** kann abgebildet werden, dass verwendete **Referenzen aus verschiedenen bestehenden Systemen** stammen können und **nur Ausschnitte dieser Systeme** sein können

**Beispiel:**  
Ausgewählte Referenzsystemelemente bei der Entwicklung der ersten Produktgeneration des Tesla Roadster



Ribben, A., Kapp, S., Spädinger, M., Richter, T., Birk, C., Mathäus, M., & Wetzels, H. (2019). Das Referenzsystem im Modell der PGE-Produktgenerationsentwicklung: Vorschlag einer generalisierten Beschreibung von Referenzprodukten und ihrer Wechselbeziehungen.

6 02.08.2020 IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK

Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

(geplant) Eine Beschreibung der Wissenstransfers und der Herkunft des Wissens aus spezifischen Phasen des Produktlebenszykluses (Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und Produktion) ist in meiner Forschung geplant. Dabei sollen auch das Modell des Referenzsystems genutzt werden.

Ein Nutzung ist möglicher zur automatisierten Gültigkeitsprüfung bei Änderungen. Ist aber eher ein Randgebiet meiner Forschung

Siehe Punkt 2 --> implizit ist das in [anonymisiert] mit eingeflossen.  
Ich werde das alles aber nicht als Teil meiner Methoden nutzen, sondern eher als Art Ergebnis meiner Methode "jedes Projekt sollte zukünftig mit einer Abschätzung starten, in der ...". Zudem zeigt das ja auch die Relevanz, dass man nicht immer gleich vorgeht.

G1-Einordnung

- Synthese und Analyse des Referenzsystems zur Unterstützung der Zielsystementwicklung

- verschiedene plausible Referenzsystemelemente zur Erfüllung eine Produkteigenenschaft werden modelliert, bewertet und dann RSE gezielt ausgewählt

Bisher noch nicht im Detail genutzt, zukünftig geplant:

Bei der Entwicklung eines Interaktionssystems zwischen Anwender und Produkt sind für mich auch eine menschliche Referenz und das Referenz Interaktionsmuster relevant.

Evtl. nutze ich das RSE als Medium für meine Wissensdokumentation --> Modell der internen Referenzsystemelementenspender (z.B. Vorgängerprodukt)

Externe RSE müssen dann noch geeignet integriert bzw. mitgedacht werden

schon in Masterarbeit

Referenzsystem besteht bei mir aus Produkt und Produktionssystem

- Identifikation von lösungsspezifischen Elementen
- mathematische Abbildung von arm auf Gn
- Initiale ZS Bildung

Modell der PGE am Beispiel autonomes Fahren

- Teilweise (am Rande) in der Analyse: Wie bilde ich das Referenzsystem modellbasiert ab, wenn RSE aus verschiedenen Systemen stammen?

Zur Beschreibung der Entwicklungshistorie im Modell der PGE des Produktportfolios;

### Charakteristika von RSE als Einflussfaktoren



Der **Einfluss von Referenzsystemelementen** auf den Entwicklungsprozess kann **durch ausgewählte Charakteristika erfasst** werden, z.B. die organisatorische Herkunft

**Beispiel:**  
Mögliche Charakteristika von Referenzsystemelementen sind die

- **organisatorische Herkunft** (unternehmensintern vs. -extern) oder
- **die Domäne** (z.B. Mechanik vs. Elektronik bzw. neu vs. bekannt für Unternehmen)

Organisatorische  
Herkunft  
unternehmens-  
intern

Domäne des RSE  
neu

Albers, A., Haag, F., Heitger, N., Anslan, M., Rapp, S., & Bursac, N. (2016). Produktgenerationsentwicklung-Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automatisierten Produktentwicklung. In Proceedings (Vol. 12).

Albers, A., Rapp, S., Spädinger, M., Richter, T., Dirk, C., Mathaler, M., & Wessels, H. (2019). Das Referenzsystem im Modell der PGE-Produktgenerationsentwicklung: Vorschlag einer generalisierten Beschreibung von Referenzprodukten und ihrer Wechselbeziehungen.

7    02.08.2020
IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

(geplant) --> hier gilt selbiges wie bei der vorherigen Frage:

Eine Beschreibung der Wissenstransfers und der Herkunft des Wissens aus spezifischen Phasen des Produktlebenszykluses (Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und Produktion) ist in meiner Forschung geplant. Dabei sollen auch das Modell des Referenzsystems genutzt werden.

Ich betrachte verschiedene Domänen aus denen Änderungen kommen. Eine Auswertung hinsichtlich Domänen und Variationsarten und Auswirkungen aufeinander ist möglichst möglich. Momentan kein Fokus der Arbeit

Beispielhaft für Folgerungen aus G1-Einordnung

Fokus zunächst auf interne

Kernaspekt der Masterarbeit

Habe die Risikomatrix genommen, da die Herkunft rausgeschmissen (y-Achse) und die Änderungsausbreitung stattdessen genommen

Bewertung der Entwicklungssituation zur Abschätzung des Aufwands, des Vorgehens, der referenzstrukturen (vgl. Heitger)

Berechnung Entwicklungsrisiko

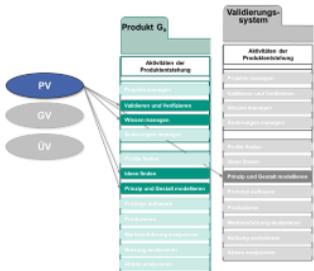
**Auswirkungen von Variationen**



Anhand einer **beabsichtigten Variationsart** für ein Teilsystem können **situationspezifisch Entwicklungsaktivitäten** abgeleitet werden und methodische Unterstützung kann passend adaptiert werden

**Beispiel:**  
Die beabsichtigte **Prinzipvariation** eines Teilsystems (Integration von Touch-Display in neue Produktgeneration an Stelle von Tasten-Interface) erfordert die Aktivitäten **„Ideen finden“**, **„Modellieren von Prinzip und Gestalt“** sowie **„Validieren und Verifizieren“** und **„Wissen managen“**. Außerdem wird bei der Validierungssystementwicklung ebenfalls die Aktivität **„Modellieren von Prinzip und Gestalt“** notwendig.

Zum Modellieren von Prinzip und Gestalt können bei GV z.B. (u.a.) Optimierungsmethoden relevant sein. Bei PV sind darüber hinausgehende Ansätze zu wählen



Produkt G <sub>1</sub>	Validierungssystem
Aktivitäten der Produktentwicklung	Aktivitäten der Produktentwicklung
Validieren und Verifizieren	Validieren und Verifizieren
Wissen managen	Wissen managen
Ideen finden	Ideen finden
Modellieren von Prinzip und Gestalt	Modellieren von Prinzip und Gestalt
...	...

8 Albers, A., Rapp, S., Peglow, H., Stumfinger, T., Helmcke, J., Watterberg, F., & Wessels, H. (2019). Variations as Activity Patterns: A Basis for Project Planning in PGE. IPEK Product Generation Engineering, Procedia CIRP, 84, 968-972.



Ansatzweise in Folgerungen bei G1-Einordnung

Werde ich als Anforderung an die Wissensdokumentation mitbetrachten

Geplante Verwendung: Charakteristika der RSE begründet den (Neu-)Aufbau des Validierungssystems

in MA angerissen

auch bei der Beschreibung von Systemen und deren Entwicklung in Generationen muss diese Anforderung erfüllt sein. Eine dedizierte Erforschung erfolgte jedoch nicht.

### Risiken im Modell der PGE

**Variationen und/ oder verschiedene Charakteristika von Referenzsystemelementen können zu unterschiedlichen Formen von Entwicklungsrisiken führen**

**Beispiel:**  
Die Tabelle zeigt, mit welchen Risiko-Dimensionen Variationen in der Risiko-Kategorie „Technologie, Produkt, Produktion, Know-How“ auf Basis von Fallbeispielen in Verbindung gebracht werden kann

Basierend auf Rapp, Simon; Altner, Moritz; Albers, Albert: BENCHMARKING OF RISK MANAGEMENT METHODS WITH REGARD TO VARIATIONS: AS A SOURCE OF RISK, DESIGN Conference 2020 (in Veröffentlichung) & Altner 2019: Erstellung eines Methodik-Benchmarks zur Bewertung von Variationen in der PGE, Masterarbeit IPEK

Risiko-Kategorien nach (Dellmen 2016; Denning 2013; Parson et al. 2008; Song et al. 2013; Park 2010; Yeo and Ren 2009)	Bekannte Risiko-Dimensionen in den verschiedenen Kategorien	In Beispielen beobachtete Zusammenhänge zwischen bekanntem Risiko-Dimensionen und Variationen im Sinne des Modells der PGE (Waltberg 2016; Albers et al. 2017a)		
		PV	GV	UV
	Schaltung der Funkonanzität		x	
	Interaktionen zwischen Technologien		x	x
Technologie, Produkt, Produktion, Know-How	Verhalten neuer Technologien unter realen Bedingungen	x	x	
	Anpassung des Produktionsplans	x		
	Entstehung und Reifegrad neuer Technologien	x		
	Einführung von Termini	x		
	Unvollständiges Know-How und unbetriebene Technologie	x	x	
	Unvollständige Prozessspezifikationen		x	
	Unvollständige Prozessspezifikationen	x		
	Unvollständiges Verständnis zu Kunden und Leistungen	x	x	

12 02.08.2020
IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nutzung des Zusammenhangs im Rahmen von Forschungsarbeiten:

Wird vielleicht bei der Kombination von bestimmten Änderungen mit den zugeordneten spezifischen Variationen eine Rolle spielen und die Bereiche in denen durch die Änderungen ein Risiko/eine Unsicherheit entsteht.

Werde ich als Anforderung an die Wissensdokumentation mitbetrachten

in MA oberflächlich betrachtet, Referenz bei Moritz Altner

Risikoabschätzung durch Variationsarten an Produkt und Produktionssystem sowie der Änderungsausbreitung

Das Darstellen von Variationen in AR/VR Validierungsumgebungen, kann je nach Umfang der Variation einen erhöhten Implementierungsaufwand darstellen.

Dieser erhöhte Aufwand stellt in sich unter verschärften Kosten und Zeitrandbedingungen ein Risiko dar.

Def. Risiko als Unsicherheit bezüglich Zielen:

Bestimmte Variationen sind aufgrund des speziellen PEPs einiger Unternehmen (Bspl TK) nicht darstellbar. Beispiel: Das Verlegen von Hydraulik und Stromleitungen wird immer beim Aufbau der Fördermaschine erst gemacht und für jeweils die neue Maschine eine Variationsart ein Entwicklungsrisiko, wenn man z.B. AR/VR Maintenance Umfänge planen möchte, jedoch die jeweiligen Variationen des Hydraulik/Elektronikkabelbaums garnicht vorhanden sind (Gap zwischen virtuellem Prototyp und realem Aufbau)

Geplantes Paper

Berechnung Entwicklungsrisiko

- Variationsart als Input für Risiko-Analysen

- Nutzung der Tracability in einem Systemmodell, verknüpft mit einer Modellierung der Variationsanteile, um teil-automatisiert Übersichten zu erstellen, die bei der Bewertung des Risikos unterstützen können