

Joshua Fahl

**Produktportfolio-übergreifendes
Spezifizieren von Produktfunktionen
der Sportwagenentwicklung im Modell
der PGE – Produktgenerationsentwicklung**

Product Portfolio-spanning
Specifying of Product Functions within
Sports Car Development in the Model of
PGE – Product Generation Engineering

Band 147

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Joshua Fahl

**Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von
Produktfunktionen der Sportwagenentwicklung im
Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung**

**Product Portfolio-spanning Specifying of Product
Functions within Sports Car Development in the Model of
PGE – Product Generation Engineering**

Band 147

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

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022
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

Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen der Sportwagenentwicklung 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. Joshua Fahl

Tag der mündlichen Prüfung:	09.02.2022
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferenten:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

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 147

Unsere heutigen Märkte bieten den Konsumenten eine fast unbegrenzte Vielfalt an Produktlösungen für alle möglichen Aufgabenstellungen und Kundenwünsche. Durch die Kombination von Mechanik, Elektronik und Informatik, hin zu mechatronischen Produkten ergibt sich für die Produktentwickler in praktisch allen Produktklassen ein nahezu unendlich großer Lösungsraum der Möglichkeiten. Gleichzeitig ist der mittlerweile – unter anderem durch das Internet – forcierte globale Wettbewerb um den Kunden ein extremer Treiber für die Funktionsanreicherung in den Produkten, um auf den umkämpften Käufermärkten Produktdifferenzierungen zu erreichen. Dieser Zwang zur Produktdifferenzierung führt, wie man zum Beispiel auch im Markt der Automobile feststellen kann, zu einer nahezu explodierenden Funktionsvielfalt. Neben den klassischen Bedien-, Antriebs- und Betätigungsfunktionen, die für die eigentliche Fahraufgabe zentral sind, werden die Fahrzeuge mehr und mehr mit ergänzenden Systemen ausgestattet, die zum Beispiel ein teilautomatisiertes Fahren oder auch eine Entertainment-Ausstattung auf höchstem Niveau erlaubt. Der riesige Raum der konzeptionellen Möglichkeiten für neue Funktionen muss dabei allerdings gleichzeitig unter dem Fokus der Kosten betrachtet werden. Der globale Wettbewerb führt natürlich in den jeweiligen Produktsegmenten und Produktklassen auch zu einem Preis- und damit Kostenwettbewerb. Dies stellt eine weitere zentrale Anforderung an die moderne Produktentwicklung, das heißt Funktionsrealisierung bei möglichst niedrigen Kosten sicherzustellen. Für die Automobilindustrie mit ihren heute sehr umfangreichen Produktprogrammen in unterschiedlichen Fahrzeuglinien, die dann jeweils in Generationen entwickelt werden, stellt sich nun die besondere Herausforderung: Wie können aus der Funktionssicht Synergiepotenziale erschlossen werden, indem Produktgenerations- und Produktlinien-übergreifend Funktionsdefinitionen für zukünftige Fahrzeuge in der strategischen Planung der Fahrzeuggenerationen und -linien definiert und klassifiziert werden?

Auf der Basis des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung, beziehungsweise PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS, ist eine übergreifende Beschreibung von Produktgenerationen, Produktlinien und Produktportfolio möglich. Bisher wurde die Produktgenerations-übergreifende Funktionsdefinition allerdings noch nicht vollständig in das SGE/PGE-Modell integriert und durchdrungen.

An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Joshua Fahl an. Durch die Nutzung der Potenziale der SGE/PGE in einem Produktportfolio-übergreifenden Ansatz hat Herr Fahl neue Möglichkeiten der Funktionsdefinition in der Produktplanung erforscht und zu Methoden verdichtet. Herr Fahl leistet damit einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag zur weiteren Ausgestaltung des SGE-Modells nach ALBERS und stellt gleichzeitig für die Praxis nutzbare Konzepte im Kontext des ASE – Advanced Systems Engineering zur Verfügung.

Kurzfassung

Das Funktionsspektrum heutiger Generationen hochentwickelter Fahrzeuge hat sich im letzten Jahrzehnt, aufgrund steigender Kunden- und Anwenderanforderungen u.a. an Fahrerassistenz, Digitalisierung und Elektromobilität, mehr als vervierfacht. Empirische Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass der Fokus auf den für Kunden oder Anwender wahrnehmbaren Funktionen liegt, die einen direkt greifbaren Wert oder Nutzen des Gesamtproduktes schaffen. In der automobilen Entwicklungspraxis zeigt sich zudem, dass solche, mitunter komplexe, Funktionen nicht mehr nur für einzelne, automobiler Produktgenerationen, sondern übergreifend für das gesamte Produktportfolio eines Anbieters entwickelt werden müssen. Produktentwickelnde stehen daher vor der Herausforderung, teils diametrale Anforderungen sowie Wechselwirkungen vielfältiger Produktgenerationen aus verschiedenartigen Produktlinien bereits beim Spezifizieren der Funktionen zu berücksichtigen. Da es an geeigneter prozessualer und methodischer Unterstützung fehlt, stellt sich die Frage, wie eine transparente und durchgängige Funktionsentwicklung in diversifizierten Produktportfolios zukünftig im Rahmen der Produktspezifikation in der Frühen Phase synergistisch gestaltet werden kann?

In der vorliegenden Arbeit wird daher, auf Grundlage des modelltheoretischen und methodischen Gefüges der KaSPRO – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, die prozessuale und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren aus Funktionssicht empirisch analysiert, in einer dreiteiligen Systematik synthetisiert sowie in der Entwicklungspraxis angewandt und evaluiert. Der erste Bestandteil der präskriptiven Systematik fokussiert die Definition eines konsistenten Verständnisses sowie die Abbildung und Variation von (Produkt-)Funktionen auf Basis des Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS. Zu diesem Zweck wird ein Produktfunktions-Modell aus empirischen Erkenntnissen entwickelt, das den Produktentwickelnden beim effektiven Spezifizieren leitet. Den zweiten Kernbestandteil bildet ein generisches Referenz-Produktmodell, das die komplexe Produktspezifikation durch Verknüpfung mit dem erweiterten Systemtripel Ansatz und dem Referenzsystem in der Frühen Phase strukturiert. Vervollständigt wird die Systematik mit einem Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE. Im Zuge dessen wird zwischen den vier iterativen Phasen der Generierung und Priorisierung von Funktionsideen [1], der Spezifikation einer Produktfunktion [2], der Realisierung einer Produktfunktion [3] und der Beendigung des Funktionslebenszyklus [4] differenziert. Eine Produktfunktions-Roadmap fungiert als durchgängiges und konsistentes Planungs- und Steuerungsinstrument. Die Evaluationsergebnisse und -erkenntnisse aus Fallstudien in der Sportwagenentwicklung zu Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik bestätigen die effektive Anwendbarkeit der Unterstützungswerkzeuge und zeigen im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung initial einen Erfolgsbeitrag zur Transparenz und Durchgängigkeit der Produktspezifikation aus Funktionssicht.

Abstract

The functional spectrum of today's generations of highly developed vehicles has more than quadrupled in the last decade due to increasing customer and user requirements for e.g., driver assistance, digitalization, and electro mobility. Empirical studies of this thesis demonstrate that the focus lies on the functions that are perceived by customers or users and which create a directly tangible value or benefit of the overall product. In automotive development practice, it is also apparent that such functions, often complex in nature, must no longer be developed only for individual automotive product generations, but for the entire product portfolio of a provider. Product developers are therefore faced with the challenge of considering partly diametrical requirements as well as the interactions of diverse product generations from various product lines already while specifying the functions. Since there is a lack of suitable procedural and methodical support, the question arises how a transparent and consistent function development in diversified product portfolios can be synergistically designed in the future within the framework of the product specification in the Early Phase?

In the presented research, based on the model-theoretical and methodical framework of the KaSPro – Karlsruhe School of Product Development, the process-related and methodical support of the product developer in specifying product portfolio-spanning from a functional perspective is empirically analyzed, synthesized in a three-part systematic as well as applied and evaluated in development practice. The first part of the prescriptive systematic focuses on the definition of a consistent understanding as well as the mapping and variation of (product) functions based on the reference system in the model of PGE – Product Generation Engineering according to ALBERS. For this purpose, a product function model is developed from empirical findings, which guides the product developer to specify effectively. The second core component is a generic reference product model, which structures the complex product specification by linking it with the advanced system triple approach and the reference system in the Early Phase. The system is completed with a reference process for the product portfolio-spanning specification of product functions in the model of PGE. In the course of this process, a distinction is made between the four iterative phases of generating and prioritizing function ideas [1], specifying product functions [2], realizing product functions [3] and ending function life cycles [4]. A product function roadmap serves as a continuous and consistent planning and steering instrument. The evaluation results and findings from case studies on product functions of vehicle aerodynamics in sports car development confirm the effective applicability of the support tools and demonstrate an initial success contribution to the transparency and consistency of the product specification from a functional perspective in the Live-Lab IP – Integrated Product Development.

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand im Zuge eines Kooperationsprojektes während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und als Entwicklungsingenieur für das Portfolio- und Anforderungsmanagement aus Funktionssicht bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG im Entwicklungszentrum Weissach. An dieser Stelle möchte ich all denjenigen Menschen danken, die mich in unterschiedlicher Weise auf meinem Weg und bei der Anfertigung der Dissertation unterstützt haben.

Mein außerordentlicher Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die Betreuung meiner Arbeit und dem damit entgegengebrachten Vertrauen, die Forschung am IPEK und insb. am Modell der PGE mitgestalten zu dürfen. Die inspirierenden wissenschaftlichen Gespräche und wertvollen Denkipulse trugen entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit bei. Für die Übernahme des Korreferats sowie die wertvollen Anregungen am Ende meines Promotionsprojektes danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu. Ebenso bedanke ich mich bei Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Barbara Deml für den Prüfungsvorsitz und Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für das kurzfristige Einspringen als Korreferentin.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Dipl.-Phys. Hansjörg Maier und Herrn Knuth Walczak für die Ermöglichung der Forschungskooperation und die eingeräumten Freiräume im Arbeitsalltag. Meinen Kollegen und Wegbegleitern in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management und bei der Porsche AG danke ich für die erkenntnisreichen Diskussionen und wertvollen Impulse aus der Entwicklungspraxis. Mein exzeptioneller Dank gilt hierbei meinem stets bereichernden Diskussionspartner und Mitsreiter Herrn Tobias Hirschter, der entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Besonders hervorheben möchte ich zudem Frau Katharina Dühr sowie die Herren Dr.-Ing. Simon Rapp, Dr.-Ing. Jonas Reinemann, Dr.-Ing. Florian Marthaler, Sebastian Hünemeyer und Markus Spadinger. Einen großen Dank richte ich zudem an alle Abschlussarbeitenden, die ich direkt & indirekt betreuen durfte: Rebecca, Jannik, Marvin, Tim, Gabriel, Steffen und Kevin. Dankeschön! Für das Lektorat möchte ich meiner ehemaligen, gymnasialen Deutschlehrerin Frau OStR Sarah Michels meinen speziellen Dank ausdrücken.

Mein abschließend größter Dank gilt meinen Eltern Rudolf und Marion und meinen Schwestern Joanna und Alisha, die mich stets unnachgiebig gefördert, geduldig unterstützt und beständig ermutigt haben. Hierfür danke ich Euch herzlichst. Meiner Freundin Kristin danke ich außerordentlich und von ganzem Herzen für Ihren unermüdlichen Zuspruch und Ansporn, unverzichtbaren Rückhalt sowie die willkommenen Momente der Abwechslung gerade in den letzten Zügen der Ausarbeitung.

Februar, 2022

Joshua Fahl

*Humans are allergic to change.
They love to say, „We've always done it this way.”
I try to fight that.*

(Rear Admiral) Grace Murray Hopper, 1987.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiv
Tabellenverzeichnis	xxvi
Abkürzungsverzeichnis	xxvii
Formelverzeichnis	xxx
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen und Motivation.	1
1.2 Fokus der Arbeit.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Grundlagen und Stand der Forschung	8
2.1 Systemisches Verständnis in der Produktentstehung.	8
2.1.1 Systemtheorie und Systems Engineering.....	9
2.1.2 Modelltheorie und -verständnis	21
2.1.3 Produktentstehungs- und Entwicklungsprozesse	25
2.1.4 Modellbasierte Entwicklung (MBE).....	45
2.1.5 Zwischenfazit: Schlüsselfaktoren	48
2.2 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers.....	48
2.2.1 Innovationsverständnis und Produktprofil.....	49
2.2.2 Grundlagen des Modells der PGE.....	55
2.2.3 Referenzsystem im Modell der PGE	59
2.2.4 Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE.....	60
2.2.5 Frühe Phase im Modell der PGE.....	62
2.2.6 Zwischenfazit: Schlüsselfaktoren	66
2.3 Produktspezifikation in der Frühen Phase der Entwicklung einer Produktgeneration.....	67
2.3.1 Methoden der Standardisierung und Entwicklungsvorhersage ..	68
2.3.2 Risiko- und Reifegradverständnis in der Produktentwicklung ..	76
2.3.3 Validierung im Produktentstehungsprozess	79
2.3.4 Zwischenfazit: Schlüsselfaktoren	86
2.4 Fazit: Forschungslücke und Erfolgsfaktoren.	86

3	Zielsetzung und Vorgehensweise	89
3.1	Zielsetzung	89
3.1.1	Forschungsbedarf und -ziel	89
3.1.2	Forschungshypothesen	91
3.1.3	Forschungsfragen	91
3.2	Vorgehensweise	93
3.2.1	Forschungsmethode	94
3.2.2	Empirische und Literatur-basierte Methoden	96
3.2.3	Untersuchungsumgebungen	97
3.3	Fazit: Forschungsdesign	101
4	Empirische Untersuchungen zur Spezifizierung von Produktkonzepten aus Funktionssicht.....	103
4.1	Vorgehensweise und Betrachtungsumfeld der Deskriptiven Studie I. .	103
4.2	Analyse von Prozessen und Methoden der funktionalen Produktspezifikation in der automobilen Produktentwicklungspraxis ...	105
4.2.1	Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen	105
4.2.2	Analyse des Prozesses zur Entwicklung von Funktionen für das Portfolio eines automobilen Original Equipment Manufacturer (OEM)	107
4.2.3	Analyse der Methoden und Artefakte zur Entwicklung von funktionalen Produktkonzepten in der automobilen Produktspezifikation	111
4.2.4	Zwischenfazit: Handlungsfelder.....	116
4.3	Unterstützungsbedarf und Lösungsansätze zum Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes	117
4.3.1	Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen	118
4.3.2	Bedarfsanalyse zur Unterstützung der Spezifikation von Produktkonzepten aus Funktionssicht.....	119
4.3.3	Branchen-übergreifende Generierung alternativer Lösungen zur Entwicklungsunterstützung des Spezifizierens aus Funktionssicht	125
4.3.4	Zwischenfazit: Handlungsfelder.....	130
4.4	Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und - abbildung in der Frühen Phase der Produktentwicklung	131
4.4.1	Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen	132
4.4.2	Anbieter-übergreifende Analyse und Synthese des Funktionsverständnisses in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklungspraxis.....	133
4.4.3	Identifikation von Mustern aus Funktionssicht bei der Variation physischer Elemente im Modell der PGE	138

4.4.4	Vertiefende Analyse von Phänomenen der Variation von Funktionen am Beispiel von alternativen Wankstabilisierungssystemen in der Sportwagenentwicklung	143
4.4.5	Zwischenfazit: Handlungsfelder.....	152
4.5	Fazit: Anforderungen an die Präskriptive Studie.	153
5	Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE.....	157
5.1	Verständnis und Abbildung von (Produkt-) Funktionen im Modell der PGE.....	157
5.1.1	Referenzsystem-Elemente (RSE) im Modell der PGE.....	159
5.1.2	Mengenverständnis von Elementen im Modell der PGE	160
5.1.3	Generischer Variationsoperator im Systemkontext im Modell der PGE	161
5.1.4	Systemansichten und -ebenen im Modell der PGE	164
5.1.5	Funktionen im Modell der PGE	168
5.1.6	Zwischenfazit	183
5.2	Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration.....	184
5.2.1	Verknüpfung von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem sowie Referenzsystem im generischen Referenz-Produktmodell.....	185
5.2.2	Zentrale Entwicklungsaktivitäten des erweiterten ZHO-Modells im generischen Referenz-Produktmodell.....	187
5.2.3	Zwischenfazit	188
5.3	Referenzprozess und methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen der automobilen Produktentwicklung	188
5.3.1	Abstraktionsgrade und Nomenklatur des Produktportfolios im Modell der PGE.....	190
5.3.2	Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen	194
5.3.3	Phase 1: Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n)	198
5.3.4	Phase 2: Spezifikation Produktfunktion	203
5.3.5	Phase 3: Realisierung Produktfunktion	208
5.3.6	Phase 4: Stilllegung Produktfunktion	209
5.3.7	Modellierung im iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell.....	210
5.3.8	Zwischenfazit	213
5.4	Fazit: Unterstützungsevaluierung.....	213

6	Evaluation der entwickelten Systematik in der Produktentwicklungspraxis.....	215
6.1	Vorgehensweise und Anwendungsprämissen der Deskriptiven Studie II.....	215
6.2	Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren einer Produktfunktion am Beispiel der automobilen Sportwagenentwicklung	216
6.2.1	Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen	217
6.2.2	Evaluation des Verständnisses von Produktfunktionen sowie Anwendbarkeit des generischen Variationsoperators aus Funktionsicht	218
6.2.3	Evaluation des generischen Referenz-Produktmodells zum Spezifizieren der Produktfunktion eines Sportwagens.....	221
6.2.4	Evaluation ausgewählter Inhalte des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung.....	229
6.2.5	Zwischenfazit	236
6.3	Studentisches Entwicklungsprojekt IP – Integrierte Produktentwicklung.....	236
6.3.1	Studiendesign und -vorgehen in IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020	237
6.3.2	Ergebnisse und Diskussion der Evaluation	239
6.3.3	Zwischenfazit	242
6.4	Fazit: Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion.....	243
7	Zusammenfassung und Ausblick.	247
7.1	Zusammenfassung.	247
7.2	Ergebnistransfer und Ausblick.	255
7.2.1	Transferanwendung des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen auf nicht-automobile Produktentwicklung.....	256
7.2.2	Anbieter- oder Domänen-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen	257
7.2.3	Referenz-Organisationsstruktur eines Anbieters zum Spezifizieren einer Produktgeneration.....	258
	Literaturverzeichnis.	XXXI
	Glossar.....	LXVII
	Anhang.....	LXIX
A.	Weiterführende Grundlagen und Ergänzungen zum Stand der Forschung.....	LXIX
A.1	Systemisches Verständnis in der Produktentstehung.....	LXIX
A.2	Produktspezifikation in der Frühen Phase	LXXIX

B.	Erläuterung empirischer und Literatur-basierter Methoden in dieser Forschungsarbeit.....	LXXXVII
B.1	Teilnehmende Beobachtung	LXXXVII
B.2	Inhaltsanalyse von Prozessen, Methoden und Artefakten.....	LXXXVIII
B.3	Fragebogen-gestützte Umfrage.....	LXXXIX
B.4	Delphi-Methode.....	XC
B.5	Experteninterview.....	XC
B.6	Fallstudie.....	XCI
B.7	Live-Lab	XCII
C.	Deskriptive Studie I: Ergänzungen zu den empirischen Untersuchungen zur Spezifizierung von Produktkonzepten aus Funktionsicht.....	XCIII
C.1	Unterstützungsbedarf und Lösungsansätze zum Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes.....	XCIII
C.2	Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase der Produktentwicklung.....	XCIV
D.	Präskriptive Studie: Ergänzungen zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE.....	CVIII
D.1	Verständnis und Abbildung von (Produkt-) Funktionen im Modell der PGE	CIX
D.2	Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration	CXVI
D.3	Referenzprozess und methodische Unterstützung des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen	CXVIII
E.	Deskriptive Studie II: Ergänzungen zur Evaluation der entwickelten Systematik in der Produktentwicklungspraxis.....	CLVII
E.1	Evaluation ausgewählter Inhalte des Referenzprozesses und methodischer Unterstützung.....	CLVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Wachstum des Funktionsspektrums wahrnehmbarer Funktionen der Fahrerassistenz seit 2007 (Corbett, Brunner, Schmidt et al., 2018; Weissler, 2018)	2
Abbildung 1.2:	Fokus sowie relevante Forschungsfelder und -beiträge der vorliegenden Arbeit – Darstellung in Anlehnung an Blessing & Chakrabarti (2009, S. 66).....	5
Abbildung 1.3:	Aufbau der vorliegenden Arbeit – Darstellung in Anlehnung an Heitger (2019, S. 4)	6
Abbildung 2.1:	Ursprung der Systemtheorie und historische Entwicklung des Systems Engineering in Anlehnung an Gausemeier (2013, S. 36)	9
Abbildung 2.2:	Hierarchisches, struktureles und funktionales Systemkonzept nach Ropohl (2009, S. 76).....	11
Abbildung 2.3:	Kombination der drei Konzepte der Systemtheorie der Technik nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 23)	13
Abbildung 2.4:	Beschreibungsmodell für Funktionen nach Ehrlenspiel (2009, S. 407).....	16
Abbildung 2.5:	Verlauf der Ideenproduktion über dem Abstraktionsgrad nach VDI-Richtlinie 2803 (VDI-Richtlinie 2803-1:2019-01, S. 11)	17
Abbildung 2.6:	Strukturierung von Funktionen nach Feldhusen & Grote (2013, S. 244).....	18
Abbildung 2.7:	Modellbildung und Modellnutzung nach Lohmeyer (2013, S. 17)	22
Abbildung 2.8:	Framework der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung nach Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014, S. 7).....	23
Abbildung 2.9:	Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 39)	24
Abbildung 2.10:	Auflösungsgrade des Produktentstehungsprozesses nach Lindemann (2009, S. 38) – Darstellung nach Heitger (2019, S. 35)	26
Abbildung 2.11:	SPALTEN-Problemlösungsmethodik nach Albers, Burkardt, Meboldt et al. (2005, S. 5).....	28
Abbildung 2.12:	Regelkreis der Ingenieurstätigkeit nach Ropohl (1975, S. 33).....	30
Abbildung 2.13:	Unterscheidung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen nach Ebel (2015, S. 67) – Darstellung nach Heitger (2019, S. 55)	32
Abbildung 2.14:	Erweitertes ZHO-Modell nach Albers, Ebel & Lohmeyer (2012, S. 8)	33
Abbildung 2.15:	Generationen des Stage-Gate Ansatzes nach Cooper (1994, S. 5)	34

Abbildung 2.16:	Schematischer Fahrzeugentwicklungsprozess (FEP) am Beispiel des Porsche 911 nach Frech (2018, S. 12) – Darstellung nach Fahl (2017, S. 29).....	36
Abbildung 2.17:	Framework der Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung nach Albers & Muschik (2010, S. 6).....	37
Abbildung 2.18:	Allgemeines Modell der Produktentwicklung der VDI-Richtlinie 2221 nach VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11, S. 31.....	39
Abbildung 2.19:	Ontologie der C&C ² -Elemente sowie Elementmengen nach Matthiesen (2021, S. 424) in Anlehnung an Albers & Matthiesen, 2002; Albers & Wintergerst, 2014.....	40
Abbildung 2.20:	C&C ² -Wirknetz am Beispiel eines Hybrid-Antriebsstrangs nach Albers & Wintergerst (2014, S. 11).....	41
Abbildung 2.21:	iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016, S. 5).....	43
Abbildung 2.22:	Teilmengen der modellbasierten Entwicklung (MBE) nach Munker (2016, S. 9).....	45
Abbildung 2.23:	Innovationsverständnis nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018, S. 2) und Albers, Heimicke, Walter et al. (2018)	49
Abbildung 2.24:	Historisches Beispiel der Veränderung und Weiterentwicklung von Produktprofilen nach Albers (2020, S. 16) und Albers, Heimicke, Walter et al. (2018)	51
Abbildung 2.25:	Kano-Modell nach Kano, Seraku, Takahashi et al. (1984) und Bailom, Hinterhuber, Matzler et al. (1996, S. 118) – Darstellung nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 3).....	54
Abbildung 2.26:	Schematische Visualisierung der unterschiedlichen Ebenen des Eigenschaftsprofils nach Heitger (2019, S. 126)	66
Abbildung 2.27:	Zuordnung der Spezifikation (i.S.v. Artefakt) und der Aktivität des Spezifizierens im ZHO-Modell (Fahl, Hirschter, Wöhrlé et al., 2021, S. 2483).....	68
Abbildung 2.28:	Schematische Gliederung des Produktportfolios eines Anbieters – Darstellung in Anlehnung an Sekolec (2005, S. 20).....	69
Abbildung 2.29:	Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden nach Albers, Scherer, Bursac et al. (2015, S. 4) und Bursac (2016, S. 56).....	71
Abbildung 2.30:	Entwicklungsprozesse des Baukastens und der Produkte nach Albers, Bursac & Scherer (2014, S. 20) und Bursac (2016, S. 62)	72
Abbildung 2.31:	Darstellung einer Roadmap nach (EIRMA, 1997)	74
Abbildung 2.32:	Vorgehen beim einfachen Roadmapping (Specht, Behrens & Richter, 2017, S. 72).....	75
Abbildung 2.33:	Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse mit Produkt-Technologie Verknüpfung nach Specht, Behrens & Richter (2017, S. 75).....	75
Abbildung 2.34:	Validierung im System der Produktentstehung nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 545).....	80

Abbildung 2.35:	Push-Prinzip und Pull-Prinzip der Validierung nach Albers, Matros, Behrendt et al. (2015, S. 78)	82
Abbildung 2.36:	(Sub-)Systemklassierung und -wechselwirkung zur Abbildung der Verknüpfung von Manöver und Phänomenen im Kontext der Noise Vibration Harshness Validierung von Fahrzeugen nach Geier, Stier, Düser et al. (2009, S. 5).....	85
Abbildung 2.37:	Berücksichtigung der identifizierten Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation in relevanten, bestehenden Ansätzen und Modellen in der Literatur (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 359).....	87
Abbildung 3.1:	Design Research Methodology (DRM) in Bezug zur vorliegenden Arbeit nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 15).....	94
Abbildung 3.2:	Mögliche Typen von Forschungsprojekten in der Produktentwicklung nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 18) und Zuordnung der vorliegenden Arbeit zu Projekttyp 5	95
Abbildung 3.3:	Integrated Design Support Development Modell nach Marxen (2014, S. 179) und in Bezug zur vorliegenden Arbeit.....	97
Abbildung 3.4:	Betrachtungsfokus der Produkt- und Konzeptentwicklung in der Organisationsstruktur der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Anlehnung an Braess & Seiffert (2013, S. 1135)	98
Abbildung 3.5:	Die fünf Phasen des Live Labs IP – Integrierte Produktentwicklung (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017, S. 1017; IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020)	99
Abbildung 3.6:	Übergreifende Vorgehensweise der vorliegenden Forschungsarbeit .	102
Abbildung 4.1:	Verknüpfung zwischen Forschungsfragen (FF) und Abschnitten der Deskriptiven Studie I (DS-I) in der vorliegenden Arbeit – Darstellung nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 68)	104
Abbildung 4.2:	Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 4.2 der DS-I	106
Abbildung 4.3:	Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung (Prozessanalyse).....	107
Abbildung 4.4:	Schematische Zusammenhänge von Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen – Darstellung nach Endl (2019, S. 55)	108
Abbildung 4.5:	Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung (Methoden- und Dokumentenanalyse)	111
Abbildung 4.6:	Einordnung der Methoden und Werkzeuge der Funktionsentwicklung in den Produktentstehungsprozess (PEP) – Darstellung nach Endl (2019, S. 71) und Fahl, Hirschter & Albers (2021, S. 5).....	112
Abbildung 4.7:	Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 4.3 der DS-I	118
Abbildung 4.8:	Vorgehen im Zuge der Fragebogenstudie	119

Abbildung 4.9:	Verteilung der Befragten nach Industriesektor und Unternehmensgröße [Mitarbeitende] in der ersten Fragebogenstudie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 358).....	120
Abbildung 4.10:	Verteilung der Befragten nach Berufserfahrung [Jahre] und Tätigkeitsbereich in der ersten Fragebogenstudie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 358).....	120
Abbildung 4.11:	Umfrageergebnis (n=32) zur Relevanz von Erfolgsfaktoren der Produktspezifizierung und Defiziten existierender Ansätze in Forschung und Praxis (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 359) ...	122
Abbildung 4.12:	Umfrageergebnis (n=34) der Fragebogenstudie in IP – Integrierte Produktentwicklung 2018/2019 (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 4)	123
Abbildung 4.13:	Studiendesign und -vorgehen zur branchenübergreifenden Generierung alternativer Lösungen (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 6).....	125
Abbildung 4.14:	Vierte Frage – Unterscheidung zwischen verschiedener Ebenen von Funktionen (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 10)	127
Abbildung 4.15:	Vierte Frage – Studienergebnis aus Problemeingrenzung und Generierung alternativer Lösungen (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 11).....	128
Abbildung 4.16:	Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 4.4 der DS-I	132
Abbildung 4.17:	Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)	134
Abbildung 4.18:	Analyse der Funktionsformulierung von drei Produktgenerationen aus unterschiedlichen Produktlinien auf Basis des funktionalen Produktsteckbriefs (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 5) ..	136
Abbildung 4.19:	Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung der Fallstudie (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)	139
Abbildung 4.20:	Variationsanteile der physischen Elemente eines realen Fahrzeugprojekts G_n in Bezug zur Vorgänger-Produktgeneration G_{n-1} (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 668)	140
Abbildung 4.21:	Zusammenhang zwischen Veränderungen von Funktionen des Gesamtproduktes und den Variationsarten physischer Elemente (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 669).	141
Abbildung 4.22:	Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung der Fallstudie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 6).....	144
Abbildung 4.23:	Übersicht der betrachteten alternativen Referenzsystem-Elemente (RSE) der passiven, hydraulisch aktiven und elektromechanisch aktiven Wankstabilisierung (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 7)	145
Abbildung 4.24:	Wirkdiagramm der Ebene 3: Stabilisierungssystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 13).....	146

Abbildung 4.25:	C&C ² -Modell der Ebene 4: elektromechanisch Aktive Wankstabilisierung (eAWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 19)	148
Abbildung 4.26:	Funktionsstruktur des elektromechanischen Aktiven Wankstabilisierungssystems (eAWS) im Vergleich zur hAWS (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 20).....	150
Abbildung 4.27:	Generalisierung der Erkenntnisse zu den Phänomenen der Variation von Eigenschaften und Funktionen (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 26).....	151
Abbildung 4.28:	Die drei empirischen Studien in der Deskriptiven Studie I (DS-I).....	154
Abbildung 4.29:	Übersicht der zusammengefassten Anforderungen an die Unterstützungsentwicklung anhand der drei Forschungshypothesen (FH).....	155
Abbildung 5.1:	Framework der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung nach Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014, S. 7) in Bezug zu Abschnitt 5.1 und 5.2	158
Abbildung 5.2:	Systemtheoretisches Schema zur graphischen Differenzierung der Variations-bestimmenden Elemente und Wechselwirkungen im Modell der PGE nach Albers, Rapp, Fahl et al. (2020, S. 2238), Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021, S. 872) und Hirschter (vgl. 2023).....	162
Abbildung 5.3:	Ausprägungsvariation (AV) eines Referenzsystem-Elements (RSE) im Modell der PGE in Anlehnung an Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vgl. 2023).....	163
Abbildung 5.4:	Grundlegendes Referenz-Produktmodell im Modell der PGE nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 360).....	165
Abbildung 5.5:	Generisches Funktionsverständnis in der KaSPro nach Definition 6 ..	169
Abbildung 5.6:	Produktfunktion im Modell der PGE nach Definition 7 (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)	170
Abbildung 5.7:	Einführung der Elemente zur generischen Beschreibung der Variation von Funktionen im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 873).....	174
Abbildung 5.8:	Generische Darstellung der Übernahmevariation (ÜV) einer Funktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 874).....	175
Abbildung 5.9:	Generische Darstellung der Ausprägungsvariation (AV) einer Funktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 874).....	176
Abbildung 5.10:	Generische Darstellung der Prinzipvariation (PV) einer Funktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 875)	177
Abbildung 5.11:	Leitfaden zur Formulierung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE nach Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020, S. 6).....	179

Abbildung 5.12:	Modellbasierte Zusammenhänge einer Produktfunktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 7)	180
Abbildung 5.13:	Verknüpfung des Verständnisses des Referenzsystems im Modell der PGE mit dem generischen Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 872).....	185
Abbildung 5.14:	Zusammenhänge zwischen der Produktgeneration G_n und dem Referenzsystem R_n im Systemtripel (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 9).....	186
Abbildung 5.15:	Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration im Modell der PGE (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 10)	187
Abbildung 5.16:	Framework der Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung Albers & Muschik (2010, S. 6) in Bezug zu Abschnitt 5.3	189
Abbildung 5.17:	Verständnis des Produktportfolios im Modell der PGE am Beispiel der Abstraktionsgrade von Funktionen (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019, S. 6)	190
Abbildung 5.18:	Nomenklatur im Modell der PGE am Beispiel eines Automobilherstellers (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 671).....	194
Abbildung 5.19:	Fallunterscheidung beim Produktlinien-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 673; Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 6).....	195
Abbildung 5.20:	Auslöser des Spezifizierens von Produktfunktionen und Produktgenerations-spezifisches Spezifizieren von funktionalen Produktkonzepten (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 673).....	196
Abbildung 5.21:	Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE (Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 7).....	198
Abbildung 5.22:	Phase 1: Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n).....	199
Abbildung 5.23:	Subphase 1.1: Analyse von Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung.....	200
Abbildung 5.24:	Subphase 1.2: Finden alternativer Funktionsprofile zur Bedürfnissituation	201
Abbildung 5.25:	Subphase 1.3: Auswahl der Funktionsprofile und Bewertung der Funktionsidee(n).....	201
Abbildung 5.26:	Subphase 1.4: Entscheidung über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation	203
Abbildung 5.27:	Phase 2: Spezifikation Produktfunktion	204
Abbildung 5.28:	Subphase 2.1: Integration der Produktfunktion in funktionale(s) Produktkonzept(e)	205
Abbildung 5.29:	Subphase 2.2: Definition des funktionsspezifischen Zielsystems	206

Abbildung 5.30:	Subphase 2.3: Modellierung der Produktfunktion	207
Abbildung 5.31:	Subphase 2.4: Planung der Realisierung und Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen	208
Abbildung 5.32:	Phase 3: Realisierung Produktfunktion (Hirschter, vsl. 2023).....	209
Abbildung 5.33:	Phase 4: Stilllegung Produktfunktion	210
Abbildung 5.34:	Modellierung der ersten Phase des Referenzprozesses im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell	211
Abbildung 5.35:	Modellierung der zweiten Phase des Referenzprozesses im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell	212
Abbildung 5.36:	Die drei Bestandteile der entwickelten Unterstützung des Produktentwickelnden in der Präskriptiven Studie (PS)	214
Abbildung 6.1:	Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 6.2 der DS-II	217
Abbildung 6.2:	Veranschaulichung der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik und -kühlung aktiv regeln</i> “ am Beispiel des Porsche 911 Turbo (Typ 992).....	219
Abbildung 6.3:	Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Objektanalyse im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln</i> “ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 363).....	222
Abbildung 6.4:	Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Zielsynthese im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln</i> “ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 364).....	224
Abbildung 6.5:	Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Zielanalyse im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln</i> “ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 365).....	225
Abbildung 6.6:	Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Objektsynthese im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln</i> “ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 365).....	227
Abbildung 6.7:	Prinzipdarstellung der realisierenden, physischen Elemente der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln</i> “ des 911 Turbo (Typ 991) auf Basis von Meder, Wiegand & Pfadenhauer (2014, S. 62).....	228
Abbildung 6.8:	Einordnung der Fallbeispiele in die vier Phasen des Referenzprozesses zum Spezifizieren von Produktfunktionen	229

Abbildung 6.9:	Übersicht der betrachteten, automobilen Entwicklungsprojekte der Untersuchungsumgebung in der Fallstudie in Anlehnung an Heitger (2019, S. 115).....	230
Abbildung 6.10:	Ablauf und ausgewählte Ergebnisse der Anwendung der ersten Phase zur Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n)	231
Abbildung 6.11:	Beispielhafter Funktionssteckbrief (FSB) der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ des Porsche 911 Turbo (Typ 991) auf Basis von Meder, Wiegand & Pfadenhauer (2014) – Darstellung nach Fahl, Hirschter & Albers (2021, S. 9).....	233
Abbildung 6.12:	Beispielhafter Ausschnitt aus Produktmodell in No Magic Cameo Systems Modeler (Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 10)	235
Abbildung 6.13:	Vorgehen im Rahmen von IP – Integrierte Produktentwicklung – Darstellung in Anlehnung an (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017, S. 1017); IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019).....	238
Abbildung 6.14:	Evaluierung der von den Studierenden genutzten Methoden und Werkzeuge zum Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 8)	240
Abbildung 6.15:	Evaluierung der Inhalte zum Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 9) .	241
Abbildung 6.16:	Die Unterstützungs- und initiale Erfolgsevaluation in der Deskriptiven Studie II (DS-II).....	243
Abbildung 6.17:	Zusammenfassung der Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion anhand der Segelboot-Retrospektive – Darstellung in Anlehnung an Löffler (2018)	244
Abbildung 7.1:	Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit (vgl. Abschnitt 3.1)...	248
Abbildung 7.2:	Die drei empirischen Studien in der Deskriptiven Studie I (DS-I) im vierten Kapitel dieser Forschungsarbeit.....	249
Abbildung 7.3:	Die drei Bestandteile der entwickelten Unterstützung des Produktentwickelnden in der Präskriptiven Studie (PS) im fünften Kapitel dieser Forschungsarbeit	251
Abbildung 7.4:	Die Unterstützungs- und initiale Erfolgsevaluation in der Deskriptiven Studie II (DS-II) im sechsten Kapitel dieser Forschungsarbeit	252
Abbildung 7.5:	Bestätigung der drei zentralen Forschungshypothesen (FH1, FH2 und FH3) aus Abschnitt 3.1.2.....	255
Abbildung 7.6:	Schematische Darstellung eines Ansatzes der organisationalen Strukturen und Arbeitskreise zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen	259
Abbildung A.1:	Grundstruktur eines mechatronischen Systems (schematische Darstellung nach VDI-Richtlinie 2206:2004-06, S. 14).....	LXIX
Abbildung A.2:	Systemklassifikation hinsichtlich Komplexität nach Ulrich & Probst (1995, S. 61).....	LXXI

Abbildung A.3:	Vier Typen eines System-of-Systems (SoS) (Henshaw, Siemieniuch, Sinclair et al., 2013, S. 6f)	LXXII
Abbildung A.4:	Vorgehen im Zuge der systematischen Literaturanalyse (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)	LXXIII
Abbildung A.5:	Prozess der Filterung der Dokumente in der Systematischen Literaturanalyse (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 4).....	LXXIV
Abbildung A.6:	Modellierung einer Funktion aus u.a. der Anwender-orientierten Perspektive in der Frühen Phase (Warkentin, Herbst & Gausemeier, 2009, S. 194)	LXXV
Abbildung A.7:	V-Modell zur systematischen Entwicklung mechatronischer Systeme	LXXVII
Abbildung A.8:	Vorgehensmodell des RFLP-Modellierungsframeworks nach Kleiner & Kramer (2013, S. 95)	LXXIX
Abbildung A.9:	Risiko-Portfolio zur Berücksichtigung von Neuentwicklungsanteil und Herkunft von Referenzsystem-Elementen (RSE) im Modell der PGE nach Albers, Rapp, Birk et al. (2017, S. 7)	LXXXII
Abbildung A.10:	Entscheidungs- und Definitionsmatrix nach Albers, Lohmeyer & Ebel (2011, S. 5f) und Ebel (2015, S. 109f)	LXXXIII
Abbildung A.11:	Beurteilungsdimensionen von Zielen nach Ebel (2015, S. 107) ...	LXXXIV
Abbildung A.12:	IPEK-XiL-Validierungsframework am Beispiel eines Fahrzeugs nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 560)	LXXXVI
Abbildung B.1:	Steckbrief der Forschungsmethode: Teilnehmende Beobachtung nach Marxen (2014, S. 82)	LXXXVII
Abbildung B.2:	Steckbrief der Forschungsmethode: Inhaltsanalyse nach Marxen (2014, S. 94)	LXXXVIII
Abbildung B.3:	Steckbrief der Forschungsmethode: Fragebogen nach Marxen (2014, S. 106).....	LXXXIX
Abbildung B.4:	Steckbrief der Forschungsmethode: Delphi-Studie (Häder, 2019; Linstone, Turoff & Helmer, 2002).....	XC
Abbildung B.5:	Steckbrief der Forschungsmethode: Experteninterview nach Marxen (2014, S. 104)	XCI
Abbildung B.6:	Steckbrief der Forschungsmethode: Fallstudie nach Marxen (2014, S. 98).....	XCII
Abbildung B.7:	Steckbrief der Forschungsmethode: Live-Lab (Albers, Walter, Wilmsen et al., 2018; Walter, Albers, Haupt et al., 2016)	XCII
Abbildung C.1:	Verteilung der Befragten nach Industriesektor und Unternehmensgröße [Mitarbeitende] (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 6).....	XCIV
Abbildung C.2:	Verteilung der Befragten nach Berufserfahrung [Jahre] und Herkunftsland (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 7).....	XCIV

Abbildung C.3:	Übersicht der betrachteten Use-Cases und deren relevante Zustände (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 8; Hirschter, vsl. 2023).....	XCVII
Abbildung C.4:	Ausschnitt der verwendeten (lösungs offenen) logischen Systemarchitektur für ein Fahrzeugsystem in der Studie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 10; Hirschter, vsl. 2023)	XCVIII
Abbildung C.5:	Ausschnitt der verwendeten (lösungsspezifischen) physischen Systemarchitektur für die Ebenen 4,5 und 6 in der Studie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 11; Hirschter, vsl. 2023)	XCIX
Abbildung C.6:	Wirkdiagramm der Ebene 1: Fahrzeugsystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 12; Hirschter, vsl. 2023)	XCIX
Abbildung C.7:	Wirkdiagramm der Ebene 2: Fahrsystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 12; Hirschter, vsl. 2023).....	C
Abbildung C.8:	C&C ² -Modell der Ebene 4: Passive Wankstabilisierung (PWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 14; Hirschter, vsl. 2023)	CI
Abbildung C.9:	Funktionsstruktur des passiven Wankstabilisierungssystems (PWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 15).....	CII
Abbildung C.10:	C&C ² -Modell der Ebene 4: hydraulisch-Aktive Wankstabilisierung (hAWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 17; Hirschter, vsl. 2023).....	CIII
Abbildung C.11:	Funktionsstruktur des hydraulischen Aktiven Wankstabilisierungssystems (hAWS) im Vergleich zur PWS (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 18).....	CIV
Abbildung C.12:	Vergleich von Variationsart der drei alternativen Referenzsystem-Elemente (RSE) auf Ebene 4 und der Variationsanteile der konstituierenden Subsystem-Elemente (Ebene 5) des Wankstabilisierungssystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 24; Hirschter, vsl. 2023).....	CVII
Abbildung D.1:	Beispielhafter Auszug der Klassifizierung verschiedener Elementtypen des Referenzsystems bzw. einer neuen Produktgeneration im Modell der PGE (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021, S. 879) – Darstellung nach Hirschter (vsl. 2023)	CIX
Abbildung D.2:	Mengenverständnis von Elementen im Modell der PGE (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021, S. 880) – Darstellung nach Hirschter (vsl. 2023).....	CXI
Abbildung D.3:	Übernahmevariation (ÜV) eines Referenzsystem-Elements (RSE) im Modell der PGE in Anlehnung an Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vsl. 2023).....	CXIII
Abbildung D.4:	Prinzipvariation (PV) eines Referenzsystem-Elements (RSE) im Modell der PGE in Anlehnung an Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vsl. 2023).....	CXIV
Abbildung D.5:	Technische Funktion in der KaSPro nach Definition 13	CXIV

Abbildung D.6:	Beispielhafte Entwicklungsroadmap aus Eigenschaftssicht nach Marthaler, Stehle, Siebe et al. (2020, S. 8).....	CXX
Abbildung D.7:	Multi-Layer Roadmap aus Produkteigenschaften, Produktportfolio, Produktfunktionen sowie Technologien und Ressourcen in Anlehnung an EIRMA (1997)	CXXII
Abbildung D.8:	Produktfunktions-Roadmap als Instrument zur Konsistenz- und Vollständigkeitsanalyse (Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 8).....	CXXIV
Abbildung D.9:	Umfeldsteckbrief einer Produkteigenschaft als Grundlage zum Finden alternativer Funktionsprofile zur identifizierten Bedürfnissituation in Anlehnung an Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018, S. 12).....	CXXVI
Abbildung D.10:	Funktionsideensteckbrief (FISB) zur Strukturierung alternativer Funktionsprofile in Anlehnung an das Produktprofil (vgl. Abschnitt 2.2.1).....	CXXVIII
Abbildung D.11:	Abschätzung des Marktpotenzials in Bezug zu Entwicklungsaufwand/-komplexität zur Vorauswahl von Funktionsprofilen	CXXX
Abbildung D.12:	Abschätzung des Entwicklungspotenzials in Anlehnung an Albers, Rapp, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vgl. 2023)	CXXXII
Abbildung D.13:	Modellbeispiel zur Ableitung der Risikoabschätzung (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021, S. 6)	CXXXIV
Abbildung D.14:	Darstellung zur mathematischen Formulierung der Risikoberechnung einer (Produkt-)Funktion in der Produktspezifikation in Anlehnung an Albers, Rapp, Hirschter et al. (2021, S. 8)	CXXXVII
Abbildung D.15:	Formeln und Parameter zur Berechnung der Risikozahl einer (Produkt-)Funktion in Anlehnung an Albers, Rapp, Hirschter et al. (2021, S. 8)	CXXXVIII
Abbildung D.16:	Anwendung der Weighted Shortest Job First (WSJF) Formel zur Priorisierung von Funktionsidee(n)	CXXXIX
Abbildung D.17:	Funktionsideen-Spezifikation (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019) – Darstellung in Anlehnung an Kamp (2019, S. 65)	CXLI
Abbildung D.18:	Vorgehensmodell zur Spezifikation des funktionalen Produktkonzeptes einer Produktgeneration (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 672).....	CXLIII
Abbildung D.19:	Funktionaler Produktsteckbrief (FPS) basierend auf Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018, S. 12) und Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020, S. 672)	CXLIV
Abbildung D.20:	Funktionssteckbrief (FSB) einer Produktfunktion basierend auf Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018, S. 13) und Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020, S. 672).....	CXLVIII

Abbildung D.21:	Beispiel einer Spezifikationsstruktur komplexer Produkte in Model-Based Systems Engineering (MBSE) (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021, S. 2485)	CLII
Abbildung D.22:	Produktfunktions-Spezifikation (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019) – Darstellung in Anlehnung an Kamp (2019, S. 65)	CLIII
Abbildung E.1:	Historische Meilensteine der Entwicklung von Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG	CLVIII
Abbildung E.2:	Beispielhafte, Funktions-spezifische Modellierung der Produktfunktion „ <i>Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln</i> “ in Microsoft PowerBI (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 8).....	CLXI
Abbildung E.3:	Chancen von MBSE und Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation sowie neuartige Synergien in der Spezifikationsstruktur in MBSE (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021, S. 2487)	CLXII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Begründungen für Iterationen nach Wynn, Eckert & Clarkson (2007, S. 2).....	29
Tabelle 2.2:	Aktivitäten der Produktentstehung nach Albers & Braun (2011a, S. 14f), Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016) und Reiß (2018, S. 141).....	44
Tabelle 2.3:	Ansätze zur zeitlichen Abgrenzung der Frühen Phase nach Bursac (2016, S. 44) und Albers, Rapp, Birk et al. (2017, S. 2)	63
Tabelle 5.1:	Verknüpfung der umgesetzten Anforderungen aus der Deskriptiven Studie I in den Kapiteln und Ergebnissen der Präskriptiven Studie	214
Tabelle A.1:	Ansätze zur Klassifizierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung nach Earl, Johnson & Eckert (2005), Reichwald, Meyer, Engemann et al. (2007) und McManus & Hastings (2005)	LXXX
Tabelle D.1:	Definierte Risikoparameter zur Bewertung des Risikoeinflusses (Albers, Rapp, Hirscher et al., 2021, S. 7)	CXXXV

Abkürzungsverzeichnis

AL	Alternative Lösungssuche
ASE	Advanced Systems Engineering
AV	Ausprägungsvariation
BF	Begrenzungsfläche
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C	Connector
C&C ² -A	Contact, Channel & Connector Approach
CAD	Computer Aided Design
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CONSENS	Conceptual Design Specification Technique for Engineering of Complex Systems
d.h.	das heißt
D/A/CH	Deutschland/Österreich/Schweiz
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DNS	Desoxyribonukleinsäure
DOORS	Dynamic Object Oriented Requirements System
DRM	Design Research Methodology
DS-I	Deskriptive Studie I
DS-II	Deskriptive Studie II
E/E	Elektrik/Elektronik
eAWS	elektromechanisch Aktives Wankstabilisierungssystem
eh.	ehemals
EIRMA	European Industrial Research Management Association
EOL	<i>eng.</i> End of Lifecycle, <i>dt.</i> Lebenszyklusende
EOP	<i>eng.</i> End of Production, <i>dt.</i> Produktionsende
et al.	<i>lat.</i> et alii, <i>dt.</i> und andere
etc.	<i>lat.</i> et cetera, <i>dt.</i> und so weiter
ETWA	Erweiterter Target Weighing Ansatz
EU	Entscheiden und Umsetzen
F&E	Forschung und Entwicklung
FBS	Function Behavior Structure
FEM	Finite-Elemente-Methode
FEP	Fahrzeugentstehungsprozess oder Fahrzeugentwicklungsprozess
FF	Forschungsfrage
FH	Forschungshypothese
FISB	Funktionsideensteckbrief
FLH	Funktionales Lastenheft

FPS	Funktionaler Produktsteckbrief
FSB	Funktionssteckbrief
FuKa	Funktionskatalog
FuLi	Funktionsliste
GFZ	Gestalt-Funktions-Zusammenhang
ggf.	gegebenenfalls
GV	Gestaltvariation
hAWS	hydraulisch Aktives Wankstabilisierungssystem
i.O.	in Ordnung
i.S.v.	im Sinne von
IC	Informationscheck
INCOSE	International Council on Systems Engineering
inkl.	inklusive
insb.	insbesondere
IP	Integrierte Produktentwicklung
IPEK	Institut für Produktentwicklung
iPeM	integriertes Produktentstehungsmodell
ISO	International Organization for Standardization
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KIS	Kontinuierlicher Ideenspeicher
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LA	Lösungsauswahl
LSS	Leitstützstruktur
LV	Lösungsvariante
MA	Mitarbeitende
MBE	<i>eng.</i> Model Based Engineering, <i>dt.</i> Modellbasierte Entwicklung
MBSE	<i>eng.</i> Model Based Systems Engineering, <i>dt.</i> Modellbasierte Systementwicklung
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell
NL	Nachbereiten und Lernen
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OA	Objektanalyse
OEM	<i>eng.</i> Original Equipment Manufacturer, <i>dt.</i> Erstausrüster
OS	Objektsynthese
PDCA	Plan, Do, Check, Act
PE	Problemeingrenzung
PEP	Produktentstehungsprozess oder Produktentwicklungsprozess
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PLT	Problemlösungsteam
PS	Präskriptive Studie
PV	Prinzipvariation

PWS	mechanisches Passives Wankstabilisierungssystem
RFLP	Requirements, Functional, Logical, Physical
RS	Reststruktur
RSE	Referenzsystem-Element
SA	Situationsanalyse
SAFe	Scaled Agile Framework
SCAMMPERR	Substitute, Combine, Adapt, Magnify, Modify, Put to another use, Eliminate, Rearrange und Reverse
SLR	<i>eng.</i> Systematic Literature Review, <i>dt.</i> Systematische Literaturanalyse
SOP	<i>eng.</i> Start of Production, <i>dt.</i> Produktionsstart
SoS	System-of-Systems
SPALTEN	Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungssuche, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen, Nachbereiten und Lernen
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SSE	Subsystem-Element
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
SysML	Systems Modeling Language
TA	Tragweitenanalyse
TH	Technische Hochschule
TOTE	Test, Operate, Test, Exit
TRIZ	<i>russ.</i> teoria reschenija isobretatjelskich sadatsch, <i>dt.</i> Theorie des erfinderischen Problemlösens
TRIZ	Technology Readiness Index
TRL	Technology Readiness Level
TS	Tragstruktur
u.a.	unter anderem
ugs.	umgangssprachlich
UML	Unified Modeling Language
URL	Uniform Resource Locator
USA	<i>eng.</i> United States of America, <i>dt.</i> Vereinigte Staaten von Amerika
usw.	und so weiter
ÜV	Übernahmevariation
UX	<i>eng.</i> User Experience, <i>dt.</i> Nutzungserlebnis
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
WSJF	Weighted-Shortest-Job-First
z.B.	zum Beispiel
ZA	Zielanalyse
ZHO	Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem
ZS	Zielsynthese

Formelverzeichnis

$G_i, i \in \mathbb{N}$	Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Produktgenerationen</i> im Modell der PGE	1
$G_n = \ddot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n$	<i>Vereinigten Menge von Subsystemen einer Produktgeneration</i> in der Entwicklung, die durch die drei <i>Variationsarten</i> (ÜV, GV, PV) entwickelt wird	2
$\delta_{\ddot{U}S_n} = \frac{ \ddot{U}S_n }{ G_n } = \frac{ \ddot{U}S_n }{ \ddot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n }$	<i>Anteil Übernahmevariation</i> (ÜV) einer neuen Produktgeneration in der Entwicklung	3
$\delta_{GS_n} = \frac{ GS_n }{ G_n } = \frac{ GS_n }{ \ddot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n }$	<i>Anteil Gestaltvariation</i> (GV) einer neuen Produktgeneration in der Entwicklung	4
$\delta_{PS_n} = \frac{ PS_n }{ G_n } = \frac{ PS_n }{ \ddot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n }$	<i>Anteil Prinzipvariation</i> (PV) einer neuen Produktgeneration in der Entwicklung	5
$R_i, i \in \mathbb{N}$	Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Referenzsystemen</i> im Modell der PGE	6
$E_{ij}, i, j \in \mathbb{N}$	Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Entwicklungsgenerationen</i> im Modell der PGE	7
$E_{super} = [+]\{i i \in \mathbb{N}_0\}$	Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Supersystem-Ebenen</i> im generischen Referenz-Produktmodell im Modell der PGE	8
$E_{sub} = [-]\{j j \in \mathbb{N}_0\}$	Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Subsystem-Ebenen</i> im generischen Referenz-Produktmodell im Modell der PGE	9
$G_i^{k,u,a,p,v}, i \in \mathbb{N}$, Strings k, u, a, p, v	<i>Erweiterte Nomenklatur</i> zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Produktgenerationen</i> im Modell der PGE	10
$R_{i,\dots}^{k,u,a,p,v}, i, \dots \in \mathbb{N}$, Strings k, u, a, p, v	<i>Erweiterte Nomenklatur</i> zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Referenzsystemen</i> im Modell der PGE	11
$E_{i,j,\dots}^{k,u,a,p,v}, i, j, \dots \in \mathbb{N}$, Strings k, u, a, p, v	<i>Erweiterte Nomenklatur</i> zur Bezeichnung und Unterscheidung von <i>Entwicklungsgenerationen</i> im Modell der PGE	12

1 Einleitung

Die *Epigenetik* ist ein Forschungsgebiet der Biologie, das sich mit der Frage auseinandersetzt, welche Faktoren die Variation eines Gens und damit die Entwicklung und Ausprägung eines Organismus oder einer Zelle in deren Erscheinungsbild (Phänotyp) zeitweilig determinieren (Arneemann, 2019). Die Wissenschaftsdisziplin untersucht die Veränderungen in der Abbildung von Genen, die nicht auf Variation einer Sequenz der DNS (Desoxyribonukleinsäure) – etwa durch Rekombination oder Mutation – beruhen und dennoch Veränderungen in Tochterzellen auslösen. Lange Zeit gingen die Forscher davon aus, dass epigenetische Informationen nicht über die Grenze der Generationen hinausgehen können. Da jedoch die DNS-Sequenz nicht verändert wird, kann man epigenetische Effekte nicht im Genotyp, sehr wohl aber im Phänotyp (Erscheinungsbild) verschiedener Generationen nachweisen und beobachten (Lewin, 1991). In Analogie zur Epigenetik, beschäftigt sich die Forschung im *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) mit dem Nachweis von Phänomenen der Variation, die sich nicht nur in der physischen Gestalt, sondern auch bei anderen Systemelementen (z.B. Funktionen und Eigenschaften) beobachten lassen (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021). Im Modell der PGE wird dabei bspw. insbesondere die generationsübergreifende Entwicklung von Funktionen und die Phänomene deren gezielter Variation erforscht sowie in der Produktspezifikation systematisiert.

Im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit wird das übergreifende Spezifizieren aus Funktionssicht in zunehmend diversifizierten Anbieter-Produktportfolios näher analysiert und in methodischer Unterstützung zur effektiven Anwendung durch Produktentwickelnde¹ synthetisiert. Zu diesem Zweck werden einleitend die Herausforderungen und Motivation des Forschungsprojektes erörtert, die relevanten Forschungsfelder eingrenzt und die Struktur der Arbeit dargestellt.

1.1 Herausforderungen und Motivation

Technologische „*Quantensprünge*“ bei grundlegenden Subsystemen und Infrastruktur bringen in der automobilen Produktentwicklung in zunehmendem Maße Inventionen hervor, die zu hochentwickelten, neuen, technischen Produkten und Dienstleistungen

¹ Unter „*Produktentwickelnde*“ werden gleichermaßen alle „*Produktentwickler:innen*“ verstanden. Der Autor bittet um Verständnis, dass aus Gründen der Sprachvereinfachung diese grammatische Form verwendet wird.

führen (Beihoff, Oster, Friedenthal et al., 2014). Diese innovativen, automobilen Produktgenerationen führen jedoch im gleichen Sinne zu komplexen Funktionen. Dies liegt insbesondere an den steigenden Kunden- und Anwenderanforderungen u.a. an Fahrerassistenz, Digitalisierung, Elektromobilität sowie die Berücksichtigung des Ökosystems im Sinne eines System-of-Systems (Dumitrescu, Albers, Gausemeier et al., 2021; Mohr, Müller, Krieg et al., 2013). Die Nachfrage von Kunden und anderen Stakeholdern nach einem immer breiteren Spektrum an Funktionen bei gleichzeitig steigenden Qualitätsanforderungen, höherer Zuverlässigkeit, kürzeren Produktlebenszyklen und attraktiven Preisen führt zu wachsender Produkt- und Entwicklungs-komplexität. Steigende Technologie-Infusionsraten fachen dies nur noch weiter an (Beihoff, Oster, Friedenthal et al., 2014). Der Fokus bei einer Steigerung der Produkt-funktionalität liegt auf den für Kunde oder Anwender wahrnehmbaren Funktionen, die einen direkt greifbaren Wert oder Nutzen des Gesamtproduktes schaffen (Albers, Heitger, Haug et al., 2018). Technische Funktionen sind dagegen nicht unmittelbar spürbar, aber für die Realisierung unabdingbar (Brandt, 2016). Das Funktionsspektrum heutiger Generationen von hochentwickelten Fahrzeugen hat sich daher im letzten Jahrzehnt mehr als vervierfacht (vgl. Abbildung 1.1, basierend auf Weissler (2018) und Corbett, Brunner, Schmidt et al. (2018)).

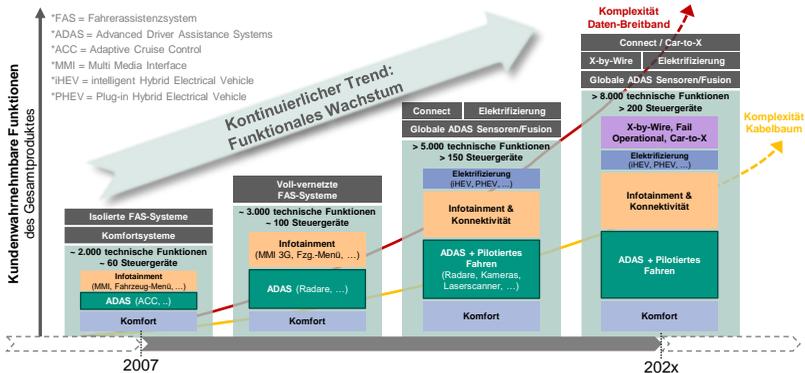


Abbildung 1.1: Wachstum des Funktionsspektrums wahrnehmbarer Funktionen der Fahrerassistenz seit 2007 (Corbett, Brunner, Schmidt et al., 2018; Weissler, 2018)

Die erfolgreiche Implementierung neuer Funktionen in ein Produkt bedarf eines harmonischen Zusammenspiels der physischen Subsysteme, deren zunehmende Interkonnektivität und Interdependenz neue Freiheitsgrade und Restriktionen impliziert (Albers, Haug, Heitger et al., 2019). Ein geeignetes Nutzenbündel für u.a. Anwender, Kunde und Anbieter in Kombination mit einer realisierten Invention (bspw. neue Funk-

tion) kann hierbei nur im Falle einer erfolgreichen Durchsetzung am Markt als Innovation bezeichnet werden (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Um den angesprochenen Nutzen für die Stakeholder zu maximieren, müssen Produktentwickelnde mit einem höheren Grad an Komplexität und Interdependenz der Systemelemente sowie mit Kosten, zeitlichen Restriktionen und Qualitätsanforderungen zurechtkommen (Beihoff, Oster, Friedenthal et al., 2014). Die Forschung im ASE – Advanced Systems Engineering zur Planung, Entwicklung und Betrieb innovativer Produkte, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systemen von morgen fokussiert sich hierbei u.a. auf die Integration und Vergemeinschaftung der vielfältigen systemorientierten und teils komplexen Ansätze des Engineerings in einem konsistenten Handlungsrahmen (Dumitrescu, Albers, Gausemeier et al., 2021)

In der automobilen Entwicklungspraxis zeigt sich zudem, dass solche mitunter komplexen Funktionen nicht mehr nur für einzelne, automobiler Produktgenerationen, sondern übergreifend für das Produktportfolio eines Anbieters entwickelt werden müssen. Produktentwickelnde stehen daher zudem vor der Herausforderung, teils diametrale Anforderungen sowie Wechselwirkungen vielfältiger Produktgenerationen aus verschiedenartigen Produktlinien bereits beim Spezifizieren der Funktionen zu berücksichtigen. Gleichzeitig entstehen Produkte in der Regel nicht auf dem oft zitierten „*weißen Blatt Papier*“ (vgl. z.B. Bucciarelli (1994)). Ganz im Gegenteil kann die Entwicklung von Systemen mit der beschriebenen Komplexität nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015) nur funktionieren, wenn systematisch und methodisch auf Basis von Referenzen gearbeitet wird. Das *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS postuliert, dass neue Produkte stets auf bereits bestehenden Systemen mit verifizierten Anforderungen aufbauen, diese auf andere Weise neu kombinieren oder einzelne Elemente bewusst, prinzipiell neu entwickeln (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Das Modell der PGE liefert das Fundament auf der die entwicklungsmethodische Forschung dieser Arbeit aufbaut. In Anbetracht der Tatsache, dass der Mensch das zentrale Element der Produktentwicklung ist, bedarf es daher der Entwicklung von Methoden und Prozessen, die den Produktentwickelnden bei seiner Tätigkeit effektiv unterstützen (Albers, 2010). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stellt sich daher die Frage, wie eine transparente und durchgängige Funktionsentwicklung in diversifizierten Produktportfolios zukünftig im Rahmen der Produktspezifikation in der Frühen Phase synergistisch gestaltet werden kann?

Eine verstärkte Einführung des *Systems Engineering* Ansatzes in der automobilen Produktentwicklung verspricht die Sicherstellung von Transparenz und Durchgängigkeit zwischen Produktgenerationen insbesondere in der Produktspezifikation (Königs, Beier, Figge et al., 2012). Geboren aus der Notwendigkeit heraus, mit der Komplexität in der Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie umzugehen, beruhen die Praktiken des Systems Engineering in erster Linie auf Erfahrung – Versuch und Irrtum (Beihoff, Oster, Friedenthal et al., 2014). Im Laufe der Zeit wurden Heuristiken entwickelt,

um komplexe Probleme systematisch und ganzheitlich anzugehen. Basierend auf einem systemtheoretischen Verständnis können Produkte und deren Wechselwirkungen ganzheitlich betrachtet werden. Eine Fragebogenstudie unter Experten auf einem Systems Engineering Forum zu den Herausforderungen im Zeitalter der Digitalisierung konnte darüber hinaus den hohen praktischen Bedarf an Funktionsorientierung in Produktentwicklungsprozessen bestätigen (Albers, Heitger, Haug et al., 2018). Eine Fokussierung auf die Funktionen und Eigenschaften einer Produktgeneration in der Produktspezifikation wird als sinnvoll erachtet. Grund dafür ist nach Ansicht der Experten die verstärkte Orientierung am Kunden- und Anwendernutzen in Beschreibung und Bewertung einer Produktgeneration. Das Expertenforum sieht aufgrund der vergangenen Erfahrungen aus Entwicklungsprojekten in Funktionen des Gesamtproduktes eine Chance, die komplexe Interkonnektivität und Interdependenz zwischen Eigenschaften und physischen Elementen effektiv zu strukturieren. Systems Engineering berücksichtigt theoretisch Eigenschaften und Funktionen eines Produktes, in der Praxis verwenden Ingenieure den Ansatz aktuell jedoch meist für die lösungsspezifische Definition und Realisierung eines technischen Systems. Eine Kernherausforderung in der Entwicklungspraxis und Motivation dieser Arbeit ist daher die Etablierung eines einheitlichen Funktionsverständnisses.

1.2 Fokus der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht das generationsübergreifende Spezifizieren aus Funktionssicht in zunehmend diversifizierten Anbieter-Produktportfolios. Der Untersuchungsgegenstand ist in weiten Teilen der Arbeit die automobilen Produktentwicklung eines Original Equipment Manufacturer (OEM) – ein Fahrzeughersteller, der unter eigenem Namen Fahrzeuge anbietet und vertreibt. Das Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren aus Funktionssicht fußt dabei auf den drei wesentlichen Forschungsfeldern des *systemischen Verständnisses in der Produktentstehung*, dem *Modell der PGE* und der *Produktspezifikation*.

Ziel der Produktentwicklung ist es, funktionsfähige, produzierbare und vermarktungsfähige Produkte zu entwickeln (Ponn & Lindemann, 2011). Vor diesem Hintergrund lässt sich in der automobilen Produktentwicklung ein Trend hin zum Einsatz interdisziplinärer Problemlösungsteams beobachten, die ein *systemisches Verständnis* des Fahrzeugs und der Entwicklungsaufgabe unerlässlich machen. Produkt, Prozess und Problemlöser werden im Systems Engineering Ansatz in ganzheitlicher Wechselwirkung betrachtet (Gausemeier, Dumitrescu, Steffen et al., 2013). Modelltheorie und -verständnis helfen dabei, komplexe Systeme über Produktmodelle zu strukturieren und diese modelltheoretische Auffassung in realen Produktentwicklungsprozessen einzusetzen.

Das zugrundeliegende Forschungsprojekt dieser Arbeit leistet einen Beitrag zur entwicklungsmethodischen Forschung auf Grundlage des *Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS (vgl. Albers, Bursac & Wintergerst (2015)). Das Erklärungsmodell fußt dabei auf den zwei Hypothesen, dass jedes Produkt auf Grundlage eines *Referenzsystems* (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019) (1) und durch die *Aktivitäten der Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation* (2) entwickelt wird. Zielführende Variationen von Fahrzeugen können unter anderem durch einen Abgleich angestrebter Funktionen und Funktionszustände mit solchen, die bereits in (potenziellen) Referenzsystem-Elementen (RSE) implementiert sind, abgeleitet werden (Rapp, Moser, Eichhorn et al., 2018). Mit dem Modell der PGE lassen sich Phänomene der Entwicklungspraxis erklären wie bspw. der frühzeitige Aufbau von Prototypenfahrzeugen, der durch einen hohen Übernahmevariationsanteil erst möglich wird (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). Die *Frühe Phase im Modell der PGE* beginnt mit der Initiierung eines Projektes und endet zum Zeitpunkt im Entwicklungsprozess, an dem eine technische Lösung bewertet und das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente spezifiziert wurde (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). Die *Produktspezifikation* ist Teil des Zielsystems, das u.a. Angaben zu den verwendeten Technologien und technischen Subsystemen eines Fahrzeugs sowie deren Variationsanteilen enthält. Die Spezifikation eines Fahrzeuges in der Frühen Phase im Modell der PGE ermöglicht folglich eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Produkts hinsichtlich der relevanten Parameter (z.B. Herstellbarkeit, notwendige Ressourcen) sowie des technischen und wirtschaftlichen Risikos (Albers, Rapp, Birk et al., 2017).

Ein Überblick der soeben skizzierten Forschungsfelder und deren Verknüpfung zum Thema der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

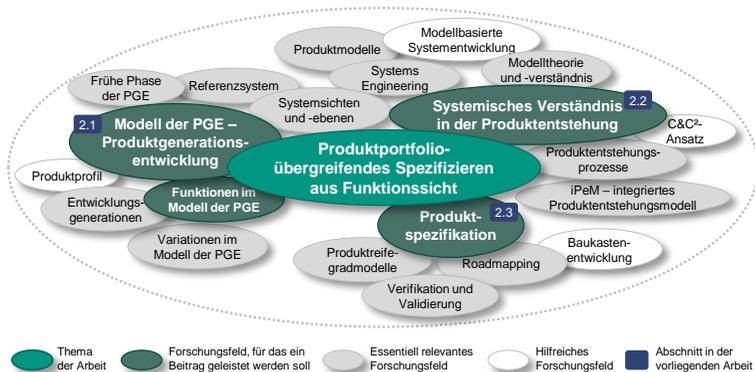


Abbildung 1.2: Fokus sowie relevante Forschungsfelder und -beiträge der vorliegenden Arbeit – Darstellung in Anlehnung an Blessing & Chakrabarti (2009, S. 66)

Die Forschung der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung bildet den modelltheoretischen und methodischen Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit. Zentraler Fokus bildet die Übertragung der bestehenden Forschungsinhalte und -erkenntnisse der KaSPro in den spezifischen Anwendungsbereich der automobilen Produktentwicklung, die Weiterentwicklung des Modells der PGE und die Entwicklung prozessualer und methodischer Unterstützung des Produktentwickelnden beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren aus Funktionssicht.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit ist in sieben Kapitel gegliedert, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Die Abbildung 1.3 stellt den Aufbau, die wesentlichen Inhalte und Verknüpfung von Ergebnissen und Erkenntnissen der Kapitel dar.

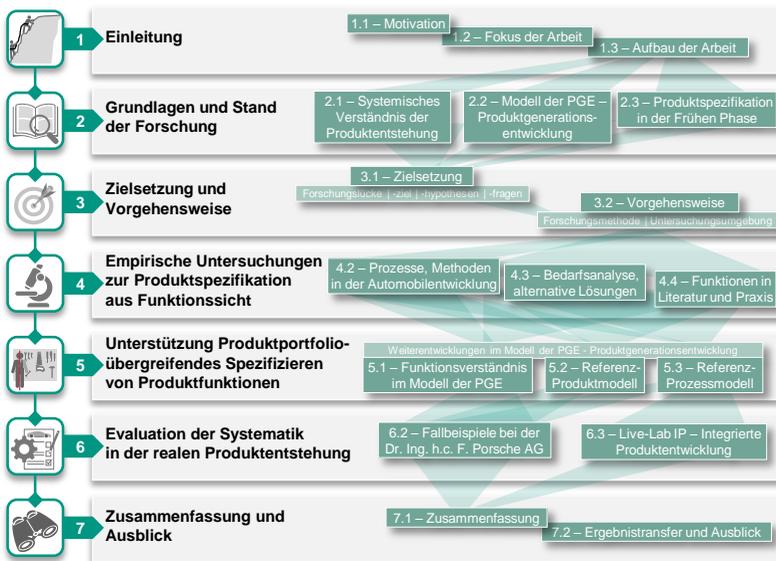


Abbildung 1.3: Aufbau der vorliegenden Arbeit – Darstellung in Anlehnung an Heitger (2019, S. 4)

In Kapitel 2 werden die zuvor beschriebenen Forschungsfelder im Fokus dieser Arbeit zur Klärung des Forschungsgegenstands näher untersucht. Zunächst werden dazu

die Grundlagen des systemischen Verständnisses in der Produktentstehung betrachtet. Aufbauend darauf wird das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS erörtert. Des Weiteren wird abschließend der Stand der Forschung zur Produktspezifikation in der Frühen Phase ausgeführt und diskutiert.

Der abgeleitete Forschungsbedarf wird im Rahmen der Zielsetzung in *Kapitel 3* in einem spezifischen Forschungsziel expliziert, durch Forschungshypothesen fokussiert und zugehörige Forschungsfragen operationalisiert. Daran anknüpfend werden die Vorgehensweise in der Forschungsarbeit und empirische Methoden präzisiert.

In *Kapitel 4* erfolgen drei empirische Analysen zur Spezifizierung von Produktkonzepten aus Funktionssicht. In der ersten empirischen Studie wird einleitend die Situation der automobilen Produktentwicklung analysiert und die prozessualen und methodischen Herausforderungen und Probleme eingegrenzt. Nachfolgend wird der Unterstützungsbedarf untersucht und in einer Branchen-übergreifenden Studie alternative Lösungsansätze generiert. In der dritten empirischen Studie erfolgt eine Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase im Modell der PGE.

Die Synthese der Ergebnisse und Erkenntnisse zu einer dreiteiligen Systematik erfolgt in *Kapitel 5*. Dazu werden das Verständnis und die Abbildung von (Produkt-) Funktionen im Modell der PGE erläutert. Anknüpfend daran wird ein generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte eingeführt. Der dritte Abschnitt führt einen Referenzprozess und methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktion in der automobilen Produktentwicklung aus.

In *Kapitel 6* wird die entwickelte Systematik über empirische Studien in sowohl der Sportwagenentwicklung als auch dem Live Lab IP – Integrierte Produktentwicklung evaluiert. Abschließend erfolgt eine Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion.

Zum Abschluss der Forschungsarbeit werden in *Kapitel 7* die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst. Darüber hinaus wird der Ergebnistransfer diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten gegeben, die an die vorliegende Arbeit anknüpfen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel erfolgt die Klärung des Forschungsgegenstandes dieser Arbeit nach Blessing & Chakrabarti (2009), woraus im folgenden Kapitel 3 der Forschungsbedarf und die Zielsetzung identifiziert und abgeleitet werden. Im Stand der Forschung wird in Abschnitt 2.1 zunächst das systemische Verständnis in der Produktentstehung erläutert. Einen wichtigen Baustein und Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit stellt hierin das modelltheoretische und methodische Gefüge der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung* dar. Zentrale Element der KaSPro wie der Contact, Channel and Connector Approach (C&C²-A) sowie das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) werden eingeführt. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS als Grundlage zur Beschreibung der Vorgehensweise bei der Definition neuer Produkte erörtert. Die KaSPro kombiniert dies mit der parallelen Forschung zur Synthese und Validierung neuer technischer Systeme, sodass in Abschnitt 2.3 die Grundlagen der Produktspezifikation in der Frühen Phase im Modell der PGE erörtert werden.

2.1 Systemisches Verständnis in der Produktentstehung

Das übergeordnete Ziel der Aktivitäten der Produktentwicklung ist die Generierung funktionsfähiger, produzierbarer und letztlich vermarktungsfähiger Produkte (Ponn & Lindemann, 2011). Die Verantwortung konzentriert sich in der Entwicklungsorganisation, die jedoch über vielfältige Schnittstellen verfügt und zunehmend interdisziplinäre Problemlösungsteams einsetzt (Ehrlenspiel, 2009). Die unternehmensinternen Einflüsse werden durch eine Vielzahl an Abhängigkeiten unternehmensexterner Faktoren ergänzt (Albers & Gausemeier, 2012). Insgesamt lassen sich diese endogenen und exogenen Faktoren verschiedenen Kontextebenen (makroökonomisch, mikroökonomisch, Organisation, Projekt, Individuum) zuordnen, deren Ausprägung sich dynamisch verändern können (VDI-Richtlinie 2221-2:2019-11). Aus diesen Gründen ist *ein systemisches Verständnis des Produkts und der Entwicklungsaufgabe* unerlässlich. In Abschnitt 2.1.1 wird daher zunächst auf den *Ursprung der Systemtheorie und die historische Entwicklung des Systems Engineering* eingegangen. Anknüpfend daran werden *Modelltheorie und -verständnis* in Abschnitt 2.1.2 erläutert, die bei der Erklärung und Strukturierung komplexer Systeme unterstützen. Auf dieser Grundlage wird auf etablierte *Modelle von Produktentstehungs- und Entwicklungsprozessen* eingegangen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die *Modellbasierte Systementwicklung* wird in Abschnitt 2.1.4 näher betrachtet.

2.1.1 Systemtheorie und Systems Engineering

Die *allgemeine Systemtheorie* beruht auf der Feststellung, dass natürliche Sachverhalte und Phänomene sich i.S.v. Emergenz aus den Relationen einzelner Bestandteile eines System zusammensetzen (Bertalanffy, 1969). Dieses Verständnis ermöglicht somit die strukturierte Analyse zahlreicher Verbindungen in Natur-, Technik-, Geistes-, Sozial- oder Betriebswissenschaften und bildet folglich ein konsistentes methodisches Fundament (Breunig, 2017). Der interdisziplinäre Ansatz des Systems Engineering betrachtet und versteht Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Problemlöser ganzheitlich (Gausemeier, Dumitrescu, Steffen et al., 2013).

2.1.1.1 Ursprung der Systemtheorie und historische Entwicklung des Systems Engineering

Erste Ansätze einer Metatheorie zur disziplinübergreifenden Beschreibung von Systemen (*griech.* systema – wörtlich übersetzt als das Gebilde, Zusammengestellte, Verbundene) lassen sich bis in die griechische Philosophie zurückverfolgen (vgl. Abbildung 2.1). Seinerzeit beschäftigten sich ARISTOTELES und SOKRATES mit der Differenzierung zwischen der Zusammenfassung einer Vielfalt an Elementen zu einer bloßen Menge (*griech.* pan) und deren Anordnung in einer Ganzheit (*griech.* holon) von Elementen (Zingel, 2013, S. 6). Der theoretische Biologe BERTALANFFY kritisierte in den 1930er Jahren erstmals die deduktiven Verfahren der Naturwissenschaften und die damit zwangsläufig einhergehende Betrachtung von isolierten Einzelphänomenen (Bertalanffy, 1969). Nach dem Verständnis der Ganzheitlichkeit müssen in der *allgemeinen Systemtheorie* Phänomene in ihrer Vernetzung sowie Wechselwirkung und folglich als System aufgefasst werden. Gewisse Eigenschaften eines Systems lassen sich vor diesem Hintergrund nicht allein als Summe der Eigenschaften seiner Elemente erklären, sondern entstehen durch Emergenz (Küppers & Krohn, 1992). Das heutige Verständnis der Systemtheorie wurde zudem in der Erforschung der Kybernetik weiterentwickelt, die den Ansatz des systemischen Denkens und das Ursache-Wirkungs-Prinzip aufgreift, um Modelle (vgl. Abschnitt 2.1.2) der Regelungs- und Informationslehre zu verallgemeinern (Wiener, 1948).

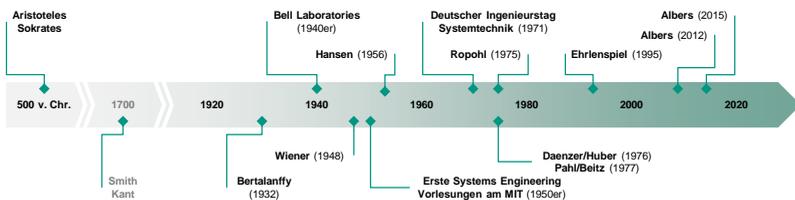


Abbildung 2.1: Ursprung der Systemtheorie und historische Entwicklung des Systems Engineering in Anlehnung an Gausemeier (2013, S. 36)

Der Ursprung des industriellen *Systems Engineering* geht auf Entwicklung von Verteilungssystemen im militärischen Operations Research sowie auf die Planung von Telekommunikationsnetzwerken der Bell Laboratories in der Mitte des 20. Jahrhunderts zurück (vgl. Abbildung 2.1). Eine hohe Komplexität, die Kombination disziplinübergreifender Technologien und eingeschränkte Möglichkeiten der Prototypenvalidierung im Rahmen des Luft- und Raumfahrtprogramms der USA forderten eine methodische Unterstützung in Produktentstehungs- und Entwicklungsprozessen (vgl. Abschnitt 2.1.3) und trugen zum Durchbruch des Systems Engineering bei (Gausemeier, 2013). In diesem Zeitraum wurde am MIT – Massachusetts Institute of Technology die erste Vorlesung zum Systems Engineering gehalten. Kurz darauf machten Vertreter der Ilmenauer Schule der Konstruktionslehre Vorschläge zum methodischen Konstruieren, die wichtige denkpsychologische und heuristische Ansätze der Systemtechnik, Informatik und Datenverarbeitung berücksichtigte (Hansen, 1955). Im Jahr 1971 widmete der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) das Motto des Deutschen Ingenieurtags der Systemtechnik. Die Grundlagen und Anwendung der Systemtheorie der Technik (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) prägte in Deutschland insbesondere ROPOHL, der den Mehrwert in der Zugänglichkeit neuer Arbeitsverfahren und Hilfsmittel in der Ingenieurpraxis sah (Ropohl, 1975). Weitere wichtige Meilensteine für die Produktentstehung bilden nach Gausemeier (2013) die Arbeiten von Daenzer & Büchel (1976) und Pahl & Beitz (1977). Trotz der zunehmenden Mechatronisierung in den 1980er Jahren hat es nach Gausemeier (2013) zunächst keine wechselseitige Befruchtung mit dem System Engineering gegeben. Statt einer Fokussierung auf systemisches Denken, konzentrierte sich die Konstruktionslehre auf spezielle Aspekte wie Kosten, Qualitätsmanagement und Konstruktionskataloge (Franke, 1985; Koller, 1985; Roth, 1982). Ein weiterer Kernaspekt bildete die Automatisierung und Unterstützung der Konstruktion durch Modellbasierte Entwicklung (vgl. Abschnitt 2.1.4) bspw. mit Computer Aided Design (CAD). Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers, Ebel & Lohmeyer (2012) leitet durch die Beschreibung des kontinuierlichen Wechselspiels zwischen Analyse- und Kreativitätsschritten und dem Systemtripel aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem eine wichtige Grundlage für das systemische Denken im Produktentwicklungsprozess. Albers & Gausemeier (2012) bekräftigen zudem den Wandel von einer fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung in der Entwicklungspraxis. Mittlerweile rückt das Systems Engineering weltweit an renommierten Forschungseinrichtungen sowie in verschiedenen Interessensgemeinschaften wieder stärker in den Fokus und spannt den Bogen von der Bedarfs-/Anforderungsermittlung über Projektmanagement und modellbasierte Validierung bis hin zum fertigen Produkt (Löckel, 2018). Grundlage und Erfolgsfaktor hierfür bildet die zunehmend digitalisierte Arbeitswelt in der Produktentstehung (Dumitrescu, Tschirner & Bansmann, 2020). Ein außerordentliches Beispiel dafür ist das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (vgl. Abschnitt 2.2), das auf ei-

nem konsequenten, systemischen Denken fußt und die Entwicklung neuer Generationen von Systemen anhand von drei grundlegenden Variationsarten und auf Basis der Abbildung aus dem Referenzsystem beschreibt (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019).

Der transdisziplinäre und integrative Ansatz des Systems Engineering ermöglicht somit die erfolgreiche Realisierung, Nutzung und Stilllegung von technischen Systemen unter Verwendung von Systemprinzipien und -konzepten sowie wissenschaftlichen, technologischen und Management-Methoden (Dumitrescu, Albers, Gausemeier et al., 2021; Walden, Roedler, Forsberg et al., 2017). Herauszustellen ist hierbei eine durchgängige Beschreibung und Analyse des zu entwickelnden Systems auf Grundlage von rechnerintegrierten Systemmodellen (vgl. Abschnitt 2.1.4) zur Integration in gängige Produktdatenmanagement-Systeme.

2.1.1.2 Systemtheorie der Technik

Ein *System* ist stets als die Summe sowohl seiner Elemente als auch der Beziehung zwischen ebendiesen aufzufassen (Ropohl, 1975). Die allgemeine Systemtheorie muss grundsätzlich als disziplinübergreifend verstanden werden, einzelne Systeme adressieren jedoch konkrete Disziplinen (Pulm, 2004). Über dieses kontextabhängige Verständnis von Systemen hinaus stellt Ropohl (2009) heraus, dass drei unterschiedliche Systemdeutungen zu differenzieren sind. Der Systembegriff umfasst folglich das *hierarchische*, *strukturelle* und *funktionale Systemkonzept* (vgl. Abbildung 2.2).

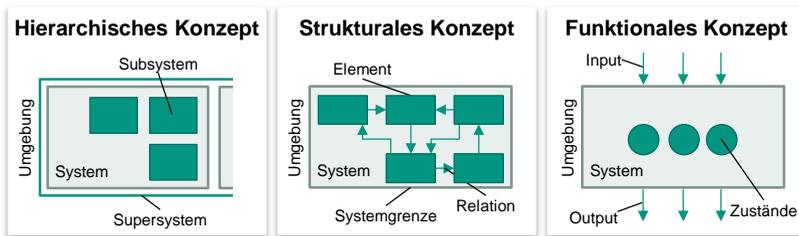


Abbildung 2.2: Hierarchisches, strukturelles und funktionales Systemkonzept nach Ropohl (2009, S. 76)

Das *hierarchische Systemkonzept* legt die Grenzen eines Systems fest und ermöglicht es, Elemente eines Systems ebenfalls als selbstständiges System bzw. *Subsystem* aufzufassen (Ropohl, 2009). Der Terminus *Element* wird streng genommen nur für die Subsysteme verwendet, die nicht weiter aufgelöst werden können (Schwaninger, 2004). Eine Abstraktion der betrachteten Systemebene erlaubt es, jedes System wiederum als Teil eines umfassenderen Systems bzw. *Supersystems* zu verstehen. Dem-

zufolge entstehen unterschiedliche Ebenen von Ganzheit und Teilen, die über die Aktivitäten² der *Dekomposition* (Subsystembildung) und *Zusammensetzung* (Supersystembildung) geschaffen werden (Göpfert, 2009). Die Dekomposition und Zusammensetzung eines Systems entlang verschiedener Systemebenen bis hin zur Elementarebene lässt sich als *Systemhierarchie* darstellen (Haberfellner, Weck, Fricke et al., 2015). In der Praxis erfolgt die inhaltliche Abgrenzung von Elementen und weiter zerlegbaren Subsystemen dabei unter subjektivem Einfluss des betrachtenden Produktentwickelnden, der an einem bestimmten Detaillierungsgrad interessiert ist (Göpfert, 2009). In einem ähnlichen Ansatz beschreiben Dick, Hull & Jackson (2017) die Systementwicklung als einen hierarchischen Datenfluss zur Definition von Produktanforderungen, die von den System- zu den Subsystem-Anforderungen kaskadieren. Die Anwendung eines systemtheoretischen Ansatzes auf einer bestimmten Systemebene lässt sich somit ebenfalls auf die jeweiligen Subsysteme anwenden. Dieser Zusammenhang wird im Allgemeinen als *fraktaler Charakter* bezeichnet (Albers, Braun & Muschik, 2010b).

Das *strukturelle Systemkonzept* fasst das System als *zergliedertes Ganzes* auf und stellt den Gedanken, dass ein System mehr als die Summe seiner Bestandteile darstellt, in den Vordergrund (Ropohl, 2009). Aufgrund der Emergenz von Systemelementen, muss neben den Elementen selbst ebenso das Beziehungsgeflecht ihrer Relationen³ betrachtet werden, um das System zu analysieren. In diesem Zusammenhang können etwa *räumliche*, *funktionale*, *energetische* oder *informationelle Beziehungsdimensionen* teilweise parallel zueinander existieren (Göpfert, 2009). Die Gesamtheit aller Elemente und deren Relationen eines Systems bildet die *Systemstruktur* (Gausemeier, Rammig & Schäfer, 2009).

Das *funktionale Systemkonzept* beschreibt nicht den inneren Aufbau eines Systems, sondern lediglich seine *Interaktion* mit seiner Umgebung mittels Attributen wie *Eingangs- und Ausgangsgrößen* sowie *Zuständen* zwischen Input und Output eines Systems (Ropohl, 2009). Das System wird daher als eine Black Box aufgefasst und die Beschreibung des Verhaltens⁴ des Systems liegt im Fokus. In Anbetracht dieser Tatsache rückt die *Systemgrenze*, die Elemente des Systems von der *Systemumwelt* trennt, in den Fokus, da sie den Betrachtungsausschnitt für den Produktentwickelnden festlegt. Zur zweckgebundenen Vereinfachung geschieht dies im Rahmen der Bildung

² Die *Aktivität*, i.S.v. kleinstem Element eines Prozesses, besteht nach Meboldt (2008, S. 160) aus „*einer Tätigkeit, einer ausführenden Ressource, einer zu benutzenden Ressource und einer zeitlichen Abhängigkeit*“.

³ Die *Relation* bezeichnet nach Ropohl (1975, S. 28) den „*Zusammenhang zwischen einem Attribut eines (Sub-)Systems und einem Attribut eines anderen (Sub-)Systems*“.

⁴ Das *Verhalten eines technischen Systems* beschreibt nach Zingel (2013, S. 146) dessen Reaktion auf einwirkende Einflussgrößen (Kräfte, Energie, Stoff, Information) in einem bestimmten Zeitraum.

von Modellen (vgl. Abschnitt 2.1.2) in der Entwicklungspraxis (Ludwig, 2001; Matthiesen, Grauberger, Hölz et al., 2018). Die Systemgrenze ist dabei keineswegs objektiv festgelegt, sondern erfolgt willkürlich durch den Produktentwickelnden (Göpfert, 2009).

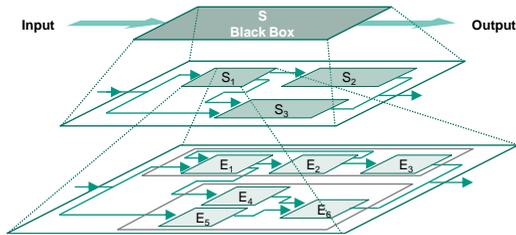


Abbildung 2.3: Kombination der drei Konzepte der Systemtheorie der Technik nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 23)

Die drei Konzepte der Systemtheorie nach Ropohl (2009) schließen sich nicht aus, sondern können in Kombination genutzt werden (vgl. Abbildung 2.3, Ehrlenspiel & Meerkamm (2013)). Zur ganzheitlichen Beschreibung eines Systems definiert Ropohl (2009) den Systembegriff durch Kombination des (a) funktionalen, (b) strukturalen und (c) hierarchischen Systemkonzepts (vgl. Definition 1).

Definition 1: System nach Ropohl (2009, S. 77)

Ein **System** ist das *Modell einer Ganzheit*, die (a) *Beziehungen zwischen Attributen* (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) *aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht*, und die (c) *von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird*.

Auf Grundlage des allgemeinen Begriffs eines Systems lässt sich durch die Attribute der *künstlichen Entstehung*, *Zweckorientierung*, *Offenheit* und *Dynamik* nach Ropohl (2009) ein *technisches System* charakterisieren. Der Mensch steht nach Albers (2011) im Mittelpunkt der Produktentwicklung, sodass in einem holistischen Verständnis gleichermaßen die Wechselwirkungen zwischen Mensch und technischem System in einem sogenannten *sozio-technischen System* berücksichtigt werden müssen. In diesem Zusammenhang kann zwischen einem sozio-technischen System der Entstehung und der Verwendung sowie deren Bedingungen und Folgen differenziert werden. Einerseits agiert der Mensch in der Rolle des *Entwicklers*, andererseits in der Rolle des *Kunden* oder *Anwenders* des technischen Systems (Ropohl, 2009). Die *Systemtheorie der Technik* beschreibt nach Ropohl (2009) folglich Axiome, Ableitungen und Regeln für die konkrete Bildung von Modellen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1).

2.1.1.3 Klassifizierung von Systemen

Zur Erleichterung des Verständnisses und der Berücksichtigung der Diversität können technische Systeme nach unterschiedlichen Kriterien differenziert werden. Auf Grundlage der Terminologie zur Systemtheorie der Technik lässt sich die reale Entsprechung des abstrakten Konstruktes eines Systems als Produkt bzw. Produktsystem abgrenzen. Im Kontext der Entwicklung technischer Systeme lässt sich ein Produkt als „*Erzeugnis oder Leistung materieller wie immaterieller Art*“ beschreiben (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11, S. 8). Ein Produkt kann zudem als „*Bündel von Eigenschaften, das auf die Schaffung von Kundennutzen (jedweder Art) abzielt*“, verstanden werden und damit die nutzenstiftende Funktion des Produktes in den Fokus rücken (Homburg, 2017, S. 557). In einer generalistischen Auffassung wird unter dem Produkt zudem „*alles, was einer Person angeboten werden kann, um ein Bedürfnis oder einen Wunsch zu befriedigen*“, verstanden (Kotler, Keller & Opresnik, 2015, S. 408). Nach DIN EN ISO 9000:2015-11 ist ein Produkt vorwiegend materiell (Hardware), kann jedoch ebenso immaterielle Elemente (Software) und/oder ein Dienstleistungselement (Service) beinhalten. In diesem Zusammenhang kann ein Geschäftsmodell Teil eines Produktes oder sogar das Produkt selbst sein (Albers, Basedow, Heimicke et al., 2020). In der vorliegenden Forschungsarbeit wird das Verständnis des Produktbegriffs auf materielle und technische Erzeugnisse beschränkt, die nach Ehrlenspiel (2009) als *technische Produkte* bezeichnet werden und ihre systemtheoretische Entsprechung im Begriff des *technischen Systems* wiederfinden.

In Anhang A.1.1 findet sich eine Detaillierung zur Klassifizierung von Systemen am Beispiel des *mechatronischen Systems*, der *strukturellen Komplexität in Abhängigkeit von Dynamik und Vielfalt der Systemelemente und -relationen* sowie den Zusammenhängen im *System-of-Systems (SoS)*.

2.1.1.4 Eigenschaften und Merkmale technischer Systeme

Zur Berücksichtigung relevanter Stakeholder (insbesondere Kunde und Anwender) in der Entwicklung technischer Systeme, beschreiben zahlreiche Ansätze in der Literatur eine *eigenschaftsbasierte Anforderungsdefinition* (Ponn & Lindemann, 2011). Dieses Vorgehen erlaubt dem Produktentwickelnden bspw. in der Automobilindustrie eine frühzeitige Fokussierung auf *Kunden- und Anwenderbedürfnisse* (Wiedemann, 2014). Vor diesem Hintergrund definiert Schubert (1991) *Eigenschaften* als objektiv bewertbare Gestaltungselemente, die eine Repräsentation der *Beschaffenheit*⁵ eines Produkts darstellen und zur Bedürfnisbefriedigung durch den Produktentwickelnden beeinflussbar sind. Nach einem abstrakteren Verständnis von Herrmann (1998, S. 138)

⁵ Die *Beschaffenheit* bezeichnet nach Wintergerst (2015, S. 60) „*den physischen Zustand und die Ausprägung der Gestalt eines Produkts bzw. seiner Teilsysteme und Komponenten*“.

beschreibt eine Eigenschaft „*das einem Ding eigene, sein Wesen ausmachende, ihm zugehörige und nur durch Abstraktion Herauslösbare*“. Eigenschaften dienen ferner i.S.v. *Beurteilungskriterien* nach Steiner (2007) dem Vergleich ähnlicher Produkte und können als *charakterisierende Merkmale* verstanden werden (Hubka, 1984). *Eigenschaftsausprägungen* wie bspw. unterschiedliche Farben oder Formen ermöglichen dem Kunden eine Alternativenauswahl (Steiner, 2007). Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 30) beschreiben als Eigenschaft „*alles, was durch Beobachtungen, Messergebnisse, allgemein akzeptierte Aussagen usw. von einem Gegenstand festgestellt werden kann*“. Ponn & Lindemann (2011) differenzieren drei Eigenschaftstypen:

- *Unmittelbar dem Anwender dienende Eigenschaften* sind über Versuch, Messung oder Simulation an einem System feststellbar und werden in der Zielbildung (i.S.v. Soll-Eigenschaften) durch den Produktentwickelnden berücksichtigt (z.B. Gewicht, Kosten, Sicherheit)
- *Unmittelbar dem Anbieter dienende Eigenschaften* werden zur Herstellung, Montage & Transport eines Produkts berücksichtigt (z.B. Produktionskosten)
- *Mittelbar wirkende Eigenschaften* fließen indirekt in die zwei zuvor genannten Eigenschaftstypen ein (bspw. Nachhaltigkeit, Variantenvielfalt)

Nach der Auffassung von Weber (2012) sind einzig die *Merkmale* eines Produkts durch den Produktentwickelnden *direkt beeinflussbare Parameter*, wohingegen *Eigenschaften* als *Folgegrößen* resultieren und das *Produktverhalten* beschreiben. Gleichmaßen beschreibt Zingel (2013, S. 147) das Merkmal als „*Attribut eines Strukturelements eines technischen Systems (z.B. Datenformat, Interfaceart, Form, Lage, Stoff)*“, das durch den Produktentwickelnden festgelegt wird. Im Verständnis der KaSPro dienen Eigenschaften der Beschreibung des Verhaltens eines Systems aus u.a. Kunden-, Anwender- und/oder Anbietersicht in einem definierten Kontext und sind in ihren Ausprägungen quantitativ und/oder qualitativ feststellbare Größen (Hirschter, vsl. 2023). Dementsprechend sind Eigenschaften nicht direkt durch den Produktentwickelnden beeinflussbar, sondern werden fraktal durch mindestens ein Merkmal desselben technischen Systems und dessen Ausprägung bestimmt (Hirschter, vsl. 2023). In der Produktentstehung wird über die Teilmenge der kundenerlebbaren Produkteigenschaften nach Albers, Heitger, Haug et al. (2018) das gewünschte, lösungsoffene Soll-Produktverhalten aus Sicht der Kunden bzw. Anwenders spezifiziert. Im Kontext der Charakterisierung des lösungsspezifischen Ist-Verhaltens eines Gesamtproduktes können (ähnliche) Produkte zur Differenzierung subjektiv, zum Teil objektiviert, miteinander verglichen werden. (Hirschter, vsl. 2023)

Eigenschaften beziehen sich nicht immer ausschließlich auf das Gesamtprodukt⁶, sondern lassen sich auf jeglicher Systemebene anwenden. Eigenschaften können zudem

⁶ Anmerkung: In diesem Fall spricht man von sogenannten *Produkteigenschaften*.

bspw. hinsichtlich *geometrischer/stofflicher Beschaffenheit*, *Zweck* bzw. *Funktionserfüllung* und *Relation zwischen System und Umwelt* klassifiziert werden (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013; Lindemann, 2009). Eigenschaften der geometrischen und stofflichen Beschaffenheit eines Systems (i.S.v. Merkmalen nach Weber (2012)) können demnach unmittelbar, Funktions- und Relationseigenschaften nur mittelbar durch den Produktentwickelnden festgelegt werden. Der *Contact, Channel and Connector Approach* (C&C²-A, vgl. Abschnitt 2.1.3.4) unterscheidet ferner zwischen *Gestalt-, Funktions- und Wirkeigenschaften* (Albers & Wintergerst, 2014). Die Volumenelemente der Leitstützstrukturen (LSS) und Flächenelemente der Wirkflächenpaare (WFP) charakterisieren geometrische, räumliche oder stoffliche Beschaffenheit (Matthiesen, 2021). LSS und WFP eines Systems beeinflussen wiederum die Funktions- und Wirkeigenschaften. Die Summe aller an einer Funktion beteiligten, feststellbaren Wirkungen ergeben die Funktionseigenschaften eines Systems (Albers & Wintergerst, 2014).

2.1.1.5 Systematische Literaturanalyse von Funktionen technischer Systeme

In der Literatur wird an zahlreichen Stellen – bezugnehmend auf die Systemkonzepte nach Ropohl (2009) – über den strukturalen Aspekt hinaus die funktionale Dimension im Definitionsprozess technischer Systeme bzw. Produkte hervorgehoben. Feldhusen & Grote (2013, S. 242) attestieren, dass Produkte dazu dienen, „eine Funktion zu erfüllen“ (i.S.v. Zweckbestimmung mit dem Ziel der Erfüllung einer Aufgabe). Eine Funktion liefert demnach in der Produktentwicklung einen *teleologischen Sinn* für die *Existenz eines Systems* (Hubka, 1976), nicht jedoch die retrograde Beantwortung der Frage, wie ein System funktioniert. Feldhusen & Grote (2013, S. 242) verstehen eine Funktion generisch entsprechend als „*de[n] allgemeine[n] und gewollte[n] Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen*“. Ehrlenspiel (2009) fasst eine Funktion als *Eigenschaftsänderung* zwischen einem Eingangs- und Ausgangszustand auf (vgl. Abbildung 2.4). Eine Funktion lässt sich demnach als Kombination aus einem Substantiv (bezeichnet das Umsatzprodukt) und Verb (bezeichnet die entstehende Eigenschaftsänderung) formulieren.

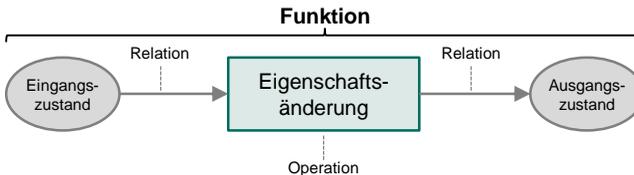


Abbildung 2.4: Beschreibungsmodell für Funktionen nach Ehrlenspiel (2009, S. 407)

Der Zustand eines Umsatzprodukts definiert sich durch die Summe seiner Eigenschaften (Ehrlenspiel, 2009). Die Eigenschaftsänderung bezeichnet hierbei die Operation

zwischen den zwei Zuständen und bildet somit eine Art Prozess oder Verfahren ab. Die logische Beziehung zwischen Operationen und Zuständen wird durch sogenannte Relationen abgebildet. (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems entsteht durch einen technischen Prozess, „in dem Energien, Stoffe und Signale geleitet und/oder verändert werden“ (Feldhusen & Grote, 2013, S. 240). Diese sogenannten *technischen Funktionen* dienen in der Konstruktionsmethodik als „*lösungsneutrale Formulierung des gewollten (geplanten, bestimmungsgemäßen) Zwecks eines technischen Gebildes*“ (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013, S. 691). Ferner sprechen Ponn & Lindemann (2011) von einer lösungsneutralen Beschreibung des Systemzwecks⁷ durch die Funktion, welche die explizite technische Lösung zur Erfüllung des Funktionsziels jedoch nicht vorwegnimmt (Haberfellner & Daenzer, 2002).

Das Grundprinzip der *Abstraktion*⁸ stellt hierbei ein wichtiges Merkmal des „*Denkens in Funktionen*“ zur Betrachtung der zielgerichteten Aspekte eines Systems dar (Ponn & Lindemann, 2011). Die VDI-Richtlinie 2803 zeigt in diesem Zusammenhang verschiedene *Abstraktionsgrade von Funktionen* auf und setzt dies in Beziehung zum Lösungsraum (vgl. Abbildung 2.5, VDI-Richtlinie 2803-1:2019-01). Hierbei wird zwischen *realen, ikonischen & symbolischen* Formulierungen einer Funktion differenziert.

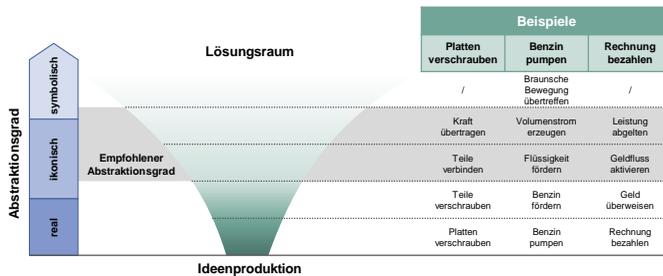


Abbildung 2.5: Verlauf der Ideenproduktion über dem Abstraktionsgrad nach VDI-Richtlinie 2803 (VDI-Richtlinie 2803-1:2019-01, S. 11)

⁷ Der *Zweck eines technischen Systems* beschreibt nach Zingel (2013, S. 10) „eine von einer menschlichen Instanz erwartete Funktion in Interaktion mit seiner Umgebung mit Hilfe bestimmter Inputs und unter bestimmten Randbedingungen“.

⁸ Die *Abstraktion* beschreibt nach Deigendesch (2009, S. 76) im Sinne einer mentalen Operation „die Entdeckung von Struktur, Regelmäßigkeit, Mustern oder Ordnung innerhalb einer Vielzahl von Wahrnehmungen“ und erlaubt damit eine Repräsentation, welche die Grundlage zur konzeptionellen Neustrukturierung darstellt.

Weitere Ausprägungen des Funktionsverständnisses zielen nicht auf die physikalischen Wirkzusammenhänge innerhalb eines Systems, sondern auf die Wechselwirkungen mit seiner Umwelt ab. Alink (2010, S. 25) beschreibt in diesem Kontext die Unterscheidung „zwischen Funktion als beabsichtigte Wirkung und Funktion als Beschreibung der Vorgänge im System“. Aufbauend darauf liegt die Differenzierung zwischen der Funktion i.S.v. Zweck eines technischen Systems mit gewünschter Wirkung sowie dem beabsichtigten Verhalten mit der prognostizierten Wirkung auf die Umwelt nahe (Zingel, 2013). Daraus folgt die bidirektionale Bedeutung der Funktion als Zusammenhang zwischen Ursache (Eingangsgröße) und Wirkung (Ausgangsgröße). Eine Wirkung ist an der Systemgrenze messbar und „beschreibt die aus einer Funktion resultierenden Outputs, die innerhalb eines technischen Systems gleichzeitig Ursachen (Inputs) mit Auslösung weiterer Funktionen sein können“ (Albers & Wintergerst, 2014; Zingel, 2013, S. 146).

In der Literatur verbinden einige Autoren das Funktionsverständnis mit Ansätzen zur Strukturierung und Modellierung von Funktionen technischer Systeme. Die VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221:1993-05) definiert Funktionen als lösungsneutrale Beschreibung von Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zugangsgrößen eines Systems. Die Richtlinie strukturiert Funktionen analog dem Verständnis der drei Systemkonzepte nach Ropohl (2009) hierarchisch in *Gesamt- und Subfunktionen* sowie struktural in *Haupt- und Nebenfunktionen*. Feldhusen & Grote (2013) nutzen das Verständnis und visualisieren die Gliederung einer Gesamtfunktion in ihre Subfunktionen in der *Funktionsstruktur* (vgl. Abbildung 2.6). Subfunktionen übernehmen in diesem Zusammenhang Teilaufgaben der Gesamtaufgabe eines technischen Systems. Gleichermäßen verursachen die strukturalen Beziehungen zwischen den Subfunktionen eine notwendige Reihenfolge deren Ausführung. Variationen in der Funktionsstruktur durch neue hierarchische oder strukturalen Verknüpfung können nach Feldhusen & Grote (2013) zu neuen Lösungsvarianten führen.

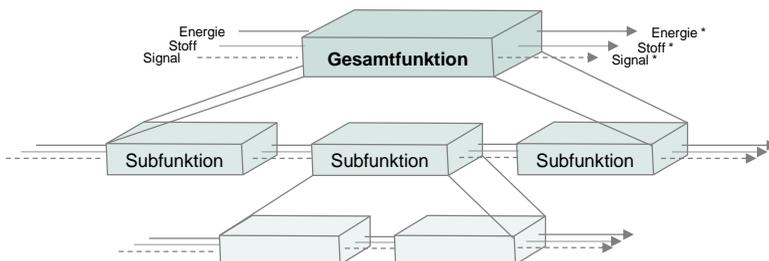


Abbildung 2.6: Strukturierung von Funktionen nach Feldhusen & Grote (2013, S. 244)

Ponn & Lindemann (2011) klassifizieren drei Ansätze der Funktionsmodellierung:

- *Umsatzorientierte Funktionsmodellierung* beschreibt Zustände der Eigenschaften von Umsatzprodukten (in Form von Stoff-, Energie- und Signalumsätzen) und deren Änderungen durch Operationen.
- *Relationsorientierte Funktionsmodellierung* fokussiert die Verbindungen zwischen den Systemelementen und differenziert nützliche von schädlichen Funktionen. Eine sinnhafte Funktionsverknüpfung durch Relationen definiert hierbei das Funktionsmodell.
- *Nutzerorientierte Funktionsmodellierung* bildet Funktionen aus Nutzersicht ab und stellt die Interaktionen verschiedener Nutzer mit dem technischen System in den Vordergrund.

Ein weiterer Ansatz nach Roth (1994) unterscheidet zwischen Aufgabe- und Soll-Funktionen, die eine Umsetzung der Stoff-, Energie und Informationsflüsse verantworten. In diesem Verständnis erfolgt die Funktionsmodellierung mittels allgemeiner, Intensitäts-, Qualitätsgrößen- und logischen Funktionsstrukturen, die sich anhand von Graphen visualisieren lassen. Eine *allgemeine Funktionsstruktur* nimmt eine abstrakte Beschreibung der Funktion eines Systems vor und ordnet den Gesamt- und Subfunktionen jeweils Aufgaben zu. Die *Intensitäts- und Qualitätsgrößen-Funktionsstruktur* zielt auf eine Beschreibung von Kräften, Momenten, Geschwindigkeiten, Volumenströmen, Druck, Strom, Spannung oder Ladung im System ab. Die *logische Funktionsstruktur* hingegen konzentriert sich auf Informationen anstelle von Stoff- oder Energieflüsse und stellt die abstrakteste Form dar. (Roth, 1994)

Die Diskussion der unterschiedlichen Auffassungen des Funktionsverständnisses zeigt, dass keine einheitliche Meinung zur Abgrenzung von technischen Funktionen und Funktionen des Gesamtprodukts in der Literatur existiert. Vielmehr variiert die Reichweite und der Abstraktionsgrad in deren Bedeutung und situations- und kontextabhängiger Beschreibung. In der KaSPPro lässt sich das Funktionsverständnis einzig in der Handhabung der Abbildung von Input-Output-Umwandlungen in Modellen technischer Systeme durch den Produktentwickelnden anwenden. In diesem Zusammenhang resultieren sowohl Funktion als auch Verhalten aus einer Interaktion auf Ebene der Systemgestalt (Albers & Wintergerst, 2014; Matthiesen, 2021). Das Verständnis von Funktionen als *lösungssoffen beschriebene Beziehung zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems* baut in dieser Forschungsarbeit darauf folgend sowie auf dem grundlegenden Verständnis von Feldhusen & Grote (2013) und der VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11) auf.

Systematische Literaturanalyse zum Funktionsverständnis in der Frühen Phase der Produktentwicklung

Zur Schärfung des Forschungsfokus und Analyse der Charakteristika und Ableitung von Anforderungen an eine einheitliche Definition wurde eine ergänzende *Systematische Literaturanalyse* zum Funktionsverständnis in der Frühen Phase der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 2.2.5) durchgeführt. Eine *Systematische Literaturanalyse* (engl. Systematic Literature Review [SLR]) ist eine Literatur-basierte Methode zur Identifizierung relevanter, empirischer Forschungsbeiträge, aus denen praxisbezogene Erkenntnisse gewonnen werden können (Kitchenham & Charters, 2007). Dieses Wissen kann dann folglich genutzt werden, um die Ansätze aus der Forschung als Ausgangsbasis zur Diskussion des Funktionsverständnisses in der Praxis (vgl. Abschnitt 4.4.2) heranzuziehen und in Fallstudien anzuwenden bzw. zu validieren. Aufgrund des Umfangs werden die Kernerkenntnisse des SLR im Anhang A.1.2 erläutert. An dieser Stelle wird für detaillierte Erläuterung der Ergebnisse ebenso auf die Publikation Fahl, Hirscher, Haag et al. (2020) verwiesen.

Der wissenschaftliche Beitrag der systematischen Literaturanalyse nach Fahl, Hirscher, Haag et al. (2020) ist die *Synthese der Anforderungen* an ein *konsolidiertes und übergreifendes Funktionsverständnis*, die *Formulierung* und *Modellierung* in der *Frühen Phase im Modell der PGE* (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die Erkenntnisse fließen dabei in Abschnitt 4.4.2 direkt in die Synthese eines Anbieter-übergreifenden Funktionsverständnisses in der automobilen Produktentwicklungspraxis ein.

Funktionsorientierte Produktentwicklung

Eine *funktionsorientierte Produktentwicklung* ermöglicht in der Praxis das fachbereichsübergreifende Spezifizieren, Verifizieren und Modellieren stark vernetzter Funktionen (Kaiser, Baumann & Augustin, 2013). Im Sinne des Funktionsverständnis einer lösungsoffenen Wirkbeziehung wird zunächst nicht betrachtet, mit welchen physischen Elementen eine Funktion realisiert wird (Renner, 2007). Die Motivation der steigenden Funktionsorientierung rührt daher, dass Kunden und/oder Anwender nicht die physischen Elemente eines Produkts direkt wahrnehmen, sondern die Funktionen, bspw. eines Fahrzeugs, über dessen Eigenschaften erleben (Albers, Haug, Heitger et al., 2019; Hardt & Große-Rhode, 2008). Funktionen können daher als Treiber der mechatronischen Systementwicklung verstanden werden, die Anforderungen an die Hardware und Software definieren (Hardt & Große-Rhode, 2008). Ein System sollte zudem in der Problemlösung bzw. Produktentwicklung initial abstrakt anhand von Funktionen beschrieben werden (Gaag, 2010). Die Stärkung der Funktionsorientierung ist zunehmend entscheidend, um Herausforderungen der interdisziplinären Produktentwicklung zu bewältigen (Bernhart, 2004). Die Verknüpfung von Unternehmenswerten, Kunden-

sowie Anwenderanforderungen mit der technischen Realisierung über Funktionen ermöglicht eine übergreifende Konsolidierung. Der *Erweiterte Target Weighing Ansatz* (ETWA) nach Albers, Revfi & Spadinger (2020) kann bspw. an dieser Stelle zur funktionsbasierten Entwicklung leichter Produkte genutzt werden, um Leichtbaupotenziale zu identifizieren und zu evaluieren. Gleichmaßen ergeben sich Potentiale der Standardisierung von Funktionen zur Senkung der Entwicklungskosten und -risiken (Bernhart, 2004). Insgesamt ist eine gezielte Erfüllung von Anforderungen sowie Komplexitätsbeherrschung der wesentliche Beitrag des funktionsorientierten Denkens in der Produktentwicklung. Die Stärkung einer funktionsorientierten Entwicklung zieht maßgebliche Auswirkungen auf die organisatorische Unternehmensstruktur nach sich und ist in der Realität bei etablierten Anbietern nur sukzessive möglich (Allmann, 2007).

2.1.2 Modelltheorie und -verständnis

Die *Modelltheorie* fokussiert sich auf das Verständnis und die Entwicklung von vereinfachten und pragmatischen Abbildern der komplexen Wirklichkeit (Stachowiak, 1973).

2.1.2.1 Allgemeine Modelltheorie

Zur Beschreibung komplexer (technischer) Systeme werden *Modelle* als Strukturierungs- und Analysemittel genutzt. Die allgemeine Modelltheorie geht auf Stachowiak (1973) zurück und charakterisiert Modelle hinsichtlich des *Abbildungsmerkmals*, des *Verkürzungsmerkmals* und des *pragmatischen Merkmals*. Das Abbildungsmerkmal kennzeichnet die Tatsache, dass Modelle stets Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale sind, die wiederum selbst die Abbildung im Sinne eines Modells sein können. Über das Verkürzungsmerkmal wird beschrieben, dass ein Modell niemals alle Attribute des zugrundeliegenden Originals abbildet, sondern durch den Modellerschaffer oder -nutzer auf die jeweiligen relevanten Elemente reduziert wird. Das pragmatische Merkmal trägt der Zweckdienlichkeit eines Modells Rechnung. Demnach erfüllen Modelle eine Ersetzungsfunktion für bestimmte Subjekte innerhalb eindeutiger Zeitintervalle und unter Restriktion ausgewählter gedanklicher oder tatsächlicher Operationen. Der Zweck der Modellbildung liegt jedoch keinesfalls nur in der Zusammenfassung bereits bekannter Informationen, sondern in der Generierung neuer Erkenntnisse und der Erklärung sowie Prognose unvollständiger Aspekte der Realität durch die Nutzung des Modells (Keuth, 1978; Klaus, 1961). Im Rahmen der Produktentwicklung verknüpfen Albers & Lohmeyer (2012) die horizontale und vertikale *Durchgängigkeit* mit der *Konsistenz* von Modellen (vgl. Abbildung 2.7).

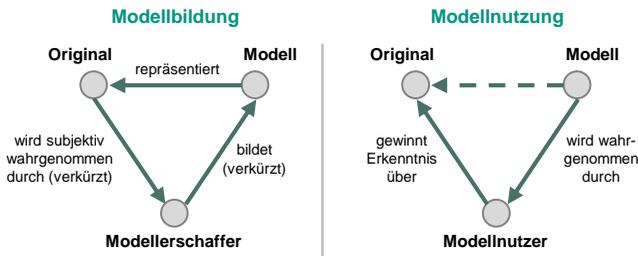


Abbildung 2.7: Modellbildung und Modellnutzung nach Lohmeyer (2013, S. 17)

Die *horizontale Durchgängigkeit* beschreibt mithilfe einer kontinuierlichen Erweiterung die Verwendung von Modellen durch den Modellnutzer über den gesamten Produktlebenszyklus. Die Einstellbarkeit des Detaillierungsgrades eines Modells je nach Anwendungsfall⁹ des Produktentwickelnden wird durch die *vertikale Durchgängigkeit* beschrieben. Im Zusammenhang mit der *Konsistenz* von Modellen wird ausgedrückt, dass keine Widersprüche in Modellen, die dasselbe Original repräsentieren, existieren dürfen. Modellerschaffer und -nutzer müssen nicht zwangsläufig unterschiedliche Personen darstellen, sondern von derselben Person eingenommen werden (Stachowiak, 1973). In diesem Fall kann das gebildete Modell als mentales Modell vorliegen und muss nicht expliziert werden, um für einen Erkenntnisgewinn genutzt zu werden (Meboldt, 2008). Der Austausch explizierter Modelle über die Kommunikation zwischen Personen, welche die unterschiedlichen Rollen des Modellerschaffers und -nutzers einnehmen, kann letztlich zu einer Angleichung unterschiedlicher mentaler Modelle durch Interaktion beitragen (Birkhofer & Jänsch, 2003). Sofern unterschiedliche Modelle desselben Originals, die bspw. von verschiedenen Personen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Zwecken gebildet wurden, nicht konsistent oder kompatibel sind, kann es zu Konflikten kommen. Dieser Umstand wird als *Reduktions-Dilemma* bezeichnet und zeigt sich gerade in modernen, interdisziplinären und komplexen Produktentstehungsprozessen. Inkompatiblen Produktmodellen und dem Reduktions-Dilemma im Allgemeinen kann nach Winzer (2013) mit transdisziplinären Metamodellen begegnet werden, die einheitliche Regeln für die Modellbildung vorgeben.

2.1.2.2 Strukturierung von Produktmodellen

In der Produktentstehung werden technische Produkte und deren Eigenschaften, Merkmale und Funktionen über Modelle abstrahiert, um den aktuellen Entwicklungs-

⁹ Der *Anwendungsfall* beschreibt nach Zingel (2013, S. 148) die „zeitlich zusammenhängende und zielgerichtete logische Abfolge von Ziel-Funktionen eines technischen Systems“.

stand abzubilden und zu explizieren (Lindemann, 2009). Solche *Produktmodelle* stellen demnach „*formale Abbilder realer oder geplanter Produkteigenschaften*“ dar (Ponn & Lindemann, 2011, S. 20) und unterstützen als *Kommunikationsgrundlage* die *Analyse des Objektsystems zur Erweiterung der Wissensbasis* (Andreasen, 1994). Produktmodelle dienen folglich der Analyse¹⁰ und Synthese¹¹ von Entwicklungsergebnissen und erleichtern somit ein *iteratives Vorgehen* (Albers & Lohmeyer, 2012). Im Rahmen der Produktentwicklung wird eine Vielfalt heterogener Formen von Produktmodellen expliziert – wie bspw. grafische oder symbolische Darstellungen von Bau- und Funktionsstruktur, Prinzipskizzen von Lösungskonzepten, technische Dokumentationen, Berechnungen, virtuelle oder physische Prototypen (Braun, 2014; Lindemann, 2009). Produktmodelle werden stets *aufgabenspezifisch generiert* und dienen daher einem *vorgesehenen Zweck*. Ponn & Lindemann (2011) differenzieren hierbei zwischen *Ziel-, Problem-, Entwicklungs- und Verifikationsmodellen*.

Im Laufe des Entwicklungsprozesses komplexer, technischer Produkte werden sehr unterschiedliche Produktmodelle erstellt (Lohmeyer, 2013), deren Konkretisierungs- bzw. Detaillierungsgrad stetig zunimmt (Ponn & Lindemann, 2011). In einem systemischen Ansatz strukturieren Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014) Produktmodelle, die mittels Referenzmodellen Informationen aus vorangehenden Generationen von Produkten nutzbar machen, anhand der *Abstraktionsgrade der Instanzierung* (formale Spezifikation) und *Individualisierung* (inhaltsbezogene Spezifikation) in einem *Framework* (vgl. Abbildung 2.8).

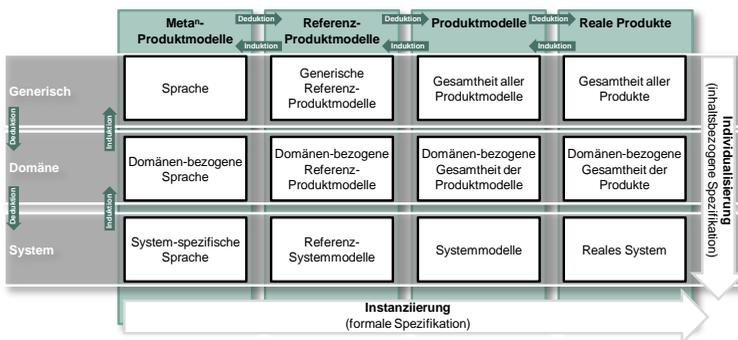


Abbildung 2.8: Framework der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung nach Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014, S. 7)

¹⁰ Die *Analyse* resultiert nach Lohmeyer (2013, S. 108) in Erkenntnis und kennzeichnet daher „*eine Handlung, die das Verstehen eines existierenden Systems bezweckt*“.

¹¹ Die *Synthese* resultiert nach Lohmeyer (2013, S. 108) in einem Ziel oder einem Objekt und kennzeichnet daher „*eine Handlung, die das Erschaffen eines bis dato noch nicht existierenden Systems bezweckt*“.

Auf Grundlage der generischen Sprache (z.B. SysML, vgl. Abschnitt 2.1.4.2) werden generische Referenz-Produktmodelle (bspw. Methoden der Anwendung von SysML) deduziert. Gleichmaßen können generische Sprachen ebenso in verschiedenen Domänen (z.B. SysML für die Automobilindustrie) inhaltsbezogen spezifiziert werden, die wiederum in Domänen-bezogenen Referenz-Produktmodelle resultieren. In diesen Fall wird die Grundstruktur der zu entwickelnden Fahrzeuge beschrieben (bspw. „*Fahrzeuge haben einen Antrieb*“). Durch Deduktion entstehen daraus spezifische Referenz-Systemmodelle (z.B. „*zweitürige Sportwagen haben eine Verbrennungskraftmaschine im Heck*“). Im Zuge einer Effizienzsteigerung der Produktmodellierung können die Referenz-Systemmodelle mit bestehenden Modellen aus der Domänen-bezogenen Gesamtheit der Produktmodelle (i.S.v. Bibliothek bisher verwendeter Produktmodelle, z.B. Antriebskonzept „*Sechszylinder-Boxer-Saugmotor*“) verknüpft werden. Resultierende Systemmodelle wie bspw. „*zweitüriger Sportwagen mit Sechszylinder-Boxer-Saugmotor Antriebskonzept im Heck*“ bilden die Grundlage, um reale Produkte wie den Porsche 911 GT3 (Typ 991) zu beschreiben. Gleichmaßen können neue Erkenntnisse ebenso induktiv entstehen und Produktmodelle in ihre Referenz-Produktmodelle und letztlich Metaⁿ-Produktmodelle weiterzuentwickeln. (Bursac, 2016, S. 118–119)

Ehrlenspiel & Meerkamm (2013) beschreiben die Entwicklung von abstrakten, stark verkürzten hin zu konkreten, detaillierten Produktmodellen mittels des *Pyramidenmodells der Produktkonkretisierung* (vgl. Abbildung 2.9). Die Pyramidenform bringt dabei den Informationszuwachs mit steigender Konkretisierung zum Ausdruck.

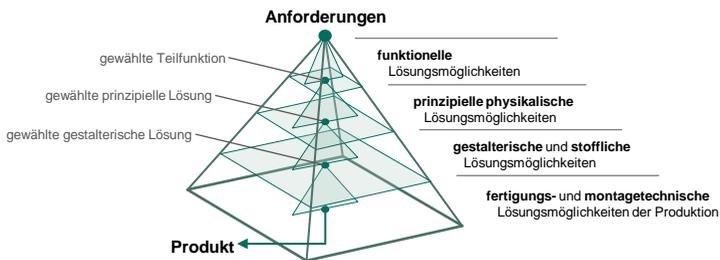


Abbildung 2.9: Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 39)

Die Überführung von Anforderungen in ein Produkt erfolgt entlang der Ebenen *funktionaler, prinzipiell physikalischer, gestalterischer und stofflicher* sowie *fertigungs- und montagetechnischer* Lösungsmöglichkeiten (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Verknüpft mit jeder einzelnen Ebene existieren Produktmodelle des entsprechenden Konkretisierungsgrads und Informationsgehalts (Ponn & Lindemann, 2011). Gemäß dem

hierarchischen Konzept der Systemstrukturierung spielt ebenso der *Zerlegungsgrad* bei der Beschreibung von Produktmodellen eine Rolle (Ponn & Lindemann, 2011). In diesem Zusammenhang lassen sich komplexe Problemstellungen im Entwicklungsprozess in handhabbare Teilprobleme zerlegen (vgl. Abschnitt 2.1.3.1). zur Strukturierung von Produktmodellen auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen wird in der Literatur häufig der Begriff *Produktstruktur* verwendet (Feldhusen & Grote, 2013; Ponn & Lindemann, 2011). Der Differenzierung zwischen einer funktionalen und physischen Beschreibung kommt dabei besondere Bedeutung zu (Feldhusen & Grote, 2013). Die funktionalen Zusammenhänge eines Produktes werden in der *Funktionsstruktur* oftmals in Bezug zur Kundensicht gesetzt. Die Verknüpfungen und Wechselwirkungen der physischen Bestandteile eines Produktes und folglich die alternativen Lösungen zur Realisierung der geforderten Funktionen werden in der *Baustruktur*¹² erfasst. Die *Wirkstruktur* bildet die Relation zwischen funktionaler und physischer Produktbeschreibung ab (Albers & Matthiesen, 2002). In der Entwicklungspraxis mechatronischer Produkte ist eine vollständige Trennung prinzipieller und gestalterischer Genese nach Albers nicht möglich – Prinzip und Gestalt werden unweigerlich gleichzeitig modelliert (Albers & Wintergerst, 2014). Die *Produkt- oder Systemarchitektur* setzt die drei Strukturen in Beziehung und legt somit fest, welche Funktion durch welchen Funktionsträger in der Baustruktur erfüllt werden soll (Ponn & Lindemann, 2011; Ulrich, 1995). Die Erzeugung der Produktarchitektur ist eine wesentliche Aufgabe der Produktentwicklung, da sie die funktionale in die physikalische Produktbeschreibung transformiert (Göpfert, 2009). In der idealisierten Entwicklungspraxis einer „*funktionsorientierten Produktentwicklung*“ wird ausgehend von der Funktionsstruktur die Baustruktur ausgearbeitet, wobei der funktionale Komplexitäts- und Konkretisierungsgrad variieren kann (Albers, Heitger, Haug et al., 2018). In der Literatur existieren über Einsatzzweck oder Konkretisierungsgrad weitere Kriterien der Klassifizierung von Produktmodellen (vgl. Kohn (2014)). Zusammenfassend kann die Strukturierung von Produktmodellen bspw. anhand Einsatzzweck, Konkretisierungsgrad, Phase im Entwicklungsprozess, Inhalt, strukturellem Aufbau, Herkunft oder Fachdisziplin strukturiert werden (Kohn, 2014).

2.1.3 Produktentstehungs- und Entwicklungsprozesse

Nach Albers (2010)¹³ ist jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell. Nichtsdestotrotz versucht man mit Prozessmodellen der Produktentstehung den Herausforderungen komplexer Entwicklungsaufgaben gerecht zu werden und methodi-

¹² Anmerkung: In der Literatur wird hier teilweise ebenso der Begriff „*Produktstruktur*“ anstelle „*Baustruktur*“ verwendet. In dieser Forschungsarbeit werden die Begriffe jedoch wie erläutert voneinander abgegrenzt.

¹³ vgl. 1. zentrale Hypothese nach Albers (2010, S. 4).

sche Unterstützung bei der Identifikation und Organisation notwendiger Aktivitäten beitzustellen. Die handelnden menschlichen Akteure müssen auf Grundlage des Verständnisses sozio-technisches Systeme nach Ropohl (2009) in die zielgerichtete Steuerung der Entstehung technischer Produkte einbezogen werden. Nach Lindemann (2009) lassen sich Modelle des Produktentstehungsprozesses nach ihrem *Auflösungsgrad hinsichtlich Mikro- und Makrologik* strukturieren (vgl. Abbildung 2.10).

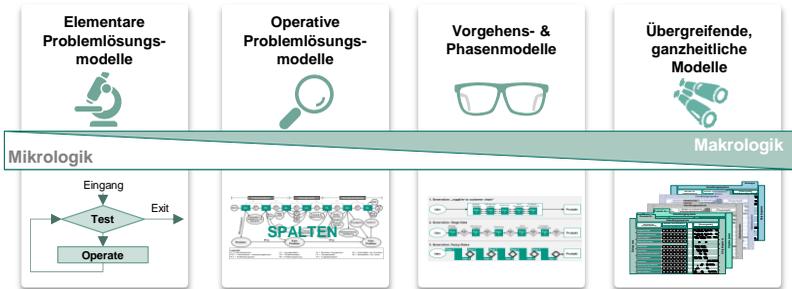


Abbildung 2.10: Auflösungsgrade des Produktentstehungsprozesses nach Lindemann (2009, S. 38) – Darstellung nach Heitger (2019, S. 35)

Elementare Denk- und Handlungsabläufe einzelner Individuen zur Problemlösung werden über Prozessmodelle der Mikrologik beschrieben, auf die im Abschnitt 2.1.3.1 eingegangen wird. Anknüpfend wird das Systemmodell der Produktentstehung (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) vorgestellt und Prozessmodelle der Makrologik über ausgewählte Vorgehens- und Phasenmodelle (vgl. Abschnitt 2.1.3.3) sowie übergreifende, ganzheitliche Modelle der Produktentstehung (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) erläutert.

2.1.3.1 Modelle elementarer und operativer Problemlösung

Entwicklung und Konstruktion eines technischen Produktes stellen den denkenden und handelnden Menschen im Mittelpunkt vor ein mehr oder weniger großes bzw. komplexes Problem, das es zu lösen gilt (Albers, Burkardt, Meboldt et al., 2005). Grundlegend charakterisiert sich ein *Problem* als überwindbare Barriere zwischen einem unerwünschten (Ist-)Anfangszustand und einem gewünschten (Soll-)Endzustand (Dörner, 1979), die durch (gedankliche) Transformation sowie mit geeigneten Hilfsmitteln und den zur Verfügung stehenden Ressourcen zu überwinden ist (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Im elementaren Kern orientieren sich Problemlösungsprozesse an den Modellvorstellungen zu *mental*en *Regelzyklen des menschlichen Denkens und Handelns* (Albers, Burkardt, Meboldt et al., 2005). *Modelle elementarer Problemlösung* sollen daher individuelle und implizite Problemlösungsprozesse denkender und handelnder Menschen zugänglich machen und fokussieren einzelne Individuen (Ebel,

2015). Ein typisches Beispiel wie das *TOTE-Modell* stammt aus der Kybernetik und beschreibt den Regelkreis aus Testen (*engl. test*) und Handeln (*engl. operate*), bis ein definiertes Abbruchkriterium (*engl. exit*) oder Sollzustand erreicht ist (Miller, Galanter & Pribram, 1960). Entsprungen aus der Qualitätssicherung setzt sich der *PDCA-Zyklus* aus den vier iterativen Schritten des Planens (*engl. plan*), Umsetzens (*engl. do*), Überprüfens (*engl. check*) und Handelns (*engl. act*) zusammen (Deming, 2000). Diese Modelle elementarer Problemlösung sind generisch gehalten, um ein breites Verständnis und eine vielseitige Anwendbarkeit zu ermöglichen, liefern jedoch zunächst keine konkreten Methoden zur Operationalisierung.

Die *Operationalisierung der Problemlösung* verfolgt das Ziel, dem Produktentwickler ein systematisches Vorgehen zur Lösung von Problemen in jeder Projektphase über notwendige Aktivitäten vorzugeben (Albers, Burkardt, Meboldt et al., 2005; Lindemann, 2009). Grundsätzlich lassen sich dazu in den Modellen operativer Problemlösung jeweils die drei mehr oder weniger ausgeprägten Aktivitäten der *Ziel- bzw. Problemlösung*, *Generierung von Lösungsalternativen* sowie *Auswahl der umzusetzenden Lösung* feststellen (Haberfellner, Weck, Fricke et al., 2015). Darüber hinaus kann zwischen *Ist-Zustands-* und *Soll-Zustands-orientierter Problemlösung* differenziert werden. Häufig verwendete Modelle operativer Problemlösung sind der *Problemlösungszyklus des Systems Engineering* nach Haberfellner & Daenzer (2002) und das *Münchner Vorgehensmodell* (Lindemann, 2009). Das Modell nach Rude (1998) hingegen fasst den Problemlösungsprozess als Transformation im Modellraum des Konstruierens auf und enthält die Lösungszustände Anforderung, Funktion, Prinzip und Gestalt. Damit orientiert sich das Modell weniger am Prozess und den Tätigkeiten, sondern am Konkretisierungsgrad der Arbeitsergebnisse.

Die *Problemlösungsmethodik SPALTEN* nach ALBERS definiert eine universelle Vorgehensweise, die ein iteratives Lösen beliebiger Problemstellungen durch kontinuierliche Problem- und Zielklärung erlaubt und sich damit sowohl für Not- als auch Plansituationen eignet (Albers, Burkardt, Meboldt et al., 2005). SPALTEN ist als Akronym aufgebaut und verwendet daher nur wenige Segmente von Aktivitäten, die von den *Problemlösungsteams* (PLT) durchlaufen werden. Dies erleichtert den Produktentwickler ein stringentes Vorgehen und erlaubt ihnen, sich auf die Problemlösung zu konzentrieren. Der SPALTEN-Prozess besteht aus sieben Schritten, die im Problemlösungsprozess sequenziell (d.h. immer von links nach rechts, vgl. Abbildung 2.11) angewendet werden, wobei nach entsprechenden Entscheidungen einzelne Schritte übersprungen werden können.

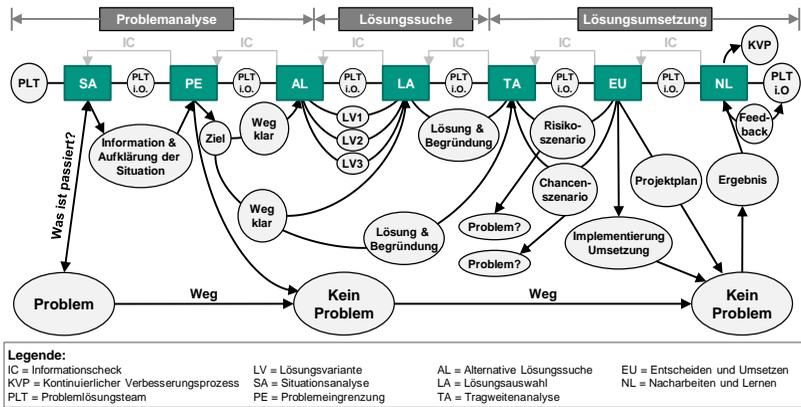


Abbildung 2.11: SPALTEN-Problemlösungsmethodik nach Albers, Burkardt, Meboldt et al. (2005, S. 5)

Die *Situationsanalyse* (SA) fokussiert zunächst die vorbereitende Informationsbeschaffung über Soll- und Ist-Zustand sowie die damit verbundenen Randbedingungen. Die Untersuchung der gesammelten Informationen erfolgt in der *Problemeingrenzung* (PE), um den Kern der weiteren Überlegungen einzuschränken. Ziel ist die Ermittlung von Ursache und Wirkung der Soll-Ist-Abweichung. Darauf aufbauend werden Entscheidungskriterien definiert. In dem folgenden Schritt der *Alternativen Lösungssuche* (AL) werden mögliche Lösungen oder Handlungsalternativen entwickelt, um die Differenz zwischen Soll- und Ist-Situation zu überwinden. Der Vergleich identifizierter Handlungsalternativen bildet die Basis zur *Lösungsauswahl* (LA), die nach den zuvor definierten Kriterien umgesetzt werden soll. In der *Tragweitenanalyse* (TA) erfolgt eine systematische Untersuchung und Abwägung der mit einer getroffenen Lösungsauswahl verbundenen Chancen und Risiken. Beim Perspektivenwechsel geht man davon aus, dass die Lösung bereits umgesetzt ist und versucht, die Konsequenzen zu analysieren. Die Entscheidung zur Umsetzung der Lösung und Implementierung der Lösung durch die Verantwortlichen wird über *Entscheiden und Umsetzen* (EU) beschrieben. Über die Aktivität *Nachbereiten und Lernen* (NL) erfolgt eine Reflexion des Problemlösungsprozesses und ggf. die Erfassung von Erkenntnissen für zukünftige Prozesse im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP). In der Entwicklungspraxis wird das Nachbereiten und Lernen (NL) oftmals aufgrund von (angeblichem) Zeitmangel nicht durchgeführt, obwohl diese Aktivität sowohl zur Aufbereitung des Produktentwicklungsprozesses als auch zur Sicherstellung der (prozessualen) Zukunftsfähigkeit entscheidend ist. (Albers, Burkardt, Meboldt et al., 2005)

Nach jedem Schritt wird ein *Informationscheck (IC)* durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Informationsbasis ausreichend genutzt wird und ob sie für die Durchführung des nächsten Schrittes geeignet ist. Gleichermäßen spielt die *dynamische Anpassung des PLT* an dieser Stelle eine bedeutende Rolle (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016). Die Problemlösungsmethodik SPALTEN hat *fraktalen Charakter*. Das bedeutet, dass jede einzelne Problemlösungsaktivität wiederum durch das Durchlaufen eines vollständigen, untergeordneten SPALTEN-Prozess bearbeitet werden kann (Albers, Braun & Muschik, 2010b). In den Modellen der KaSPro stellen Iterationen ein zentrales Element der Wissensgenerierung und Förderung von Kreativität im Entwicklungsprozess dar. Der Mehrwert liegt in dem daraus resultierenden, kontinuierlichen Zyklus aus Analyse- und Syntheseschritten (ein sogenannter „*atmender Prozess*“).

Weitere Begründungen für Iterationen sind vielfältig (vgl. Tabelle 2.1) und führen demnach zur Wiederholung einzelner Aktivitäten oder gar ganzer Prozesse.

Tabelle 2.1: Begründungen für Iterationen nach Wynn, Eckert & Clarkson (2007, S. 2)

Gründe für Iteration	Beschreibung
Exploration	Abwechselndes Erkunden des Problems bzw. der Lösung
Konvergenz	Annäherung an einen gewünschten Zielzustand durch wechselnde Anpassung verschiedener, sich meist gegenseitig beeinflussender, Parameter
Verfeinerung	Optimierung durch sekundäre Produkteigenschaften (z.B. Kosten)
Nachbesserung	Reagieren auf Fehler in der Lösung oder im Vorgehen oder aufgrund einer Anpassung geänderter Randbedingungen
Verhandlung	Klärung von Konflikten zwischen den Zielen unterschiedlicher Beteiligter
Repetition	Wiederholen der derselben Aktivitäten an verschiedenen Stellen des Entwicklungsprozesses, um unterschiedliche Ziele zu erreichen.

In der realen Entwicklungspraxis ist eine strikte Abfolge der Problemlösungsaktivitäten oftmals nicht gegeben oder möglich, daher kommt es aufgrund von Problemerkmalen wie (*Eigen-*)*Dynamik* und *Vernetztheit* häufig zu bewussten, aber unter Umständen auch unbewussten, Iterationen (Wynn, Eckert & Clarkson, 2007). Ergänzend zu den dargestellten, charakteristischen Begründungen für Iterationen kommen oftmals wei-

tere Prinzipien des Problemlösens, wie bspw. in der „*Theorie des erfinderischen Problemlösens – TRIZ*“ (vgl. z.B. Teufelsdorfer & Conrad (1998)) beschrieben, hinzu. Die VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-2:2019-11) beschreibt in einem Vorgehensraum darüber hinaus die drei Grundprinzipien des *Abstrahierens*, *Zerlegens* und *Variierens* von einem Problem oder Ziel hin zu einer Lösung. Wesentlich bei der Lösung komplexer Probleme sind einerseits eine gute Kommunikation im Problemlösungsteam sowie andererseits gemeinsam getragene Regeln in Bezug zu zeitlichen Vereinbarungen und Verantwortlichkeiten, da diese selten durch einzelne Individuen gelöst werden (Ponn & Lindemann, 2011).

2.1.3.2 Systemmodell der Produktentstehung

Der Regelkreis der Ingenieurstätigkeit wurde von Ropohl (1975) entwickelt, um Erscheinungen und Probleme mit denen Produktentwickelnde konfrontiert werden, in einem Modell der Systemtechnik zu erfassen. Auf Grundlage der Allgemeinen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) wird das sozio-technische System der Produktentstehung in einen *Regelkreis drei miteinander wechselwirkenden Systeme* gegliedert, der in die *gesellschaftliche, natürliche und technische Umgebung* eingebettet ist (vgl. Abbildung 2.12).



Abbildung 2.12: Regelkreis der Ingenieurstätigkeit nach Ropohl (1975, S. 33)

Basierend auf einem *Zielsystem* wird über ein *Handlungssystem* ein *Objektsystem* (Sachsystem) realisiert (Ropohl, 1975). Einerseits beeinflusst das Handlungssystem das Zielsystem, andererseits wirkt das generierte Objektsystem auf das Handlungssystem zurück. Albers (2010)¹⁴ greift dieses Verständnis auf und definiert im sogenannten *ZHO-Modell* die Überführung eines zunächst vagen Zielsystems durch ein Handlungssystem in ein zunehmend konkretes Objektsystem (Albers & Braun, 2011b).

¹⁴ vgl. 2. zentrale Hypothese nach Albers (2010, S. 4).

Das *Handlungssystem* beschreibt ein sozio-technisches System, welches strukturiert alle vernetzten *Aktivitäten*, *Methoden*¹⁵ und *Prozesse*¹⁶ sowie die erforderlichen *Ressourcen* zur Erstellung von und Transformation zwischen Ziel- und Objektsystem umfasst. Die kleinste Ausführungseinheit des Handlungssystems sind Aktivitäten. Durch das Handlungssystem werden sowohl Ziel- als auch Objektsystem erstellt und stehen nur dadurch in gegenseitiger Wechselwirkung. (Albers & Braun, 2011b; Meboldt, 2008; Oerding, 2009)

Das *Objektsystem* beinhaltet Ressourcen, Erkenntnisobjekte und Artefakte, i.S.v. materieller und immaterieller Ergebnisse des Handlungssystems, deren Zweck auf korrespondierenden Elementen des Zielsystems beruht. Demnach existiert in der Produktentstehung zu jedem Objekt- zwangsläufig ein dazugehöriges Zielsystem. Das Objektsystem umfasst alle bspw. Zeichnungen, virtuelle Modelle oder Prototypen, die als Teillösungen während der Produktentstehung generiert werden und enthält mit Abschluss der Entwicklung zudem das angestrebte Produkt. (Albers & Braun, 2011a, 2011b; Meboldt, 2008; Oerding, 2009)

Das *Zielsystem* beinhaltet „*alle relevanten Ziele, deren Wechselwirkungen und Randbedingungen, [...] für die Entwicklung des richtigen Produkts erforderlich sind*“ (Ebel, 2015, S. 18) „*innerhalb eines definierten Interessenbereichs (d.h. innerhalb eines System-of-Interest) zu einem bestimmten Zeitpunkt*“ (Lohmeyer, 2013, S. 65). *Lösungsformen* formulierte Zielsystem-Elemente zu Beginn eines Produktentwicklungsprozesses werden im Laufe der Entwicklung stetig konkretisiert (Gausemeier, Lindemann, Reinhardt et al., 2000) und damit *lösungsspezifischer* (Albers & Meboldt, 2006). Als *Anforderungen* werden konkretisierte Entwicklungsziele in Form geforderter *Eigenschafts- oder Merkmalsausprägungen* im Zielsystem bezeichnet (Ponn & Lindemann, 2011). Nach Lohmeyer (2013, S. 61) ist eine Anforderung „*eine durch einen Wert oder einen Wertebereich festgelegte Beschreibung eines einzelnen Produktmerkmals*“ und vermag es nicht ein Ziel zu ersetzen, jedoch konkretisierend zu beschreiben. Da in der Literatur keine eindeutige Trennung zwischen Zielen und Anforderungen im Kontext der Produktentstehung existiert (Stechert, 2010) oder möglich ist (Oerding, 2009), wird der Begriff der *Randbedingungen* zumeist zur Abgrenzung jener genutzt. Anforderungen können sich demnach sowohl aus Zielen, als auch Randbedingungen ableiten (Albers, Klingler & Ebel, 2013; Bader, 2007). *Randbedingungen* bezeichnen aus dem

¹⁵ Eine *Methode* hat nach Oerding (2009, S. 102) deskriptiven Charakter und beschreibt ein zielgerichtetes Vorgehen zur Unterstützung des Methodenanwenders bei der Zielerreichung anhand der Abbildung verallgemeinerten Wissens zu bestimmten Anwendungsfällen.

¹⁶ Ein *Prozess* hat nach Oerding (2009, S. 102) präskriptiven Charakter und beschreibt einen Ablauf über vorgegebene Zustände und Zeitpunkte hin zu einem definierten Ausgang.

Umfeld der Entwicklung resultierende Einschränkungen, werden häufig nicht vom Entwicklungsteam selbst verantwortet (Lohmeyer, 2013) und können als *exogen* (Ursprung außerhalb der Unternehmensgrenzen) oder *endogen* (Ursprung innerhalb der Unternehmensgrenzen) charakterisiert werden (Muschik, 2011). Ein *Ziel* begründet die Funktion und die Gestalt von Objekten und lässt sich damit charakterisieren als die „bewusste gedankliche Vorwegnahme eines zukünftigen Soll-Zustands, der gemeinsam vereinbart und durch aktives Handeln angestrebt oder vermieden wird“ (Lohmeyer, 2013, S. 61). Ziele umfassen den Bedarf, der alles beinhaltet, was das Produkt erreichen soll (Albers, Klingler & Ebel, 2013), und dienen der zweckbestimmten Beschreibung eines Merkmals des Systems oder Prozesses (Pohl, 2007). Die Anforderungen hingegen beschreiben, was ein Produkt können soll (Albers, Klingler & Ebel, 2013) und somit die Eigenschaftsausprägungen (oder Bedingungen), die ein System bzw. Prozess zur Problemlösung oder Zielerreichung aufweisen muss (Pohl, 2007). Ziele i.S.v. kollektiv beschlossener Soll-Zustände können demnach durch aktives Handeln erreicht oder verfehlt werden, wohingegen Anforderungen gewünschte Sachverhalte oder Eigenschaften der Lösung beschreiben (Eiletz, 1999). Randbedingungen, die das zu entwickelnde System einschränken, sind schwer oder teilweise nicht veränderbar (Pohl, 2007). Das resultierende Verständnis von *Zielen*, *Anforderungen* und *Randbedingungen* nach Ebel (2015) ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

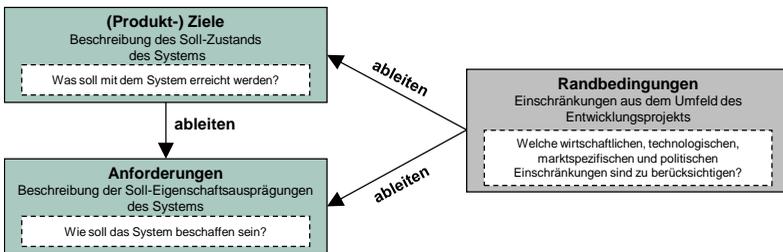


Abbildung 2.13: Unterscheidung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen nach Ebel (2015, S. 67) – Darstellung nach Heitger (2019, S. 55)

Die zunehmende Komplexität der zu entwickelnden Produkte und Systeme spiegelt sich unmittelbar in der Zunahme der Komplexität der damit verbundenen Ziele, Anforderungen und Randbedingungen wider (Grimm, 2003). Diese Elemente des Zielsystems sind wegweisend für den Verlauf der gesamten Produktentwicklung, denn nur wenn die Ziele richtig verstanden werden, kann die Planung, Durchführung und Erprobung zielorientierter Aktivitäten erfolgen (Albers, Klingler & Ebel, 2013).

Nach Albers & Meboldt (2006) folgt die Interaktion der Systeme des ZHO-Modells *drei zentralen Prinzipien* der *zweckmäßigen Zuordnung*, der *indirekten Wechselwirkung*

und der *doppelten Kontingenz*. Erstens sind Systemelemente nicht absolut einem der drei Systeme des ZHO-Modells zugeordnet, sondern relativ von Zeitpunkt, Zweck und Standpunkt abhängig (Prinzip der zweckmäßigen Zuordnung). Zweitens kann jede Handlung nur vollständig durch das ZHO-Systemtripler beschrieben werden, wobei zwischen Ziel- und Objektsystem nur indirekte Wechselwirkungen über das Handlungssystem bestehen (Prinzip der indirekten Wechselwirkung). Das Prinzip der doppelten Kontingenz beschreibt das Verhältnis zwischen Ziel- und Objektsystem, welches erst durch deren gleichwertige Kopplung in einer zielgerichteten Produktentwicklung mündet.

Albers, Ebel & Lohmeyer (2012) erweitern das ZHO-Modell zur Abbildung des iterativen Charakters der Produktentwicklung um die Basisaktivitäten der *Analyse* und *Synthese*. Die Analyse bezeichnet hierbei Handlungen, die dem Verständnis existierender Systeme dienen und in Erkenntnis resultiert (Lohmeyer, 2013). Das Erschaffen eines neuen Systems wird als Synthese beschrieben, die in neuen Elemente sowohl des Ziel- als auch Objektsystems resultieren (Lohmeyer, 2013). Das iterative Durchlaufen von Analyse- und Syntheseschritten bezweckt somit eine *co-evolutionären Entwicklung von Ziel- und Objektsystem* in unsicherheitsbehafteten Produktentstehungsprozessen. Das *erweiterte ZHO-Modell* (vgl. Abbildung 2.14) beschreibt die Produktentwicklung folglich „als kontinuierlichen Wechsel von *Kreation und Validierung*“ (vgl. Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 544) und Abschnitt 2.3.3).

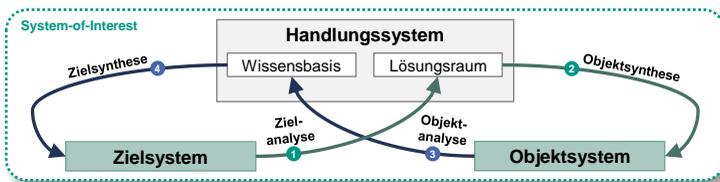


Abbildung 2.14: Erweitertes ZHO-Modell nach Albers, Ebel & Lohmeyer (2012, S. 8)

Ein *Kreationsschritt* im erweiterten ZHO-Modell umfasst die Basisaktivitäten der *Zielanalyse* [1] und *Objektsynthese* [2], während ein *Validierungsschritt* aus *Objektanalyse* [3] und *Zielsynthese* [4] zusammengesetzt ist (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Das Handlungssystem wird von Albers, Ebel & Lohmeyer (2012) zudem über die *Erweiterung der Wissensbasis* (Menge an Domänen- oder fallspezifischem Wissen) sowie die *Eingrenzung des Lösungsraum* (Menge an zulässigen Lösungen eines Problems) konkretisiert. Der *Lösungsraum* bildet die Grundlage zur mentalen, virtuellen und physischen Modellierung unter Berücksichtigung der Wissensbasis, die dem Handlungssystem zur Verfügung steht (Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012). Die systemtheoretische Modellierung der Produktentstehung als sozio-technisches System (vgl. Ropohl (1975)) im erweiterten ZHO-Modell sehen die Rolle des Menschen „im

Zentrum der Produktentstehung“ (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019, S. 8). Gerade aus diesem Grund muss die prozessuale und methodische Entwicklungsunterstützung an die Kreativität¹⁷, Kompetenzen, Bedarfe und kognitiven Fähigkeiten des Menschen angepasst werden (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019; Albers, Heimicke, Spadinger, Degner & Dühr, 2019).

2.1.3.3 Vorgehens- und Phasenmodelle der Produktentstehung

Vorgehens- und Phasenmodelle strukturieren den Produktentstehungsprozess in inhaltliche und zeitlich abtrennbare Arbeitsschritte und finden daher starke Verbreitung in der operativen Entwicklungspraxis (Lindemann, 2009). Ein weit verbreitetes Modell der Strukturierung unternehmensinterner Produktentstehungsprozesse ist das von Cooper (1994) entwickelte *Stage-Gate-Modell*. Eine sequenzielle Abfolge von Phasen, die durch Meilensteine (*engl. stage-gates*) voneinander abgetrennt sind, werden aus einer managementorientierten Sicht beschrieben, um den Fortschritt eines Entwicklungsvorhabens zu messen. Vorliegende Projektergebnisse werden mittels zuvor definierter Kriterien verglichen, wobei drei Generationen von Stage-Gate-Prozessen differenziert werden (vgl. Abbildung 2.15, Cooper (1994)).

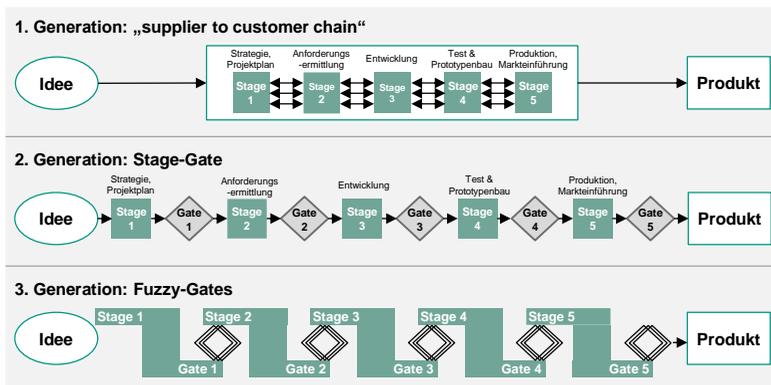


Abbildung 2.15: Generationen des Stage-Gate Ansatzes nach Cooper (1994, S. 5)

In der ersten Generation (*supplier to customer chain*) ist ein Übergang in die nächste Entwicklungsphase nur nach Befriedigung aller definierter, technischen Kriterien im Sinne einer Verkettung möglich. Hierbei kann es jedoch nach Cooper (1994) zu erheblichen Zeitverzögerungen kommen, da der Fokus ausschließlich auf technischen

¹⁷ Die *Kreativität* wird in Anlehnung an Beitz (1985) nach Deigendesch (2009, S. 93) vorrangig „mit dem Hervorbringen von etwas Originellem oder Neuem und nicht mit dem damit verbundenen Nutzen assoziiert“.

Aspekten liegt. Die stärkere Beachtung weiterer, nicht-technischer Erfolgsfaktoren zu den Meilensteinen finden in der *zweiten, marktorientierten Generation* Berücksichtigung. Der optionalen Überlappung einzelner Phasen zur Realisierung einer potenziellen Zeitersparnis im Vergleich zu einem strikt sequenziellen Ablauf, wird in sogenannten *Fuzzy Gates* (dritte Generation) Rechnung getragen. (Cooper, 1994)

Ein weiteres, praxisnahes Vorgehensmodell wird in der VDI-Richtlinie 2206 speziell für die systematische Entwicklung mechatronischer Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.1.3) beschrieben (VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Eine detaillierte Erläuterung des sogenannten *V-Modells zur systematischen Entwicklung technischer Systeme* findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang A.1.3.

Der (*automobile*) *Produktentstehungsprozess (PEP)* ist ein wesentlicher Geschäftsprozess des Produktlebenszyklus eines Fahrzeugs (Albers & Gausemeier, 2012; Hab & Wagner, 2017). Der PEP umfasst dabei alle Aktivitäten von Projektauftrag, (strategische) Produktplanung, Produkt- und Produktionssystementwicklung, über den Start der Produktion (*engl.* SOP: start of production) bzw. Realisierung, die Markteinführung (ME) und Phase der Produktnutzung sowie Produktionsende (*engl.* EOP: end of production) (Albers & Gausemeier, 2010; Eigner & Stelzer, 2009; VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11). Der technische Produktlebenszyklus endet nach der VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11) mit der Stilllegung oder Herausnahme eines Produkts aus dem Markt (*engl.* EOL: end of lifecycle).

Am Beispiel der Automobilindustrie unterscheidet sich der automobile PEP zwischen verschiedenen Automobilherstellern nur unwesentlich in Bezug zu Fremd- und Eigenleistung (Braess & Seiffert, 2013) bzw. der Länge der Hauptphasen mit den dazwischenliegenden Quality-Gates analog Cooper (1994). Produkt- und Projekt-spezifische Anpassungen können nach Maier (2010) aus einem generisch formulierten PEP ausgeleitet werden. Der *Fahrzeugentwicklungsprozess (FEP)* erstreckt sich vom Projektauftrag bzw. ersten Produktideen bis zum Zeitpunkt der Auslieferung des ersten Fahrzeugs am Markt (Hab & Wagner, 2017). Der FEP verfolgt die zielgerichtete Umsetzung der Anforderungen aktueller und zukünftiger Kunden in einem entsprechenden Produkt, unter Berücksichtigung von Qualität, Kosten und Zeit. Der Zielerreichungsgrad und die Befriedigung der Bedürfnisse werden in letzter Instanz durch den Kunden oder Anwender beurteilt und bestätigen idealerweise den Erfolg der Produktentwicklung (Gusig & Kruse, 2010). In der industriellen Automobilentwicklungspraxis erfolgt eine phasenorientierte Einteilung des FEPs, zu deren Stage-Gates der Projektfortschritt und -reifegrad bewertet werden (Hab & Wagner, 2017). Der FEP lässt sich grob in die drei Phasen der *Konzeptentwicklung*, *Serienentwicklung* und *Produktion* einteilen (Gusig & Kruse, 2010). Die einzelnen Phasen können wie in Abbildung 2.16 dargestellt in weitere Subphasen untergliedern.

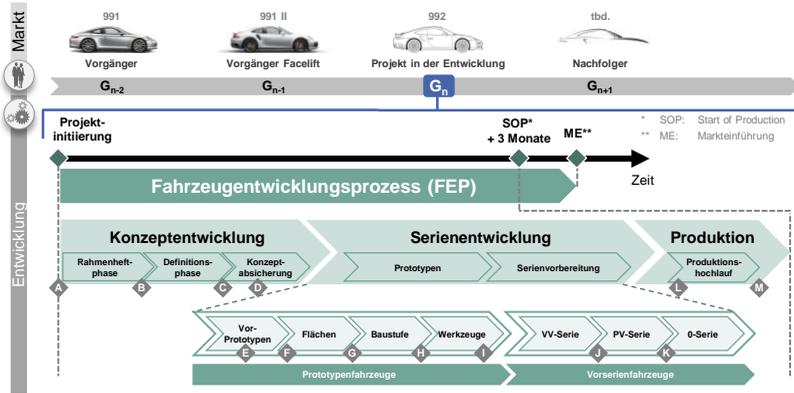


Abbildung 2.16: Schematischer Fahrzeugentwicklungsprozess (FEP) am Beispiel des Porsche 911 nach Frech (2018, S. 12) – Darstellung nach Fahl (2017, S. 29)¹⁸

Fahrzeugentwicklungsprojekte lassen sich zudem bspw. nach ihrer Art, der damit verbundenen Komplexität sowie dem Zeitraum zwischen Start der Zielsystembildung und der Markteinführung differenzieren (Heitger, 2019, S. 115):

- *Karosserie-Varianten* von Fahrzeugen bestehender Produktlinien¹⁹
- *Nachfolge-Fahrzeuggenerationen* bereits am Markt etablierter Produktlinien
- *Nachfolge-Fahrzeuggenerationen* bereits am Markt etablierter Produktlinien mit *neuer Antriebstechnologie*
- *Erste Fahrzeuggeneration* neuer Produktlinie

2.1.3.4 Übergreifende und ganzheitliche Modelle der Produktentstehung

Die übergreifenden und ganzheitlichen Modelle der Produktentstehung verfolgen das Ziel, mehrere Auflösungsgrade des Produktentstehungsprozesses abzubilden und damit eine Vielfalt an Stakeholdern, wie Management, Entwicklung oder Kunden zu adressieren (Lindemann, 2009). Albers & Muschik (2010) strukturieren in einem systemischen Ansatz die *Prozessmodellierung* mittels der *Abstraktionsgrade der Instanziierung* (formale Spezifikation) und *Individualisierung* (inhaltsbezogene Spezifikation) in einem *Framework* (vgl. Abbildung 2.17).

¹⁸ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

¹⁹ Anmerkung: In Abschnitt 2.3.1.1 erfolgt die Erläuterung des Verständnisses einer *Produktlinie* im Kontext des Produktportfolios eines Anbieters.

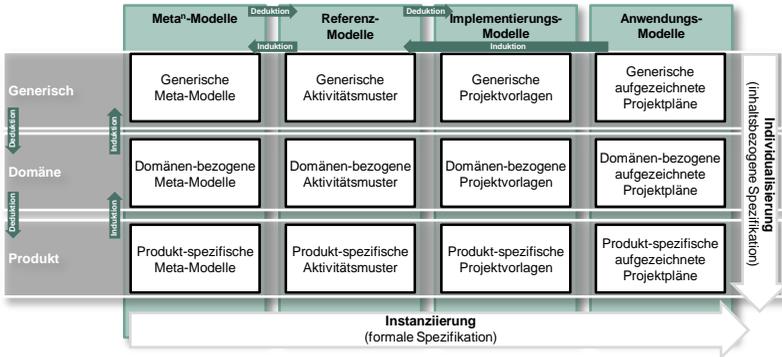


Abbildung 2.17: Framework der Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung nach Albers & Muschik (2010, S. 6)

In der Dimension der Instanziierung werden *Metaⁿ-*, *Referenz-*, *Implementierungs-* und *Anwendungs-Modelle* unterschieden (Albers & Muschik, 2010). Auf Grundlage von gesammelten Erfahrungen in vorangehenden Produktentstehungsprozessen können wiederkehrende Aktivitätsmuster in Referenz-Modellen abgebildet werden. Die konkreten Projektvorlagen unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen können daraus in Implementierungs-Modelle (i.S.v. Soll-Prozesse) ausgeleitet werden. Der tatsächliche Ablauf wird über die Aufzeichnung von Projektplänen in Anwendungs-Modellen (i.S.v. Ist-Prozessen) beschrieben. Ein Vergleich von Implementierungs- und Anwendungs-Modell ermöglicht die Überprüfung des Projektfortschritts. Nach Albers & Braun (2011a) dient die konsequente Modellierung von Implementierungs- und Anwendungsmodellen der Verfeinerung des Referenz-Modells. Im Hinblick auf den Individualisierungsgrad können die generischen Modelle im Framework durch Deduktion für die Anwendung in spezifische Domänen oder sogar konkreten Produkten nutzbar gemacht werden. Ein Metaⁿ-Modell kann dazu bspw. auf die notwendigen Methoden der Domänen-bezogen Fahrzeugentwicklung oder die Entwicklung eines spezifischen Fahrzeugs (Produktebene) reduziert werden. (Albers & Muschik, 2010)

Das *Münchner Produktkonkretisierungsmodell* (MKM) nach Ponn & Lindemann (2011) trennt die technischen Ziele der Entwicklung im *Anforderungsraum* von deren möglichen Realisierungen im *Lösungsraum*. Das MKM fokussiert im Rahmen des Entwicklungsprozesses erzeugte Produktmodelle, die anhand der wesentlichen Dimensionen *Konkretisierungs-*, *Zerlegungs-* und *Variationsgrad* geordnet sind (Ponn & Lindemann, 2011). Die oberste *Funktionsebene*, soll das Produkt oder mögliche Lösungen abstrakt und zweckorientiert beschreiben, ohne konkrete, technische Lösungsprinzipien zu benennen. In der *Wirkebene* werden prinzipielle Lösungsideen zur Realisierung be-

stimmter Funktionen in Gesamtkonzepten beschrieben, die wiederum mit der konkreten Gestalt in der *Bauebene* verknüpft werden. Die drei Ebenen sind in der Entwicklungspraxis nicht starr, sondern dynamisch und verfließen in ihren Übergängen (Ponn & Lindemann, 2011). Vor diesem Hintergrund wird nach ALBERS der Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion erkennbar – der Schlüssel für das Verständnis und die Beschreibung eines technischen Systems (Albers & Wintergerst, 2014). In der Entwicklungspraxis wird deutlich, dass Prinzip und Gestalt untrennbar miteinander verbunden sind und dennoch das präsenste Denken in Bauteilen und deren örtliche Gebundenheit überwunden werden muss (Matthiesen, 2021). Die Produktentwicklung stellt im Allgemeinen einen kontinuierlichen Übergang von abstrakten zu konkreten Elementen dar. Dennoch gehört zur Produktspezifikation (vgl. Abschnitt 2.3) in verschiedenen Situationen ein Schritt in die entgegengesetzte Richtung, z.B. bei der Analyse des Einflusses im Sinne der Abstraktion bestimmter Subsysteme zu übergeordneten Funktionen des Gesamtproduktes (Ponn & Lindemann, 2011). Im MKM ist grundsätzlich über die Differenzierung zwischen Anforderungs- und Lösungsraum eine prinzipielle Unterscheidung von Kunden- und Entwicklerperspektive auf technische Produkte möglich. Das sogenannte *Kaiserslauterner Systemkonkretisierungsmodell (KSKM)* nach Eigner, Dickopf & Apostolov (2019) beschreibt ein ganzheitliches Modell für die systematische Entwicklung cybertronischer Systeme. Das KSKM wurde auf Grundlage des MKM um einen *Administrationsraum* erweitert, der die Metadaten der Modellelemente (wie z.B. eine eindeutige ID oder deren Version) enthält, die für die Verwaltung der Elemente über den Systemlebenszyklus benötigt werden.

In der neuen Ausgabe der VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11) wird ein *allgemeines Modell der Produktentwicklung* (vgl. Abbildung 2.18) erörtert, das einerseits die Überarbeitung und Erweiterung des in den Ingenieurwissenschaften verbreiteten *Vorgehensmodells zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme* der Vorgängerversion der VDI-Richtlinie 2221 aus dem Jahr 1993 (VDI-Richtlinie 2221:1993-05) darstellt. Andererseits fußt es auf den Beobachtungen und Erkenntnissen, dass Iterationen ein wesentlicher Bestandteil realer Entwicklungsprozesse sind, die individuell sind (Albers, 2010) und in der Regel nicht sequenziell ablaufen (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Der Entwicklungsprozess der VDI-Richtlinie 2221 gliedert sich in generische Aktivitäten, die nicht sequenziell durchlaufen werden müssen und auf dem Verständnis des iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016) basieren. Im Zuge einer kontextspezifischen Modellierung der Produktentwicklung werden in der VDI-Richtlinie 2221 sowohl *externe* (makroökonomisch und mikroökonomisch) als auch *interne Faktoren* (organisatorische, projektbezogene und individuelle) Faktoren berücksichtigt (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11). Aus diesem Grund gliedern generische Aktivitäten das überschaubare, rationale und branchenunabhängige Vorgehen im Entwicklungsprozess. Die spezifischen Abläufe in konkreten Projekten werden in der VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-2:2019-11) detailliert.

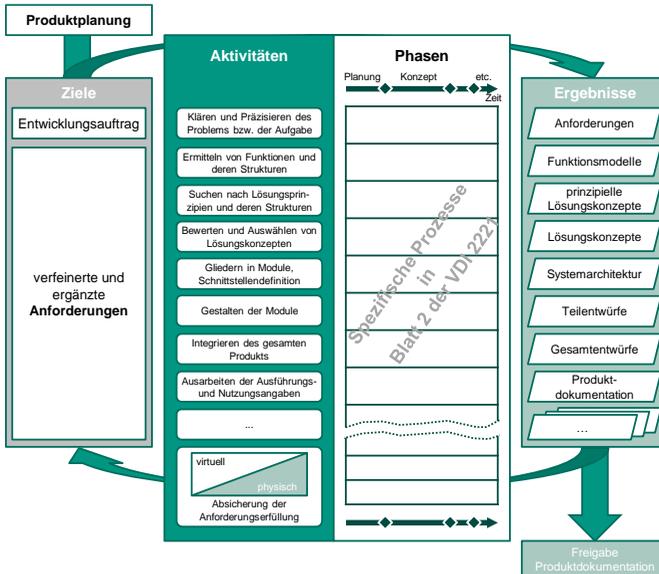


Abbildung 2.18: Allgemeines Modell der Produktentwicklung der VDI-Richtlinie 2221 nach VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11, S. 31

Der *Contact, Channel and Connector Approach* (C&C²-A) ist ein Meta-Modell von Albers & Matthiesen (2002), das mit 20 Jahren Anwendungserfahrung die Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ) in der Produktentwicklung ermöglicht (Grauberger, Wessels, Gladysz et al., 2019). Das Denkwerkzeug betrachtet dabei den „Paarcharakter“ der funktionsrelevanten Systembestandteile und bezieht die Systemumgebung mit ein (Gladysz & Albers, 2018). Nach Albers (2010)²⁰ müssen die in einem Entwicklungsprozess generierten Objekte in Bezug zu den beabsichtigten Funktionen (im Zielsystem) beschrieben werden, um die Ziele transparent zu halten. Der C&C²-Ansatz verfolgt daher das Ziel, Produktentwickelnde bei der Identifikation funktionsrelevanter Parameter und dem Denken im Systemkontext zu unterstützen (Matthiesen, Grauberger, Sturm et al., 2018). Der C&C²-Ansatz postuliert drei Grundhypothesen, die das Regelwerk der Modellbildung darstellen. Demnach braucht eine *Funktion Wechselwirkung*²¹ (Grundhypothese 1) und *Mindestelemente* (Grundhypothese 2). Darüber hinaus hat die C&C²-Modellbildung *fraktalen Charakter* (Grundhypothese 3). (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, Grauberger, Hölz et al., 2018)

²⁰ vgl. 4. zentrale Hypothese nach Albers (2010, S. 5).

²¹ vgl. 5. zentrale Hypothese nach Albers (2010, S. 6).

Kernelemente zur Darstellung von GFZ bilden nach Albers & Matthiesen (2002) und Albers & Wintergerst (2014) *Wirkflächenpaare* (WFP), *Leitstützstrukturen* (LSS) und *Connectoren* (C).

- **Wirkflächenpaare** (WFP) sind Flächenelemente, die gebildet werden, „wenn zwei beliebig geformte Oberflächen fester Körper oder generalisierter Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern in Kontakt [engl. contact] treten und am Stoff-, Energie- und/oder Informationsaustausch beteiligt sind“ (Matthiesen, 2021, S. 421).
- **Leitstützstrukturen** (LSS) sind Volumenelemente, die „Volumina von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen [beschreiben], die genau zwei WFP verbinden und eine Leitung [engl. channel] von Stoff, Energie und/oder Information zwischen ihnen ermöglichen“ (Matthiesen, 2021, S. 421 f.).
- **Connectoren** (C) sind repräsentative Flächenelemente mit einem verknüpften Modell der relevanten Abstraktion der Systemumgebung, die für die Beschreibung der betrachteten Funktion wirkungsrelevanten Eigenschaften außerhalb des aktuellen Gestaltungsbereichs in die Systembetrachtung integrieren (Albers & Wintergerst, 2014; Matthiesen, 2021, S. 422).

Ergänzt wird der C&C²-Ansatz um die Nebenelemente *Wirkfläche* (WF), *Reststruktur* (RS) und *Begrenzungsfläche* (BF) sowie die Strukturelemente *Tragstruktur* (TS), *Wirknetz* und *Wirkstruktur* (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2021). Die Ontologie der C&C²-Elemente sowie der Elementmengen nach Matthiesen (2021) sind in Abbildung 2.19 veranschaulicht.

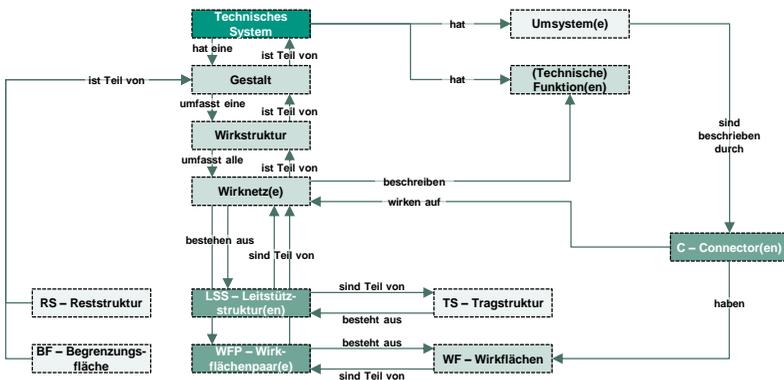


Abbildung 2.19: Ontologie der C&C²-Elemente sowie Elementmengen nach Matthiesen (2021, S. 424) in Anlehnung an Albers & Matthiesen, 2002; Albers & Wintergerst, 2014

Dynamische Veränderungen technischer Systeme führen zur Beobachtung unterschiedlicher Zustände der Funktionserfüllung und -modellierung im C&C²-A. Aus der zeitlichen Abfolge verschiedener Zustände kann ein Sequenzmodell generiert werden (Matthiesen & Ruckpaul, 2012). Das *Wirknetz* wird aus der Summe der C&C²-Elemente eines Zustands und die *Wirkstruktur* eines Systems wiederum aus der Gesamtheit der Wirknetze über alle Zustände gebildet (Albers & Matthiesen, 2002; Albers & Wintergerst, 2014; Matthiesen, Grauberger, Hölz et al., 2018). Die Bildung eines C&C²-Modells erfordert eine geeignete Darstellung der Gestalt²², wie bspw. Skizzen, CAD-Schnittdarstellungen, Fotos von Prototypen oder Simulationsmodelle als Grundlage (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2021). Der Detaillierungsgrad von C&C²-Modellen lässt sich stufenlos variieren und wird durch den Modellierungszweck des betrachteten Systems bestimmt (Albers, Gladysz, Kniel et al., 2016). In Abbildung 2.20 ist exemplarisch das C&C²-Wirknetz am Beispiel eines Hybrid-Antriebsstrangs nach Albers & Wintergerst (2014) dargestellt.

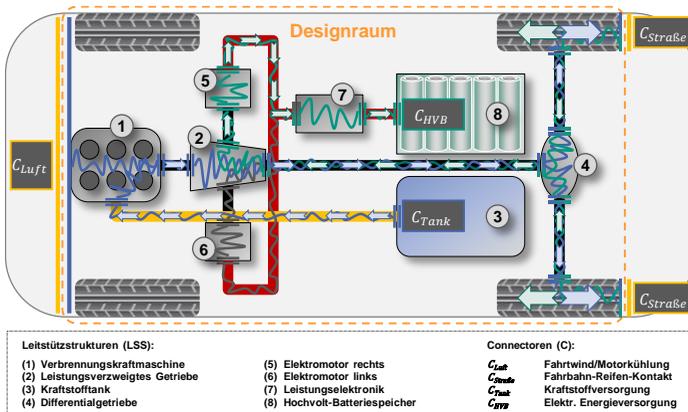


Abbildung 2.20: C&C²-Wirknetz am Beispiel eines Hybrid-Antriebsstrangs nach Albers & Wintergerst (2014, S. 11)

Die Darstellung zeigt die wesentliche Wirkstruktur der Hauptfunktion „*Fahrzeug fahren*“ eines hybrid-elektrischen Fahrzeugs. Der relevante Systemausschnitt ist hierbei durch die Connectoren begrenzt, die zugleich den Fokus auf die bedeutsamen Wechselwirkungen zwischen den WFP und LSS des C&C²-Modells und der Umwelt legen. In Abhängigkeit unterschiedlicher Betriebszustände (bspw. Rekuperations-, Elektro-,

²² Die *Gestalt* bezeichnet nach Zingel (2013, S. 147) „die quantitative Beschreibung der Summe aller Merkmale und Struktureigenschaften der physischen Struktur eines technischen Systems“.

Verbrennungsmotor- oder Boost-Modus) realisiert nicht die vollständige Wirkstruktur, sondern das entsprechende Wirknetz die Ausführung der Hauptfunktion „*Fahrzeug fahren*“. Kraftstofftank als auch der Hochvolt-Batteriespeicher sind in Abbildung 2.20 exemplarisch verkürzt dargestellt, wenngleich diese Zusammenhänge durch zusätzliche WFP und LSS des Wirknetzes bedarfsgerecht ergänzt werden könnten. (Albers & Wintergerst, 2014)

Zusammenfassend, lässt sich feststellen, dass die C&C²-Modellierung entsprechend der allgemeinen Modelltheorie (vgl. Abschnitt 2.1.2.1) zweckgebunden und anwendungsspezifisch sind. In Abhängigkeit bestimmter Systemzustände werden nur relevante Schnittstellen und physische Strukturen, die aktiv an der Funktionserfüllung beteiligt sind, sowie die zugehörigen Wirkungen betrachtet (Albers & Wintergerst, 2014). Die Connectoren ermöglichen eine Eingrenzung des Systemausschnitts und somit die Verkürzung der Modelle. Eine Herausforderung stellt die Überführung von C&C²-Modellen unterschiedlichen Detailgrades ineinander dar, weil diese mit einem hohen, initialen Modellierungsaufwand zur konsistenten Abbildung zusätzlicher Informationen einhergehen (Albers, Gladysz, Kniel et al., 2016).

Das ganzheitliche Werkzeug C&C²-A unterstützt folglich wie erläutert die Systemsynthese in der Produktentstehung und wird in der vorliegenden Arbeit zur Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen genutzt. Ferner existieren jedoch übergreifende Modelle der Produktentstehung, die das Ziel verfolgen Produktentstehungsprozesse ganzheitlich zu modellieren. Besondere Herausforderung stellt die Einzigartigkeit und Individualität eines jeden Produktentstehungsprozesses²³ dar, dem gängige Vorgehens- und Phasenmodelle (vgl. Abschnitt 2.1.3.3) meist nicht gerecht werden.

Das *iPeM – integrierte Produktentstehungsmodell* nach ALBERS ist ein solches Metaⁿ-Modell, das die Modellierung verschiedene Auflösungsgrade (Mikro- und Makroebene) des Produktentstehungsprozess adressiert (Albers & Meboldt, 2007; Albers & Braun, 2011a). Die Zusammenhänge des ZHO-Modells (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) und der SPALTEN-Problemlösungsmethodik (vgl. Abschnitt 2.1.3.1) bilden die Grundlage des iPeM. Das Handlungssystem gliedert sich im iPeM in einen *statischen* (Ressourcensystem und Aktivitätenmatrix) sowie einen *dynamischen Bestandteil* (Phasenmodell). Die *Aktivitätenmatrix* setzt sich aus den (Makro-)Aktivitäten der Produktentstehung (i.S.v. Handlungsfeldern aus Sicht des Produktentwickelnden) und den (Mirko-)Aktivitäten der Problemlösung nach SPALTEN zusammen. Das *Phasenmodell* ermöglicht die Abbildung und damit Planung und Dokumentation der iterativen Aktivitäten auf einem Zeitstrahl über den Verlauf des Entwicklungsprozesses. Hierbei kann im Hinblick auf die abgebildeten Projektverläufe zwischen Referenz-, Soll- und Ist-Prozessen analog

²³ vgl. 1. zentrale Hypothese nach Albers (2010, S. 4).

der Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung (vgl. Albers & Muschik (2010)) differenziert werden (Wilmsen, Dühr, Heimicke et al., 2019).

Das iPeM (vgl. Abbildung 2.21) stellt somit die notwendigen Elemente zur Modellierung und Lösung individueller Problemstellungen zur Verfügung und ermöglichen dabei sowohl eine managementorientierte als auch operative, entwicklungsorientierte Sicht auf die Produktentstehung in der Praxis (Albers, Braun & Muschik, 2010a).

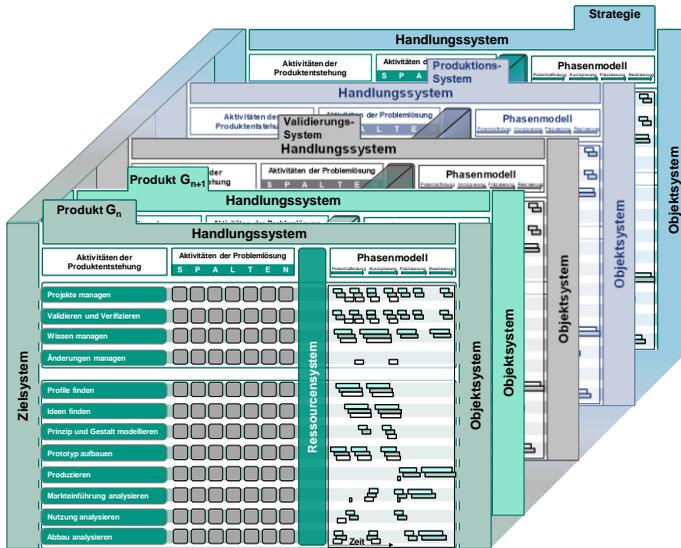


Abbildung 2.21: iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016, S. 5)

In der Entwicklungspraxis befinden sich häufig mehrere Generationen eines Produkts (G_n, G_{n+1}, \dots) gleichzeitig in der Entwicklung (vgl. Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS in Abschnitt 2.2). Darüber hinaus bedingt die eigentliche Entwicklung eines Produktes ebenso die Entwicklung des dazugehörigen Validierungs- und Produktionssystems sowie einer Produktstrategie. Insgesamt existieren dazu jeweils eigene Entwicklungsprozesse, die sich jedoch durch starke Wechselwirkungen zueinander auszeichnen. Das iPeM berücksichtigt unterschiedliche Produktgenerationen und sowohl Validierungs- und Produktionssysteme als auch Produktstrategie in separaten Ebenen (bzw. Layern). Die einzelnen Ebenen des iPeM verfügen einerseits über ein gemeinsames Ziel- und Ressourcensystem und andererseits jedoch über getrennte Objektsysteme. Alle diese Ebenen repräsentieren jeweils ein ei-

genes Prozessmodell (z.B. Entwicklungsprozess, Strategieprozess, etc.) in dem sogenannte Basis- und Kernaktivitäten (vgl. Tabelle 2.2) durchgeführt werden. Im Vergleich zu klassischen, sequenziellen Vorgehensmodellen ist deren Reihenfolge nicht vorgegeben. Die vernetzten Konzepte des iPeM sind dementsprechend bspw. u.a. in die VDI-Richtlinie 2221 integriert worden. (Albers & Braun, 2011a; Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016).

Tabelle 2.2: Aktivitäten der Produktentstehung nach Albers & Braun (2011a, S. 14f), Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016) und Reiß (2018, S. 141)

	Aktivitäten der Produktentstehung	Beschreibung
Basisaktivitäten	Projekte managen	kontinuierliche Projektfortschrittskontrolle
	Validieren und Verifizieren	Zentrale Aktivität der Produktentstehung: beinhaltet den kontinuierlichen Abgleich des Ist-Zustandes mit dem im Zielsystem beschriebenen Soll-Zustand
	Wissen managen	Identifikation, Entwicklung, Verteilung, Nutzung, Bewahrung und Erwerb Wissens
	Änderungen managen	Koordination technischer, wirtschaftlicher und sozialer Veränderungen, um Fehler und Potenziale frühzeitig aufzudecken
Kernaktivitäten	Profile finden	Finden von Produktprofilen, welche Kunden-, Anbieter- und Anwendernutzen in Form eines Nutzenbündels beschreiben, um den Lösungsraum für die Entwicklung vorzugeben und der Validierung zugänglich zu machen
	Ideen finden	Gestaltneutrale Ideen für Produkte generieren, welche Produktprofile bedienen
	Prinzip und Gestalt modellieren	Überführung der abstrakten Skizzen und Entwürfe der Produktideen in ausgearbeitete Detailzeichnungen, CAD-Modelle oder Fertigungsunterlagen
	Prototyp aufbauen	Aufbau physischer und virtueller Prototypen
	Produzieren	Herstellen des Produkts
	Markteinführung analysieren & gestalten	Aufbau des Vertriebsnetzes für das Produkt
	Nutzung analysieren & gestalten	Informationsquelle für Anforderungen an Produkt und Prozess
	Abbau analysieren & gestalten	Abbau, das Recycling oder die Endlagerung des Produkt

Die Kernaktivitäten der Produktentstehung sollen unmittelbar den Produktreifegrad (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) erhöhen und werden auf unterschiedlichen Ebenen (bspw. Produkt, Strategie, Produktions- und Validierungssystem) ausgeführt. Die Basisaktivitäten hingegen können nicht allein existieren, sondern dienen in einem regelmäßig wiederkehrenden Modus der Unterstützung von Kernaktivitäten (Albers & Braun, 2011a; Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016).

2.1.4 Modellbasierte Entwicklung (MBE)

Im Verlauf der Produktentwicklung entsteht eine große Vielfalt an heterogenen Modellen, man spricht daher generell von einer *modellbasierten Entwicklung* (MBE, *engl.* Model-Based Engineering). MBE legt als Software- und Systementwicklungsparadigma den Schwerpunkt auf visuelle Modellierungsprinzipien und Best Practices, zu denen bspw. CAD-Modelle, Finite-Elemente-Modelle, aber ebenso Textdokumente wie Pflicht-/Lastenhefte oder Tabellen und Stücklisten zählen (Bergenthal, 2011; Munker, 2016). Die visuellen Modellierungsartefakte verfolgen das Ziel, eine architekturgetriebene, präzise und vollständige „*Blaupause*“ der strukturellen und funktionalen Integritätsbeziehungen zu modellieren, die eine Rückverfolgbarkeit von Anforderungen über alle Stakeholder-Sichten hinweg unterstützen soll. MBE ist zweckgebunden und wird in Wissensmanagementsystemen verwaltet. Mit einer der größten Herausforderungen stellt aufgrund des Reduktions-Dilemmas die Konsistenz heterogener Modelle und deren Elemente dar (vgl. Abschnitt 2.1.2.1, Winzer (2013)).

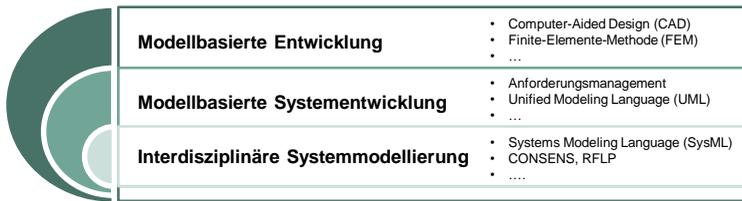


Abbildung 2.22: Teilmengen der modellbasierten Entwicklung (MBE) nach Munker (2016, S. 9)

Modellbasierte Entwicklung (MBE) umfasst alle Modelle im gesamten Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2.22) und gilt daher als Überbegriff mehrerer Teildisziplinen wie u.a. die *Modellbasierte Systementwicklung* (MBSE, *engl.* Model-Based Systems Engineering, vgl. Abschnitt 2.1.4.1) und die *interdisziplinäre Systemmodellierung* (vgl. Abschnitt 2.1.4.2 bzw. Anhang A.1.4).

2.1.4.1 Modellbasierte Systementwicklung (MBSE)

Der Entwicklungsansatz der *modellbasierten Systementwicklung* (MBSE, *engl.* Model-Based Systems Engineering) integriert Prozesse und Methoden des Systems Engineering (Walden, Roedler, Forsberg et al., 2017) mit dem Potenzial einer verbesserten Beherrschung von Komplexität im Entwicklungsprozess durch die Verwendung eines zentralen, visualisierten Modells für die Produktspezifikation (D'Ambrosio & Soremekun, 2017). Das interdisziplinäre Modell kann hierbei von den unterschiedlichen Sta-

keholdern genutzt sowie bearbeitet werden, wirkt somit dem Reduktions-Dilemma entgegen (Bursac, 2016) und erhöht die Systemqualität durch eine Erweiterung des Wissensmanagements (Walden, Roedler, Forsberg et al., 2017).

Nach der Definition des INCOSE – International Council on Systems Engineering umfasst MBSE „[...] die formalisierte Anwendung von Modellierung zur Unterstützung von System Anforderungs-, Design-, Analyse-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten, beginnend in der konzeptuellen Entwicklungsphase und fortfahrend über die Entwicklung und spätere Lebenszyklusphasen“ (INCOSE Technical Operations, 2007, S. 15). Ein wesentliches Merkmal des MBSE gegenüber traditionellen, textbasierten Entwicklungsansätzen ist die Verknüpfung von relevanten Informationen innerhalb der Modelle, um bspw. die Beziehung einer Anforderung zu deren Umsetzung in der Systemarchitektur zu modellieren und nachverfolgbar (*engl.* traceability) zu machen (vgl. Weilkiens (2006)). Hierdurch kann die Analyse von Änderungsauswirkungen, z.B. einer Anforderung, auf weitere Elemente, wie andere Anforderungen oder Elemente der Systemarchitektur, ermöglicht werden. Die Entwicklung von MBSE-Ansätzen und Umsetzung der Systemmodellierung wird von den sogenannten *drei Säulen des MBSE* (*engl.* three pillars of MBSE, Delligatti (2014, S. 4–9)) geleitet, die aufgrund starker Interdependenzen integriert zu betrachten sind:

- gewählte Modellierungssprache,
- gewählte Modellierungsmethode(n) sowie
- gewähltes Modellierungs-(Software-)Tool.

Bestehende MBSE-Ansätze greifen aus Gründen der Reproduzierbarkeit üblicherweise auf standardisierte Modellierungssprachen wie *UML* oder *SysML* zurück (Gausemeier, Gaukster & Tschirner, 2013). In der Praxis zeigt sich, dass das Erlernen von solchen Modellierungssprachen eine Einstiegshürde für die Produktentwickelnden darstellt, was sowohl Einführung als auch Nutzung von MBSE zunächst erschwert (Alt, 2019). MBSE ermöglicht dennoch grundsätzlich die Modellierung von Variationsanteilen im Sinne der PGE sowie eine effiziente Produktentwicklung in mehreren Generationen über spezifische MBSE-Methoden (Wäschle, Timucin, Radimersky et al., 2021).

Ausgewählte und im Rahmen dieser Forschungsarbeit relevante Beispiele des Modellierungstriplets bzw. der interdisziplinären Systemmodellierung werden im folgenden Abschnitt 2.1.4.2 vorgestellt.

2.1.4.2 Interdisziplinäre Systemmodellierung

In der *interdisziplinären Systemmodellierung* – als Bestandteil der MBSE – definiert die *Sprache* die Syntax der Modellierung. Die *Methoden* geben das Vorgehen zur Modellerstellung und -nutzung vor und die *Modellierungs-(Software-)Tools* oder Werkzeuge dienen der Durchführung und Verwaltung der Methoden (Matthiesen, Schmidt,

Moeser et al., 2014). Die interdisziplinäre Systemmodellierung bezweckt die Abbildung von Wissensbasis und Lösungsraum zur kompetenzübergreifenden Nutzung, um Zugänglichkeit und Verständnis aller beteiligten Fachdisziplinen und -akteure zu fördern. Dumitrescu, Bremer, Kühn et al. (2015) liefern einen Ansatz zur Erleichterung des Wissenstransfers zwischen den, an der Modellierung von Objekten, Prozessen und Systemen beteiligten, Akteuren und ermöglichen so einen modellbasierten Entwurf und eine modellbasierte Verifikation am Beispiel der Produktionssystementwicklung.

Zur Modellierung von Systemen können diverse Sprachstandards herangezogen werden, wie bspw. das „*Function Flow Block Diagram*“, die „*Structured Analysis and Design Technique*“ und die „*Integration Definition for Function Modeling*“ zu nennen (Ramos, Ferreira & Barceló, 2012). Die *SysML – Systems Modeling Language* gilt als eine der am weitesten verbreiteten Sprachen der interdisziplinären Systemmodellierung (Object Management Group [OMG], 2017; Walden, Roedler, Forsberg et al., 2017) und wird zur Beschreibung von System-Anforderungen, Systemstruktur, Systemverhalten und System-Parametrik genutzt (Delligatti, 2014). Die Visualisierung erfolgt dabei auf Basis von Diagrammen, die zur unmissverständlichen Kommunikation über Anforderungen, Ziele, Aktivitäten und Anwendungen zwischen den Stakeholdern beiträgt (OMG, 2017). Alle technischen Aspekte sowie der relevante Ausschnitt der logischen und funktionalen Systemarchitektur bis hin zu den zugrundeliegenden Anforderungen können in den Blockschaltbildern repräsentiert werden. Über sogenannte Profile bietet SysML die Möglichkeit, neue Sprachelemente als „*Stereotypen*“ zu definieren (Weilkiens, 2006). Nichtsdestotrotz wird SysML nur eine geringe Leistungsfähigkeit zugeschrieben, da sie die Potenziale des Systems Engineering für den Anwender nicht vollständig ausschöpfen kann (Munker, 2016), sondern die Modellierung teilweise unübersichtlich macht und erschwert (Eigner, Dickopf, Schulte et al., 2015). Albers, Stürmlinger, Mandel et al. (2019) identifizieren in einer Fallstudie Potentiale im Kontext des Designs im Rahmen der Industrie 4.0 und schlagen einen Ansatz zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklungs- und Produktionsprozessen vor. Ferner entwickeln Mandel, Behrendt & Albers (2021) im Kontext des MBSE eine nutzer- und aufgabengerechte Unterstützung der Modellierungsaktivitäten des Produktentwickelnden. Weiterführende Beispiele zur Spezifikationstechnik (bspw. CONSENS-Methode) oder Modellierungs- bzw. Architekturframeworks (z.B. RFLP-Vorgehensmodell) finden sich in Anhang A.1.4.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Sprache und Methoden der interdisziplinären Systemmodellierung im MBSE grundsätzlich unabhängig voneinander oder einem spezifischen Software-Tool definiert und genutzt werden können. Zur Ausschöpfung aller Potenziale des MBSE (vor allem hinsichtlich Rückverfolgbarkeit) bietet sich jedoch die integrierte Betrachtung und Entwicklung der drei Säulen des MBSE an.

2.1.5 Zwischenfazit: Schlüsselfaktoren

Der Stand der Forschung in Abschnitt 2.1 hat aufgezeigt, dass ein *Denken in Systemen* unerlässlich ist, um die komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten der interdisziplinären Produktentstehung zu beherrschen. Die *Schlüsselfaktoren* der kognitiven Auffassung durch Produktentwickelnde finden in der KaSPro Ausdruck in einem *systemischen Produkt- und Prozessverständnis* – ergänzt um die *Nutzung formalisierter Modelle* (bspw. C&C²-A und iPeM). Der Mensch wird in Prozessmodellen als handelnder Akteur aufgefasst und bedingt die *aktivitätsbasierte Dynamik der Produktentwicklung*. Mittels Aktivitäten des Konkretisierens und Abstrahierens lassen sich verschiedene *lösungs offene und -spezifische Systemelemente* in Produktmodellen verknüpfen. Zur systematischen Handhabung der Entwicklungskomplexität lassen sich Systeme hierarchisch und/oder struktural ordnen und ü.a. über die Aktivitäten des Zusammenfügens und Zerlegens Systemebenen-übergreifend spezifizieren. Das *Funktionsverständnis* in den erörterten Produkt- und Prozessmodellen fokussiert sich insbesondere auf sogenannte *technische Funktionen*, die sich aus *Produktentwickelnden-Sicht* als Wirkbeziehung zwischen Stoff-, Energie- und Informationsflüsse beschrieben lassen. Ein *Schlüsselfaktor* des verstärkten Systemdenkens in der Produktentstehung liegt folglich in der *Synthese des Verständnisses von Funktionen des Gesamtproduktes*, die *Kunden-, Anwender- und Anbietersicht* in den Betrachtungsfokus rücken. Die logische Konsequenz daraus ist *prozessuale Entwicklungsunterstützung* beim *Spezifizieren solcher Funktionen*, die – analog der Baukastenentwicklung (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) physischer Elemente – Produktportfolio-übergreifend eingesetzt werden sollten.

2.2 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers

Innovationen wird sowohl in Unternehmen als auch in der Gesellschaft ein wesentlicher Wert beigemessen. In Abschnitt 2.2.1 wird daher zunächst das Innovationsverständnis herausgearbeitet und unterschiedliche Innovationstypen kategorisiert. Daran anschließend wird das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS in Abschnitt 2.2.2 motiviert und anhand der zu Grunde liegenden Modellhypothesen beschrieben (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Daraufaufgehend wird das Referenzsystem (vgl. Abschnitt 2.2.3) und Entwicklungs generationen (vgl. Abschnitt 2.2.4) im Modell der PGE erklärt. Methoden und Prozesse auf Grundlage des Modells der PGE dienen der zielgerichteten Planung, Durchführung und Steuerung notwendiger Entwicklungsaktivitäten zur systematischen Steigerung des Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens. Die (initiale) Zielsystembildung in der Frühen Phase im Modell der PGE wird in Abschnitt 2.2.5 abgegrenzt und deren Charakteristika beschrieben.

2.2.1 Innovationsverständnis und Produktprofil

Das Verständnis von *Innovationen* ist in der Fachliteratur eng mit der Nutzenstiftung für eine Kunden- und Anwendergruppe bzw. dem Erfüllen oder sogar dem Übertreffen deren Anforderungen sowie Bedürfnissen verbunden (Albers, Heimicke, Hirschter et al., 2018). In seiner heutigen Prägung geht der Innovationsbegriff auf Schumpeter (1939) zurück, der erfolgreich am Markt eingeführte *Inventionen* (bzw. Erfindungen) als Innovationen versteht. Voraussetzung der Entwicklung und insbesondere Etablierung innovativer Produkte ist somit die Berücksichtigung aller relevanten Kunden- und Anwenderbedürfnisse im Zielsystem, um als Unternehmen nachhaltig erfolgreich zu agieren (vgl. z.B. Souder & Chakrabarti (1978), Johné & Snelson (1988) und Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018)). Nicht zu vernachlässigen ist an dieser Stelle ebenso der weitreichende Einfluss auf unternehmensinterne Strukturen und Prozesse. Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018) greifen das Innovationsverständnis nach Schumpeter (1939) auf und folgern weiter, dass neben einer *Invention* und deren *Diffusion* (i.S.v. Marktdurchdringung) gleichermaßen die initiale Identifizierung einer Bedürfnissituation in Form eines weitgehend *lösungsoffenen Produktprofils* sowie die *zielgerichtete Markteinführung* bedeutend sind (vgl. Abbildung 2.23). Die Neuheit eines Produkts lässt sich demnach nicht mit Produkterfolg gleichsetzen.

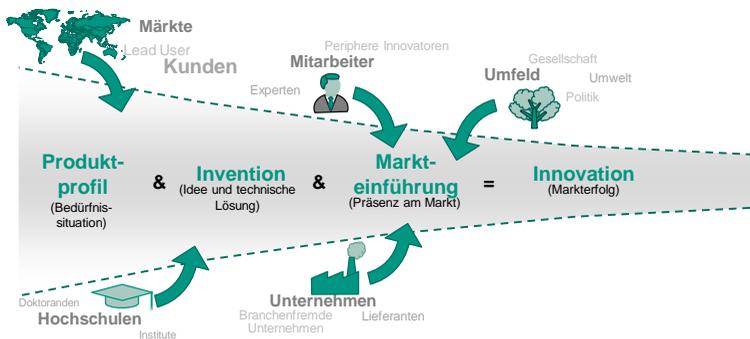


Abbildung 2.23: Innovationsverständnis nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018, S. 2) und Albers, Heimicke, Walter et al. (2018)

Das Innovationspotenzial wird durch eine strukturierte Beschreibung der Bedürfnissituation nachhaltig gesteigert, dazu zählt ebenso die frühzeitige Sicherstellung des Anbieternutzen. Das *Nutzenbündel* aus *Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen* wird im *Produktprofil* (vgl. Definition 2) systematisiert und bezweckt in seiner Schlüsselrolle die strukturierten Modellierung in der Zielsystembildung (Albers, Gladysz, Heitger et al., 2016; Albers, Heimicke, Walter et al., 2018).

Definition 2: Produktprofil nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018, S. 3–4)

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.

Eine der zentralen Aktivitäten zu Beginn eines Produktentwicklungsprojekts stellt somit das Finden von (alternativen) Produktprofilen dar. Ein Produktprofil spannt den Lösungsraum für ein Produktentwicklungsprojekt auf, gibt jedoch nicht die konkrete technische Lösung vor. Die Modellierung des angestrebten Nutzenbündels geschieht zwar *lösungs offen*, bezieht dennoch Eingrenzungen des Lösungsraums durch vorhandene und zu berücksichtigende, technische Lösungen (bspw. unternehmensinterne Produktbaukästen) in die Betrachtung ein. (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018)

Produktprofile lassen sich aufgrund des initial lösungs offenen Charakters bereits sehr früh bzw. als Ausgangspunkt im Produktentwicklungsprozess entwickeln, da sie nicht auf die vollständige Beschreibung der finalen technischen Lösung abzielen. Nichtsdestotrotz zieht sich die Relevanz von Produktprofilen durch die gesamte Projektlaufzeit, da sie den angestrebten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen einer *kontinuierlichen Validierung* (vgl. Abschnitt 2.3.3.2) zugänglich machen. Das Produktprofil fungiert hierbei als Grundlage zur Validierung erster Generationen von Ergebnissen und generierten Artefakten (vgl. Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE in Abschnitt 2.2.4). Dazu zählen bspw. virtuelle Prototypen, Designskizzen oder gar das technische Endresultat. Darüber hinaus betonen Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) die Bedeutung der Validierung des Produktprofils selbst. Die fundierte Absicherung der tatsächlichen Validität des postulierten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens des zukünftigen Produkts ist wesentlich, um das richtige und ggf. innovative Produkt zu entwickeln. Aus diesem Grund werden in der Entwicklungspraxis häufig mehrere alternative Produktprofile zu Projektbeginn entwickelt und unter Einbeziehung repräsentativ ausgewählter Stakeholder (u.a. Kunden und Anwender) gegeneinander bewertet und priorisiert. Produktprofile können sich zudem über den gesamten Lebenszyklus mehrere Generationen eines Produktes, einer Technologie oder sogar Branche hinweg verändern und weiterentwickeln. Ein prägnantes Beispiel dafür ist in Abbildung 2.24 (Albers, 2020) veranschaulicht. (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018)

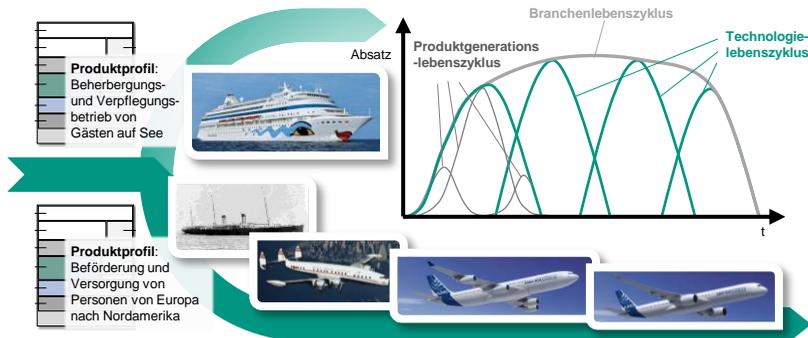


Abbildung 2.24: Historisches Beispiel der Veränderung und Weiterentwicklung von Produktprofilen nach Albers (2020, S. 16) und Albers, Heimicke, Walter et al. (2018)

Zur Zeit der europäischen Auswanderungen bis Beginn des 20. Jahrhunderts erfüllten große Überseepassagierschiffe das Nutzenbündel des Produktprofils einer „*Beförderung und Versorgung von Personen von Europa nach Nordamerika*“. Mit der Zeit wurde dieses Produktprofil zum Transport von Passagieren über den Atlantik jedoch weitestgehend von Langstreckenflugzeugen übernommen. Nichtsdestotrotz fanden spätere Generationen von Passagierschiffen und deren inhärente Technologien wieder Anwendung in der Erfüllung eines veränderten Produktprofils in den sogenannten Kreuzfahrten – „*Beherbergungs- und Verpflegungsbetrieb von Gästen auf See*“ (vgl. Abbildung 2.24). (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018; Albers, 2020)

Zur durchgängigen Berücksichtigung der Kunden- und Anwendersicht in der Produktentwicklung sollten die Entwicklungsaktivitäten am Produktprofil ausgerichtet werden, das zunächst das Explizieren des Produktprofils erfordert. Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) beschreiben mit dem sogenannten *Product Profile Scheme* einen Ansatz für ein expliziertes Produktprofil. Ein modular aufgebauter Steckbrief beschreibt das zukünftige Produkt, seinen angestrebten Nutzen sowie bekannte Einschränkungen und Randbedingungen für die Produktentwicklung entlang von zwölf Modulen. Das Product Profile Scheme eignet sich hervorragend, die angestrebten Kerninhalte des Produkts an eine Vielzahl von Interessensgruppen transparent zu kommunizieren und unterstützt somit eine *frühzeitige, interdisziplinäre Zielsystembildung*. (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018)

Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten besonders zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses, aber auch wegen der stichhaltigen Repräsentation des Innovationsgehalts eines Produktes, ist das Produktprofil ein Erfolgsfaktor im *Modell der*

PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (vgl. Abschnitt 2.2.2). Das Innovationspotential und die technische Realisierung lassen sich bestmöglich kombiniert und strukturiert gegeneinander abwägen. In der Frühen Phase im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 2.2.5) können einerseits Zielkonflikte sowie andererseits Chancen und Risiken systematisch herausgearbeitet werden, um daraus wiederum Aktivitäten der Produktentwicklung abzuleiten. Das Produktprofil beschreibt nicht zuletzt die relevanten, zugrundeliegenden Referenzen (vgl. Abschnitt 2.2.3), die einerseits zu differenzierten, lösungsoffenen Beschreibung eines Produktes herangezogen werden sollen, aber gleichzeitig als Basis der technischen Realisierung fungieren. (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018)

Zusätzlich zu den beschriebenen *Produktinnovationen*, die sich im Produktprofil explizieren lassen, beschreibt die Literatur ebenso *Prozessinnovationen* (Utterback & Abernathy, 1975), die ebenfalls in spezifischen Profilen modelliert werden können. Die Optimierung bestehender, prozessualer Abläufe im Unternehmen, bspw. zur Reduzierung von Kosten, Verkaufspreisen oder Durchlaufzeiten, kann ebenso bei Prozessinnovationen in einer Steigerung des Nutzens aus Kunden- Anwender- und Anbietersicht münden (Hauschildt, Salomo, Schultz et al., 2016). In Praxis und Wissenschaft können Innovationen zudem in Bezug zur Herkunft der Idee zwischen *Technology Push* (Ursprung Forschung und Entwicklung) und *Market Pull* (Ursprung Markt) differenziert werden (Disselkamp, 2012). Weite Verbreitung genießt die Klassifizierung von Innovationen anhand des Neuigkeits- oder Veränderungsgrad der technischen Lösung (Dewar & Dutton, 1986; Ettlé, Bridges & O'Keefe, 1984; Johannesen, Olsen & Lumpkin, 2001). Henderson & Clark (1990) differenzieren dazu folgende vier *Innovationsarten*:

- *Inkrementelle Innovationen* weisen geringfügige Änderungen der Subsysteme und deren Wechselwirkungen auf. Aufgrund dieser geringfügigen Anpassungen sind inkrementelle Innovationen gut planbar. Dies spiegelt sich somit in einem geringen technischen und ökonomischen Risiko wider, aber sie weisen ebenso ein niedriges Innovationspotential auf.
- *Architekturelle Innovationen* zeichnen sich durch eine Neuordnung bekannter und etablierter Funktionseinheiten²⁴ aus. Aufgrund der Verwendung bestehender Ansätze sind sowohl ökonomisches als auch technisches Risiko moderat, bei gleichzeitigen Potentialen im Innovationsgehalt.
- *Modulare Innovationen* entstehen durch den Austausch von Subsystemen in einer bestehenden Systemstruktur. In diesem Fall steigen Risiko und Potential gleichermaßen mit dem Grad des Austauschs der Subsysteme.

²⁴ *Funktionseinheiten* werden nach Henderson & Clark (1990) als für die Funktionserfüllung relevante Komponenten sowie deren Wechselwirkungen verstanden.

- *Radikale Innovationen* weisen sowohl eine neue Systemarchitektur als auch neu verwendete Subsysteme auf, deren Entwicklungsprozesse tendenziell riskanter sind. Die radikale Innovation besitzt jedoch das höchste Innovationspotential, da neuen Ansätze die Wahrscheinlichkeit zur Schaffung von Alleinstellungsmerkmalen am Markt erhöhen.

Des Weiteren beschreibt Danneels (2004, S. 249) *disruptive Innovationen* als Innovation, welche „die Grundlagen des Wettbewerbs verändert, indem sie die produktbezogenen Leistungsmerkmale, entlang derer Unternehmen konkurrieren, verändert [und bestehende Geschäftsfelder zerstört]“. Die Dimensionen der (disruptiven) Innovation können sich hierbei auf *Produkt* (technisches System und/oder Service/Dienstleistung und/oder Geschäftsmodell), *Markt*, *Technologie*, *Organisation* und *Umwelt* beziehen (Danneels, 2004; Gausemeier, Dumitrescu, Echterfeld et al., 2019). Der Entwicklungsprozess trägt wesentlich dazu bei, das Innovationspotential zu steigern, die letztendliche Bestätigung einer Innovation lässt sich jedoch erst nach der Markteinführung durch den Kunden- oder Anwender bewerten. Zudem müssen aus Anbietersicht ökonomischer Erfolg und der Ressourceneinsatz über einen längeren Zeitraum bzw. über mehrere Generationen eines Produkts betrachtet und beurteilt werden (Albers, 1991).

Nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015) kann die Klassifizierung in inkrementelle, architekturelle, modulare und radikale Innovationen (vgl. Henderson & Clark (1990)) jedoch nur *retrospektiv* erfolgen. Zudem lässt sich bspw. nicht generell schlussfolgern, dass inkrementelle Innovationen zwangsläufig ein niedriges Innovationspotential aufweisen und vice versa radikale Innovationen in jeder Situation das höchste Innovationspotential für eine bestimmte Bedürfnissituation bieten. In diesem Zusammenhang wird technische Neuheit oftmals fälschlicherweise mit Markterfolg gleichgesetzt. Nach Albers & Gausemeier (2012, S. 17) ist allerdings „eine vorausschauende und systemorientierte Produktentstehung“ die „Basis für den Innovationserfolg“ in der Zukunft. Produkte werden daher nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015) erst über diverse Variationen in sogenannten *Produktgenerationen* (vgl. Abschnitt 2.2.2) wirtschaftlich und technisch derartig entwickelt, sodass eine erfolgreiche Etablierung am Markt möglich ist (Bursac, 2016). Zur Abschätzung des Innovationspotentials sowohl während der Entwicklung eines Produkts als auch zur Bewertung²⁵ einer Produktgeneration nach der Markteinführung, wird in der Praxis das *Kano-Modell* (vgl. Abbildung 2.25) genutzt (Bailom, Hinterhuber, Matzler et al., 1996; Kano, Seraku, Takahashi et al., 1984).

²⁵ Die *Bewertung* beschreibt nach Albers, Matros, Behrendt et al. (2015, S. 77) „eine Aktivität zur Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht“ und erfolgt überwiegend subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen bzw. analysiert teils objektivierte Zahlenwerten.

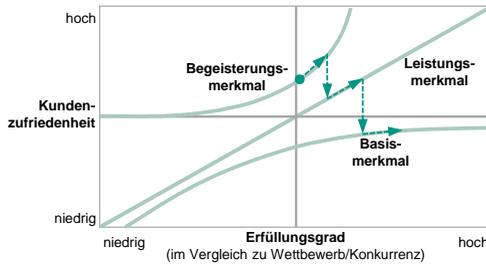


Abbildung 2.25: Kano-Modell nach Kano, Seraku, Takahashi et al. (1984) und Bailom, Hinterhuber, Matzler et al. (1996, S. 118) – Darstellung nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 3)

Das Kano-Modell beschreibt die Korrelation zwischen dem *Erfüllungsgrad von Anforderungen* durch das angebotene Nutzenbündel (im Vergleich zum Wettbewerb) und der jeweiligen Auswirkung auf den *Grad der Kundenzufriedenheit* (Kano, Seraku, Takahashi et al., 1984). Produkte weisen demnach, abgeleitet aus den gleichnamigen Qualitäten, sogenannte *Basis-, Leistungs- und Begeisterungsmerkmale*²⁶ auf, die als der Erfüllungsgrad der Eigenschaften eines Produkts verstanden werden. Basismerkmale werden von Kunden als selbstverständlich vorausgesetzt und führen bei Erfüllung zu keiner Zufriedenheit, aber bei Nichterfüllung zu einer starken Unzufriedenheit. Leistungsmerkmale kennzeichnen sich durch einen linearen Zusammenhang zwischen Erfüllungsgrad und hervorgerufener Zufriedenheit. Ein Produkt weist Begeisterungsmerkmale auf, wenn Kunden diese nicht erwarten. Eine Nichterfüllung führt dementsprechend zu keiner Unzufriedenheit, die Erfüllung ruft jedoch überproportionale Kundenzufriedenheit hervor. Die Begeisterungsmerkmale eines Produktes degradieren über mehrere Produktgenerationen hinweg zu Leistungs- und schließlich Basismerkmalen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Bailom, Hinterhuber, Matzler et al., 1996). Die Merkmale eines Produktes sind daher nicht statisch zu betrachten, sondern verändern sich vielmehr nach der Markteinführung über die Zeit. Diese Beobachtung findet sich in dem auf Grundlage von Wesner (1977) entwickelten Modellen der Lebenszyklen von Technologie, Branchen und Produktgenerationen nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015). Vor diesem Hintergrund müssen Anbieter durch gezielte, kontinuierliche Differenzierung auf Basis von Leistungs- und Begeisterungsmerkmalen das Innovationspotenzial neuer Produktgenerationen ausschöpfen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Bailom, Hinterhuber, Matzler et al., 1996).

²⁶ Anmerkung: An dieser Stelle sind nach dem Verständnis von Weber & Werner (2001) tendenziell eher Basis-, Leistungs- und Begeisterungseigenschaften anzuführen, die anhand von Merkmalen realisiert werden und durch den Produktentwickelnden direkt beeinflussbar sind (vgl. Abschnitt 2.1.1.4).

2.2.2 Grundlagen des Modells der PGE

Die beschriebene Klassifizierung von Innovationen anhand des Neuigkeits- oder Veränderungsgrads der technischen Lösung ist eng mit Betrachtungen der klassischen Konstruktionsmethodik verbunden. Im Grundsatz lassen sich hier *korrigierende* und *generierende Vorgehen* differenzieren. Die Übernahme von bestehenden Lösungsprinzipien mit geringfügigen Anpassungen zeichnet die korrigierende Konstruktion aus. Generierenden Vorgehen werden durch einen Abstraktions- und anschließenden Konkretisierungsprozess bestimmt, um mehrere neue Lösungen zu erschließen und daraus die Vielversprechendste auszuwählen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Mit Blick auf die konkrete Entwicklungsaufgabe unterscheiden Pahl, Beitz, Feldhusen et al. (2007) in der *klassischen Konstruktionsmethodik* drei Konstruktionstypen:

- Die *Neukonstruktion* zeichnet sich durch die Verwendung neuartiger, technischer Lösungsprinzipien oder die erstmalige Kombination bekannter Lösungsprinzipien in einem neuen Kontext aus.
- Die *Anpassungskonstruktion* lässt sich durch die Verwendung bekannter und bewährter Lösungsprinzipien in einem neuen Kontext beschreiben. Die Gestalt des technischen Systems wird hierbei an veränderte Randbedingungen angepasst und kann je nach Komplexitätsgrad partielle Neukonstruktionen miteinschließen.
- Die *Variantenkonstruktion* bezieht sich auf die Verwendung bekannter Lösungsprinzipien in ihrem originären Kontext, begleitet von der Variation einzelner Gestaltparameter des technischen Systems (bspw. Größe oder Anordnung von (Sub-)Systemen).

In der Entwicklungspraxis lassen sich die drei beschriebenen Konstruktionstypen jedoch nicht eindeutig und trennscharf an einem technischen System feststellen (Pahl, Beitz, Feldhusen et al., 2007). Neukonstruktionen²⁷ kommen in der industriellen Praxis der Produktentwicklung nur sehr selten vor und stehen ferner im Widerspruch zu der Zielsetzung, das Nutzenbündel eines Produkts anhand möglichst geringfügigen Anpassungen risikominimal umzusetzen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Deubzer & Lindemann, 2009; Eckert, Alink & Albers, 2010). Stattdessen entstehen nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 2) „*die meisten Produkte [...] durch Modifikationen, wobei insbesondere bei komplexen Produkten zuverlässige [Funktionen] und [Subsysteme] soweit wie möglich übernommen werden, um den technischen Neuheitsgrad*

²⁷ Anmerkung: Reine Neukonstruktionen existieren in der Realität jedoch nicht, da hierbei ebenso auf Lösungsprinzipien von Referenzen bei der Entwicklung eines Produkts zurückgegriffen wird. Die Klassifizierung der Konstruktionstypen ist zudem immer vom jeweiligen Handlungssystem des betrachteten Unternehmens abhängig. Albers, Bursac & Wintergerst (2015).

[...] zu reduzieren“. Dies bezweckt weiterhin eine Reduzierung potenzieller Risiken und erforderlicher Investitionen, bspw. im Produktionssystem (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Eckert, Alink & Albers, 2010). Die praktische Anwendung des Verständnisses der klassischen Konstruktionsmethodik zeigt, dass eine Bestimmung des Konstruktionstyps auf nur einer Systemebene (bspw. in Bezug zum Gesamtprodukt) nicht zielführend und aussagekräftig ist. Der Neuigkeitsgrad eines technischen Systems setzt sich vielmehr mittels der verwendeten Subsysteme zusammen (vgl. Systemtheorie der Technik in Abschnitt 2.1.1.2). In diesem Zusammenhang ergibt sich augenscheinlich ein *Zielkonflikt* zwischen der *Verwendung bestehender, technischer Lösungen* (aufgrund Risiko- und Investitionsreduzierung) und der Bestrebung nach möglichst *weitreichenden Innovationen* (Albers, Reiß, Bursac et al., 2014). Aus diesem Grund führen Albers, Bursac & Wintergerst (2015) mit dem *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS ein praxisnahes, wissenschaftlich begründetes Erklärungsmodell zur Auflösung dieses Zielkonflikts in der Produktentwicklung ein. Albers, Bursac & Wintergerst (2015) definieren die Produktgenerationsentwicklung wie folgt (vgl. Definition 3):

Definition 3: Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 4)

Als **Produktgenerationsentwicklung** wird die Entwicklung technischer Produkte verstanden, die sowohl durch die Anpassung von [Subsystemen] als *Übernahmevariation* (ÜV) als auch durch eine Neuentwicklung von [Subsystemen] charakterisiert ist. Darin eingeschlossen sind sowohl die Entwicklung einer neuen Produktgeneration als auch deren [...] Varianten. Die Anteile technischer Neuentwicklungen einzelner Funktionseinheiten können sowohl durch die Aktivität *Gestaltvariation* (GV) als auch durch die Variation von Lösungsprinzipien – im Folgenden als Aktivität *Prinzipvariation* (PV) bezeichnet – erfolgen. Neue Produktgenerationen basieren immer auf [*Referenzen*], die große Bereiche der grundsätzlichen Struktur vorgeben.

Das Modell der PGE fußt nach der Definition dabei auf zwei grundlegenden Hypothesen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019):

- Die Entwicklung einer neuen Produktgeneration basiert immer auf verschiedenen *Referenzen* (bspw. Vorgängergeneration, Wettbewerbsprodukte, etc.), die zusammen das sogenannte *Referenzsystem* (vgl. Abschnitt 2.2.3) bilden, und grundlegende Struktur und Gestalt eines neuen Systems vorgeben.
- Die Entwicklung von Subsystemen im Modell der PGE kann durch die systematische Kombination der drei Aktivitäten von *Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation* auf Basis des Referenzsystems abgebildet werden.

In Bezug zur zweiten Hypothese weisen Albers, Bursac & Wintergerst (2015) darauf hin, dass Gestaltvariationen in der Entwicklungspraxis die am häufigsten durchgeführte Aktivität darstellen und – entgegen der verbreiteten Annahme der klassischen Konstruktionsmethodik – ein hochgradig komplexer und kreativer Vorgang ist (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019). Die drei Variationsarten im Modell der PGE werden nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015) wie folgt voneinander abgegrenzt:

- Eine **Übernahmevariation** (ÜV) ist eine Aktivität zur Entwicklung eines mechatronischen Subsystems einer neuen Produktgeneration, bei der das *zugrundeliegende Lösungsprinzip*, die *WFP und LSS* sowie *deren Verknüpfungen* in die neue Produktgeneration übernommen wird und *Anpassungen* entsprechend den Anforderungen der Systemintegration und den Randbedingungen *nur an den Connectoren* zu anderen Subsystemen vorgenommen werden.
- Eine **Gestaltvariation** (GV) ist eine Aktivität zur Entwicklung eines mechatronischen Subsystems einer neuen Produktgeneration, bei der *ausgehend vom zugrundeliegenden Lösungsprinzip* die *WFP und LSS* und *deren Verknüpfungen* *beibehalten* werden, aber *mindestens teilweise in ihrer Gestalt variiert* werden.
- Eine **Prinzipvariation** (PV) ist eine Aktivität zur Entwicklung eines mechatronischen Subsystems einer neuen Produktgeneration, bei der *ein neues Lösungsprinzip* durch *Entfernen oder Hinzufügen von WFP und LSS* und/oder *deren Verknüpfungen gegenüber der Referenz* realisiert wird.

In Anbetracht der Nutzbarmachung und erleichterten Verwendung in der Entwicklungspraxis wird von Albers, Bursac & Wintergerst (2015) eine einheitliche mathematische Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von Produktgenerationen im Modell der PGE eingeführt (vgl. Formel 1):

$$\begin{array}{l} \text{Produktgeneration } G_i \\ \text{für Generationen } i \in \mathbb{N} \end{array} \quad 1$$

Die Produktgeneration G_1 bezeichnet dabei die erste Produktgeneration ohne direkten Vorgänger, G_n diejenige Produktgeneration, die sich aktuell in der Entwicklung befindet und als nächstes in den Markt eingeführt wird. Folglich bezeichnet G_{n-1} die aktuell im Markt befindliche Produktgeneration. (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015)

Eine neue Produktgeneration G_n setzt sich weiterhin basierend auf der zweiten Hypothese im Modell der PGE aus der vereinigten Menge von Subsystemen, die durch die drei Variationsarten entwickelt werden, zusammen (vgl. Formel 2).

$$G_n = \dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n \quad 2$$

mit

G_n : Produktgeneration G in der Entwicklung, die als nächstes in den Markt eingeführt wird (heutiger Zeitpunkt).

$\dot{U}S_n$: Menge der Subsysteme von Produktgeneration G_n , die durch Übernahmevariation (ÜV) entwickelt werden.

GS_n : Menge der Subsysteme von Produktgeneration G_n , die durch Gestaltvariation (GV) entwickelt werden.

PS_n : Menge der Subsysteme von Produktgeneration G_n , die durch Prinzipvariation (PV) entwickelt werden.

Mit den nachfolgenden Formeln 3, 4 und 5 können darüber hinaus jeweils die *Variationsanteile* einer neuen Produktgeneration G_n bestimmt werden. Dies geschieht über ein Abzählen der Elementmengen jener Subsysteme, die durch eine bestimmte Variationsart entwickelt werden, in Bezug zu der Gesamtmenge an Subsystemen einer Produktgeneration G_n in der Entwicklung.

$$\delta_{\dot{U}S_n} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|G_n|} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 3$$

$$\delta_{GS_n} = \frac{|GS_n|}{|G_n|} = \frac{|GS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 4$$

$$\delta_{PS_n} = \frac{|PS_n|}{|G_n|} = \frac{|PS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad 5$$

Anhand zahlreicher Beispiele wie die Generationen des Zweimassenschwungrads von Schaeffler, ICE-Züge der Deutschen Bahn, PKW der Marken BMW und Mercedes oder Produkte der Heidelberger Druckmaschinen belegen Albers, Bursac & Rapp (2017) die Relevanz des Modells der PGE in der Produktentwicklungspraxis.

2.2.3 Referenzsystem im Modell der PGE

Die Entwicklung einer neuen Produktgeneration beruht in Bezug zur ersten Hypothese im Modell der PGE nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015) immer auf *Referenzen* (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019). Die einzelnen (Modell-)Elemente, die in der Entwicklung einer Produktgeneration als Referenz dienen, spannen ein *Referenzsystem im Modell der PGE* auf, das analog der Produktgeneration über Formel 6 mathematisch beschrieben werden kann (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019):

Referenzsystem R_i

6

für Generationen $i \in \mathbb{N}$

Als inhärente *Referenzsystem-Elemente* (RSE) kommen insbesondere technische Systemelemente sowie verschiedenste Artefakte infrage, wie etwa Patente, gesetzliche Vorgaben, Produktprofile oder Technologien. Weiterhin können ebenso Elemente eines sozio-technischen Systems oder Geschäftsmodell oder aus Sicht der Produktions-, Strategie- oder Validierungssystem als RSE herangezogen werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob das zugrundeliegende Element des RSE bereits im Markt eingeführt oder sich noch in der Forschung bzw. Vorentwicklung befindet. Albers, Rapp, Heitger et al. (2018) differenzieren grundsätzlich *interne*, aus demselben Unternehmen stammende, und *externe*, außerhalb der Organisation entspringende, *Elemente des Referenzsystems*. Einen zentralen Anteil der RSE bilden sogenannte *Referenzprodukte* oder eben deren einzeln, betrachteten Subsysteme (Albers, Rapp, Heitger et al., 2018). Unter dem Begriff Referenzprodukt werden bestehende Produkte, wie Vorgänger- oder Wettbewerbs-Produktgenerationen verstanden. (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019).

Lösungsspezifische Referenzprodukte können einerseits die Basis für die technische Lösungsfindung darstellen, indem etwa Bestandteile der Bau- oder Funktionsstruktur variiert werden. Darüber hinaus sind ebenso zugehörigen Erfahrungen, Projektdokumente, Testergebnisse, Projektstrukturen, Validierungsergebnisse, etc. als RSE modellierbar (Albers, Haug, Heitger et al., 2016; Albers, Heitger, Haug et al., 2018). Andererseits können Referenzprodukte ebenso in der Zielsystembildung eingesetzt werden, um Ziele und Anforderungen einer Produktgeneration relativ zum Referenzprodukt zu formulieren. Solche *lösungsoffenen Referenzprodukte* werden oftmals zu der Beschreibung einer angestrebten Differenzierung von Wettbewerbsprodukten oder der Abgrenzung von Vorgänger-Produktgenerationen genutzt. (Albers, Haug, Heitger et al., 2016; Heitger, 2019)

Das Handlungssystem (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) überführt die RSE des Referenzsystems R_i systematisch durch die Aktivitäten der Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation in das Objektsystem der Produktgeneration G_i , wobei ebenso explizit ausgeschlossene RSE inkl. der Begründung im Referenzsystem modelliert sind. Ein Referenzsystem R_i lässt sich daher eindeutig einer spezifischen Produktgeneration G_i zuordnen. (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019)

Wechselbeziehungen, die bspw. zwischen den Subsystemen Batteriezeile und der Karosserie einer automobilen Produktgeneration existieren, sind im Referenzsystem modelliert und bilden die Grundlage der Entwicklungsaktivitäten (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019). Über den Variationsoperator im Modell der PGE lassen sich die diversen Subsysteme mit den Variationsarten (ÜV, GV, PV) in der neuen Produktgeneration G_n abbilden und deren Auswirkungen auf weitere Subsysteme und im Gesamtsystem analysieren. In der Frühen Phase im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 2.2.5) können zwischen den einzelnen RSE im Referenzsystemen noch Inkompatibilitäten vorhanden sein, die durch iterative Analyse- und Syntheseschritte aufgelöst werden. Nichtsdestotrotz werden im Referenzsystem gleichermaßen solche Wechselbeziehungen dargestellt, die den Produktentwickelnden zum Lösen einer Problemstellung befähigen. Das Referenzsystem ist zudem keinesfalls statisch, sondern wird über neu gewonnene Erkenntnisse und Wissen vielmehr entlang des Entwicklungsprozesses kontinuierlich über Analyse- und Syntheseschritte erweitert. (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019).

In der automobilen Produktentwicklung fußt die Entwicklung einer neuen Produktgeneration häufig auf einem *Basis-Referenzprodukt*, dessen Struktur (Produktarchitektur) sowie Subsysteme zu großen Teilen den Ausgangspunkt im Referenzsystem für die gezielte Variation einzelner Subsysteme darstellt (Peglow, Powelske, Birk et al., 2017; Peglow, 2021). Darüber hinaus werden oftmals mehrere Produktgenerationen einer *Produktlinie*²⁸ (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) parallel entwickelt, weshalb ebenso mehrere Referenzsysteme einer Produktlinie gleichzeitig existieren können.

2.2.4 Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE

Die Phänomene, die durch das Modell der PGE beschrieben werden, lassen sich nicht ausschließlich in der Beziehung von bestehenden Systemen und einem in der

²⁸ Eine *Produktlinie* ist eine Gruppe technischer Produkte des Produktportfolios, die jeweils eine zusammenhängende Menge von konsekutiven Produktgenerationen beschreibt. Produktgenerationen innerhalb einer Produktlinie können sich auf den gleichen Produkttyp beziehen, an den gleichen Kunden-/Anwendertypus gerichtet sein bzw. über ähnliche Absatzkanäle vertrieben werden oder sich alle innerhalb einer bestimmten Preisspanne bewegen (siehe Definition 10 in Abschnitt D.1.4).

Entwicklung befindlichen System beobachten. Stattdessen lässt sich ebenso die Relation zwischen aufeinanderfolgenden Entwicklungsincrementen, den sogenannten *Entwicklungsgenerationen*, innerhalb der Entwicklung eines Systems im Modell der PGE beschreiben (Albers, Bursac & Rapp, 2016).

Entwicklungsgenerationen lassen sich in Anlehnung an Produktgenerationen über folgende Formel 7, abgeleitet aus der bestehenden Nomenklatur im Modell der PGE, beschreiben (Albers, Haug, Heitger et al., 2019; Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020):

$$\begin{array}{l} \text{Entwicklungsgeneration } E_{i,j} \qquad \qquad \qquad 7 \\ \text{für Generationen } i, j \in \mathbb{N} \end{array}$$

Die Generation $i \in \mathbb{N}$ in der mathematischen Beschreibung einer Entwicklungsgeneration gibt hierbei immer die übergeordnete Produktgeneration, auf die sie sich bezieht, an. Die Generation $j \in \mathbb{N}$ bezeichnet anknüpfend jeweils die fortlaufende Entwicklungsgeneration. Analog der Produktgeneration gibt $j = 1$ die erste Entwicklungsgeneration ohne Vorgänger und $j = n$ die aktuelle Entwicklungsgeneration in der Entwicklung an, die als nächstes bewertet werden kann. (Albers, Haug, Heitger et al., 2019; Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE basieren immer auf einem Referenzsystem, das sich aus internen und/oder externen Referenzsystem-Elementen (RSE) zusammensetzt und demnach durch die drei Variationsarten (ÜV, GV, PV) abgebildet wird (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Bursac, 2016). Die Entwicklungsgenerationen bezwecken eine Strukturierung der Entwicklung einer Produktgeneration und schließen jeweils mit einem Meilenstein ab. Nach Ebel (2015) charakterisiert ein Meilenstein einen bestimmten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess, zu dem der Projektfortschritt anhand Indikatoren explizit zu überprüfen ist. Darüber hinaus existieren definierte Soll-Werte für ebendiese Indikatoren. Sofern eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Indikatoren festgestellt wird, müssen Maßnahmen abgeleitet werden. Der Reifegrad einer Produktgeneration (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) lässt sich anhand von Entwicklungsgenerationen durch subjektiv und zum Teil objektiv abgrenzbare Bewertungsergebnisse differenzieren. (Albers, Haug, Heitger et al., 2019)

Entwicklungsgenerationen lassen sich mittels des iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) auf Grundlage des erweiterten ZHO-Modells (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) modellieren und sind *fraktal* auf verschiedenen Systemebenen (z.B. Supersystem, Gesamtsystem oder dessen Subsystem-Ebenen) anwendbar. Des Weiteren lässt sich ebenso das Verständnis des Referenzsystems (vgl. Abschnitt 2.2.3)

auf Entwicklungsgenerationen übertragen, sodass ebendiesen ein bestimmten Reifegrad eines Referenzsystems zugeordnet werden kann (Albers, Haug, Heitger et al., 2019; Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019).

2.2.5 Frühe Phase im Modell der PGE

Im Produktentwicklungsprozess wird der sogenannten *Frühen Phase* in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung eine besondere Rolle zugesprochen, da die in dieser Entwicklungsphase getroffenen Entscheidungen maßgeblich den späteren Markterfolg eines Produktes bestimmen (Cooper & Kleinschmidt, 1993). Nichtsdestotrotz kennzeichnet sich diese Phase durch ein geringes Maß an Aufmerksamkeit und Einflussnahme durch das Top-Management (Wheelwright & Clark, 1995). Die Frühen Phase hat hierbei den Effekt einer Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse (Verworn & Herstatt, 2007) und beeinflusst damit Prozess- und Produkteigenschaften wie Entwicklungszeit, Kosten und Qualität (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). In der Frühen Phase werden initiale Ziele eines Produktentwicklungsprojektes wie zukünftige Eigenschaften und Funktionen festgelegt (Heitger, 2019). Diese Zielsynthese gibt einerseits die Ausrichtung der Entwicklungsaktivitäten vor und ist andererseits von hoher Unsicherheit (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) und folglich der Annahme falscher Prämissen bspw. in Bezug zu Kunden- und Anwenderbedürfnissen geprägt (Verworn, 2005). Der möglichen Einflussnahme auf Produkt- und Prozesseigenschaften in der Frühen Phase steht daher die fehlende Möglichkeit zur validen Beurteilung der Auswirkungen getroffener Entscheidungen gegenüber (Grabowski & Geiger, 1997). Da sich dieser Zusammenhang in späteren Entwicklungsphasen umkehrt (Beurteilung von Auswirkungen, aber wenig Einflussmöglichkeiten), sprechen Grabowski & Geiger (1997) vom sogenannten *Paradox der Produktentwicklung*. Das Paradox lässt sich nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013) mittels der Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung und -beurteilung im Produktentwicklungsprozess veranschaulichen.

Die Frühe Phase kann über ihre inhaltliche Charakterisierung hinaus hinsichtlich ihrer zeitlichen, prozessualen Verortung beschrieben werden. Tabelle 2.3 zeigt diesbezüglich einen Überblick zu den wesentlichen Verortungen der Definitionen der Frühen Phase im Produktentstehungsprozess (Bursac, 2016).

Tabelle 2.3: Ansätze zur zeitlichen Abgrenzung der Frühen Phase nach Bursac (2016, S. 44) und Albers, Rapp, Birk et al. (2017, S. 2)

Autor	Spezifikum	Visualisierung
Khurana & Rosenthal (1998)	Finanzierung und Start der Produktentwicklung auf Basis einer „Go / No-Go“ Entscheidung	
Koen, Ajamian, Burkart, Clamen, Davidson & D'Amore (2001)	Alle Aktivitäten vor dem Beginn des formalen und strukturierten Produktentwicklungsprozesses	
Jetter (2005)	Brücke zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung	
Muschik (2011)	Zeitraum von der Initiierung eines Projektes bis zur Formulierung einer ersten Produktspezifikation	

Zahlreiche Autoren beschreiben die Abgrenzung bzw. das Ende der Frühen Phase mit der finalen Entscheidung über die Durchführung eines Entwicklungsprojektes (Khurana & Rosenthal, 1997; Koen, Ajamian, Burkart et al., 2001). Diese Projektbestätigung leitet demnach den Übergang zu einem formalisierten, strukturierten Produktentwicklungsprozess, mit erhöhtem Ressourceneinsatz, ein (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Koen, Ajamian, Burkart et al., 2001). Die wesentlichen Aktivitäten der Frühen Phase umfassen folglich die *Generierung von Ideen* sowie deren *Bewertung* und anschließende *Entscheidung zur Projektdurchführung* anhand der Bewertungsergebnisse. Im Kontext von Neukonstruktionen (vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen et al. (2007)) wird die Frühe Phase als „*front end of innovation*“ wahrgenommen (Koen, Ajamian, Burkart et al., 2001). (Bursac, 2016; Cooper & Kleinschmidt, 1993; Khurana & Rosenthal, 1997; Verworn & Herstatt, 2007)

Für die Frühe Phase der Produktentwicklung wird in der Englisch-sprachigen Literatur häufig die Bezeichnung „*fuzzy front end*“ verwendet, um den geringen Strukturierungsgrad in den Vordergrund zu stellen (Khurana & Rosenthal, 1997). Verworn & Herstatt (2007) fassen die Charakteristika der Frühen Phase von Entwicklungsprozessen auf Grundlage einer Literaturrecherche zusammen. Daraus wird ersichtlich, dass die Frühe Phase hohe Auswirkungen auf den weiteren Prozess und das Ergebnis hat und gleichzeitig durch einen geringen Strukturierungs- und Formalisierungsgrad gekennzeichnet ist. Trotz hoher Unsicherheit ist die Top-Management Unterstützung sowie Ressourceneinsatz und -verfügbarkeit meist gering, die Kommunikation erfolgt eher informell und Schnittstellen zwischen Aufgaben- und Funktionsbereichen sind unklar. Implizites Wissen in Informationsprozessen führt letztlich zu einem geringen Dokumentationsgrad. (Verworn & Herstatt, 2007)

Da die angeführten Definitionen und Bewertungskriterien in der Literatur (vgl. Tabelle 2.3) zu unspezifisch hinsichtlich der *Abgrenzung der Frühen Phase* bleiben, konkretisieren Albers, Rapp, Birk et al. (2017) dazu die genannten Merkmale in der *Frühen Phase im Modell der PGE*²⁹ (vgl. Definition 4):

Definition 4: Frühe Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers, Rapp, Birk et al. (2017, S. 4)

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, Rapp, Birk et al. (2017) ergänzen in der Definition der Frühen Phase im Modell der PGE, dass sich die Entscheidung über die Durchführung eines Entwicklungsprojektes komplex gestaltet und sich keinesfalls anhand einzelner, konzeptioneller Lösungen treffen lässt. Vielmehr bedarf es bereits in der Frühen Phase umfassender *Validierungsaktivitäten* (anhand von *Entwicklungsgenerationen*, vgl. Abschnitt 2.2.4), um die Komplexität der Wechselwirkungen eines technischen Systems zu verstehen und dessen Risiko zu bewerten. Die Realisierung von Potenzialen der Produktgenerationsentwicklung zeigt sich bei der Bewertung der Produktspezifikation zum Abschluss der Frühen Phase ebenso in der konsequenten Nutzung des *Referenzsystems* (vgl. Abschnitt 2.2.3). (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019)

Der Begriff der Frühen Phase wird weiterhin häufig in Zusammenhang mit *Vorentwicklungs- oder Forschungsprojekten* gebracht, die in der industriellen Entwicklungspraxis oftmals der Entwicklung einer neuen Produktgeneration vorausgehen (Heismann & Maul, 2012). Ziel von Vorentwicklungs- oder Forschungsprojekten ist daher die Entwicklung einer projektübergreifend, relevanten Technologie (Heismann & Maul, 2012). Im Verständnis der Frühen Phase im Modell der PGE werden Vorentwicklungen als eigenständige Entwicklungsprojekte verstanden, die demnach ebenso eine Frühe

²⁹ Im Folgenden wird *Frühe Phase* im Sinne einer besseren Lesbarkeit als Synonym für den konkreten Begriff der *Frühen Phase im Modell der PGE* genutzt.

Phase durchlaufen. Nach Bursac (2016) kann dieser Umstand dazu führen, dass es im Verlauf eines Vorentwicklungsprojekts einzelne Phasen gibt, die aufgrund der Spezifika nicht als Frühe Phase bezeichnet werden, obwohl sie ggf. zeitlich vor der Frühen Phase einer neuen Produktgeneration liegen. Der Entwicklungsprozess einzelner Subsysteme einer neuen Produktgeneration kann folglich vorher starten, wie es bspw. bei der Entwicklung zentraler Kerntechnologien der Fall sein kann. In diesem Zusammenhang müssen bereits umfassende Validierungsaktivitäten stattgefunden haben, um eine solche Kerntechnologie in der Frühen Phase der Entwicklung einer Produktgeneration zu berücksichtigen (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Harrer, Görlich, Reuter et al., 2013). In diesem Kontext kann die Frühe Phase im Modell der PGE zudem vom Begriff *Front Loading* (vgl. z.B. Thomke & Fujimoto (2000)) differenziert werden. *Front Loading* bezieht sich auf eine frühere Durchführung diverser Produktentwicklungsaktivitäten und muss daher nicht notwendigerweise in der Frühen Phase verortet sein. (Albers, Rapp, Birk et al., 2017)

In einem mehrstufigen Referenzprozess beschreiben Albers, Heitger, Haug et al. (2018) ein geeignetes *Vorgehen zur Erstellung von Produktprofilen* im Rahmen der *initialen Zielsystembildung in der Frühen Phase*. Den Grundstein dafür bildet eine Analyse und Bewertung der Entwicklungssituation sowie die Umfeldanalyse und -prognose mittels der strategischen Produktplanung. In der Fahrzeugentwicklung im Speziellen wird das Produktprofil in der etablierten Form eines *Eigenschaftsprofils* expliziert (Heitger, 2019). Das Eigenschaftsprofil beschreibt den angestrebte Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen eines Produkts „*durch vorgegebene Ausprägungen einer Reihe produktspezifischer, kundenerlebbarer Eigenschaften*“ (Reinemann, Hirschter, Mandel et al., 2018, S. 309). Die angestrebte Soll-Veränderung bzw. Ausprägung der einzelnen, kundenerlebbaren Produkteigenschaften wird gegenüber einem Referenzsystem-Element (RSE) bzw. Referenzprodukt aufgeführt. Grundsätzlich handelt es sich dabei etwa bspw. um eine Vorgänger- oder ein Wettbewerbs-Produktgeneration. Die Produkteigenschaften im Eigenschaftsprofil können ferner in Bezug zu ihrer jeweiligen Kundenrelevanz gesetzt werden. Dies geschieht entweder durch die Zuordnung zu Basis-, Leistungs- und Begeisterungseigenschaften im Kano-Modell (vgl. Abschnitt 2.2.1) oder der Positionierung im Wettbewerbsumfeld (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Die Soll-Vorgaben kundenerlebbarer Eigenschaften lassen sich im Eigenschaftsprofil ferner über diverse hierarchische Systemebenen hinweg definieren. Heitger (2019) empfiehlt für eine Veranschaulichung der höchsten Hierarchieebene eine sogenannte *Eigenschaftsspinne* und für darunterliegende Systemebenen *Polaritätsprofile* und *Eigenschaftssteckbriefe* (vgl. Abbildung 2.26).

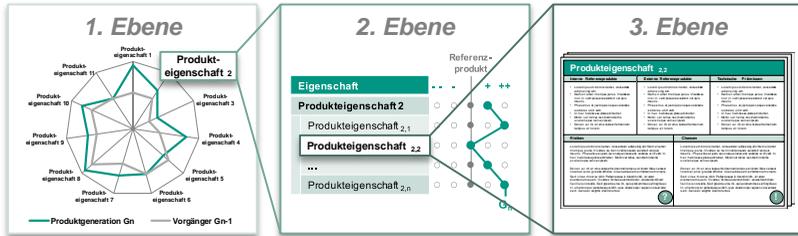


Abbildung 2.26: Schematische Visualisierung der unterschiedlichen Ebenen des Eigenschaftsprofils nach Heitger (2019, S. 126)

Die Entwicklung des Eigenschaftsprofils erfolgt nach (Albers, Heitger, Haug et al., 2018) unter Integration diverser Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Design, Marketing, Produktion und Produktplanung. Die folgende, initiale Bewertung des Eigenschafts- bzw. Produktprofils verknüpft die lösungsoffenen, kundenerlebbareren Eigenschaften mit lösungsspezifischen Elementen im Rahmen der strukturierten Produktspezifikation in der Frühen Phase (vgl. Abschnitt 2.3). (Albers, Heitger, Haug et al., 2018; Heitger, 2019)

2.2.6 Zwischenfazit: Schlüsselfaktoren

Im Kontrast zu Ansätzen des Innovationsmanagements und der klassischen Konstruktionsmethodik lässt sich beobachten, dass Produkte über mehrere Generationen hinweg zu am Markt etablierten Innovationen entwickelt werden. Die *Schlüsselfaktoren* des empirisch und wissenschaftlich fundierten *Modells der PGE* liegen in der Beschreibung der Entstehung neuer (innovativer) Produkte auf Basis eines *Referenzsystems* und den *Aktivitäten der Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation*. Darüber hinaus findet sich im Modell der PGE das *systemische Verständnis* u.a. in den Iterationen der Modellbildung auf unterschiedlichen Systemebenen von Produkt- und Entwicklungsgenerationen. Die systematische Analyse und Bewertung der *Bedürfnissituation aus Kunden-, Anwender- und Anbietersicht* mittels des Produktprofils fördert die *Stakeholder-Zentrierung* bereits in der Frühen Phase im Modell der PGE. Gerade in der Frühen Phase der Entwicklung einer neuen Produktgeneration G_n wird bspw. die Grundlage für das strategische Innovationspotential und damit den späteren Markterfolg eines Produkts geschaffen. Im Verständnis der Frühen Phase im Modell der PGE kann es bspw. im Verlauf von Vorentwicklungsprojekten einzelne Phasen geben, die vor der Frühen Phase einer neuen Produktgeneration liegen, jedoch aufgrund der Spezifika nicht als solche bezeichnet werden. Herausforderungen sind hierbei komplexe Entwicklungssituationen mit einer Vielzahl dynamischer Abhängigkeiten. Aus diesem

Grund zeigt sich ein weiterer *Schlüsselfaktor* in der Betrachtung von sowohl *lösungs-offenen* als auch *lösungsspezifischen Systemelementen*. An dieser Stelle lässt sich das Modell der PGE jedoch durch eine Differenzierung zwischen technischen Funktionen und *Funktionen des Gesamtprodukts* weiterentwickeln. Das Modell der PGE legt nicht zuletzt den Grundstein für eine Entwicklung methodischer und prozessualer Unterstützung der Produktentwickelnden – bspw. beim *Spezifizieren aus Funktionssicht*. Damit stellt das Modell der PGE den Schlüssel zur *aktivitätsbasierten Steuerung des Entwicklungsrisikos* sowie zur Unterstützung der dynamischen, zielgerichteten Nutzung von Referenzsystem-Elementen (RSE) dar.

2.3 Produktspezifikation in der Frühen Phase der Entwicklung einer Produktgeneration

Der *Produktspezifikation* wird eine zentrale Rolle im Entwicklungsprozess zuteil. Die *formale Beschreibung des Produkts* (Lindemann, 2009; Smith & Reinertsen, 1997) in einer Spezifikation dient der Definition *wesentlicher Anforderungen hinsichtlich der technischen Umsetzung* (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Albers, Heitger, Haug et al., 2018). Die Produktspezifikation ist Bestandteil des Zielsystems einer Produktgeneration und enthält u.a. eingesetzte Technologien, Funktionen sowie Übernahme- und Neuentwicklungsanteile der entsprechenden Systemelemente (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). In Abhängigkeit der Branche oder des spezifischen Anbieters können sich nur eine einzige Produktgeneration (bspw. Anlagenbauer) bis hin zu zahlreichen Produktgenerationen (bspw. Automobilhersteller) in der Entwicklung befinden und demnach spezifiziert werden. Die Spezifikation stellt somit die Dokumentation relevanter Ziele dar, auf der die weitere Entwicklungsarbeit basiert (Albers, Klingler & Ebel, 2013). Infolgedessen wird zum Abschluss der Frühen Phase im Modell der PGE eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Produkts hinsichtlich der relevanten Parameter (z.B. Herstellbarkeit, notwendige Ressourcen, etc.) sowie des technischen und wirtschaftlichen Risikos erfordert – abhängig davon, wie viele Produktgenerationen eines spezifischen Marktsegments gleichzeitig in der Entwicklung sind. Gleichermaßen dient die Produktspezifikation in der industriellen Praxis oftmals der Kommunikation und Verhandlung zwischen Auftraggeber und (externem) Auftragnehmer (Lindemann, 2009; Nellore & Söderquist, 2000). Die Spezifikation wird im weiteren Verlauf des Produktentwicklungsprozesses als offenes Medium kontinuierlich angepasst und erweitert (Darlington & Culley, 2002). Neben der *Spezifikation i.S.v. Artefakt* bezeichnet das *Spezifizieren* im Rahmen des Prozesses der Entstehung zudem eine *Aktivität* (Nellore & Söderquist, 2000). Der Charakter der Spezifikation i.S.v. Artefakt und Aktivität lässt sich im ZHO-Modell nach Albers (2010) veranschaulichen (vgl. Abbildung 2.27). Die Aktivität des Spezifizierens ist hierbei Teil des Handlungssystems und verknüpft das Zielsystem mit der Spezifikation als Artefakt im Objektsystem.



Abbildung 2.27: Zuordnung der Spezifikation (i.S.v. Artefakt) und der Aktivität des Spezifizierens im ZHO-Modell (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021, S. 2483)

In Abschnitt 2.3.1 werden daher zunächst *Standardisierungsmethoden* systemtheoretisch betrachtet und kreative Verfahren zur *Entwicklungsvorhersage* diskutiert. Im Anschluss wird das Verständnis von *Risiko* und *Reifegrad* in der Entwicklung einer Produktgeneration elaboriert (vgl. Abschnitt 2.3.2 und Anhang A.2.1). Abschließend werden das Verständnis und Ansätze zur (*kontinuierlichen*) *Validierung* im Produktentstehungsprozess in Abschnitt 2.3.3 diskutiert.

2.3.1 Methoden der Standardisierung und Entwicklungsvorhersage

Zunehmende Individualisierungswünsche der Kunden gepaart mit diversifizierten Zielgruppen, erzeugen einen hohen Bedarf an Produktvarianz (Schuh, 2012). Eine Steigerung der Produktvarianz führt in der Produktentwicklung jedoch zu einem Komplexitätsproblem, dessen gesamte Reichweite sich erst bei einer Ausweitung des Betrachtungsbereichs vom einzelnen Produkt hin zum *Produktportfolio* erschließt (Grimm, Schuller & Wilhelmer, 2014). Aus diesem Grund werden in der betrieblichen Praxis der produzierenden Industrie Methoden der (*systemtheoretischen*) *Standardisierung* (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) genutzt und systematische *Entwicklungsvorhersage* (vgl. Abschnitt 2.3.1.2) betrieben, um die Komplexität in der Produktentwicklung zu beherrschen.

2.3.1.1 Systemtheoretische Betrachtung von Standardisierungsmethoden

Eine *Standardisierung* auf Grundlage der Konzepte der *Systemtheorie* verfolgt das Ziel, Begriffe trennscharf zu definieren und eine konsistente Ontologie für mechatronische Systeme zu bilden (Albers, Scherer, Bursac et al., 2015; Bursac, 2016). Die einzelnen Definitionen von *Produktportfolio* und *Baukastenentwicklung* lassen sich schließlich vereinigen, um Kombinationen der Standardisierungsmethoden mittels deren *fraktalen Charakters* zu erläutern (Bursac, 2016).

Das *Produktportfolio* bezeichnet eine „vollständige Zusammenstellung aller von einem Unternehmen (oder einer strategischen Geschäftseinheit) geplanten, angebotenen sowie abgekündigten Produkte“ (Schicker & Strassl, 2019, S. 4). Nach Denger, Fritz,

Kissel et al. (2012, S. 405) spiegelt das Produktportfolio damit „*alle Varianten und Ausprägungen von Produkten und Produktfamilien wider und erfordert durch seine inhärente Komplexität neue Methoden zu seiner Handhabung*“. Sachgüter, Dienstleistungen sowie hybride Leistungsbündel können Bestandteil des Produktportfolios sein (Kohlborn, Fieft, Korthaus et al., 2009). Das bedeutet, dass ebenso Produkte von Dritten, die bspw. Teil eines Leistungsangebotes an einen Kunden sind, zum Produktportfolio eines Unternehmens gezählt werden. In der Literatur wird u.a. der Begriff *Produktprogramm*³⁰ als Synonym verwendet, der jedoch gleichermaßen allgemein „*die Gesamtheit der Produkte [bezeichnet], die ein Unternehmen am Markt anbietet*“ (Blees, 2011, S. 7). Das Produktportfolio bzw. Produktprogramm setzt sich wiederum aus *Produktfamilien* bzw. *Produktlinien* zusammen, die sich „*gemeinsame Technologien (Komponenten und Funktionen) teilen und ähnliche Marktsegmente bedienen*“ (Göpfert, 2009, S. 86–87). Der Begriff *Produktfamilie*³¹ grenzt hierbei jedoch nicht ausreichend ab, ob es sich um aufeinander folgende Generationen eines Produktes (vgl. Modell der PGE in Abschnitt 2.2) oder nur um eine Gruppe ähnlicher Produkte handelt. Die Produktlinie hingegen umfasst die Menge *konsekutiver Generationen eines Produktes*. Peglow, Powelske, Birk et al. (2017, S. 3) definieren eine *Produktvariante* in Bezug zu ihrem sogenannten Varianten-Referenzprodukts, von dem sie sich „*durch eine differente Ausprägung der charakterisierenden Merkmale abgegrenzt, um individuellen Kunden- und Marktanforderungen gerecht zu werden*“ (Peglow, 2021). In einer allgemeineren Definition sprechen Franke & Firchau (1998) von der Variante eines technischen Systems, wenn sich dieses in mindestens einer Beziehung oder einem Element unterscheidet, aber dem gleichen Zweck dient. Die Verknüpfung von Produktportfolio, Produktlinien, Produktgenerationen und deren Produktvarianten ist in Abbildung 2.28 in einer Darstellung nach Sekolec (2005) exemplarisch veranschaulicht.

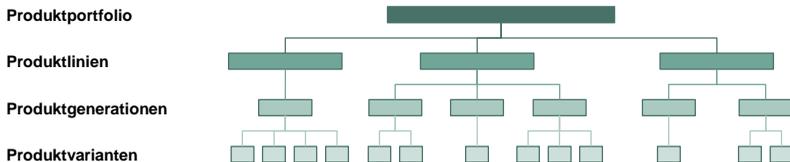


Abbildung 2.28: Schematische Gliederung des Produktportfolios eines Anbieters – Darstellung in Anlehnung an Sekolec (2005, S. 20)

Das Produktportfolio lässt sich aus einer unternehmens-externen Perspektive mittels seiner *Breite* (Anzahl von Leistungsangeboten bzw. abgedeckter Marktsegmente) und seiner *Tiefe* (Marktdurchdringung bzw. Varianz eines Leistungsangebots) beschreiben

³⁰ Im folgenden Verlauf der Arbeit wird der Begriff *Produktportfolio* verwendet.

³¹ Im folgenden Verlauf der Arbeit wird der Begriff *Produktlinie* verwendet.

(Luczak, 1999; Renner, 2007). Die Breite des Produktportfolios wird in diesem Kontext folglich über die Anzahl unterschiedlicher Produktlinien, die Tiefe über die Anzahl unterschiedlicher Produktvarianten einer Produktgeneration bestimmt (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019).

In Anbetracht eines steigenden Kostendrucks verfolgen Unternehmen zunehmend eine Produktportfoliostrategie, die durch Multiplikationseffekte die Kosten je Erzeugnis senkt (Grimm, Schuller & Wilhelmer, 2014). Nach Müller, Glitzner, Höller et al. (2016) versucht das strategische Portfoliomanagement in diesem Kontext den Wert des Produktportfolios zu maximieren und Risiken sowie Ressourceneinsatz zu balancieren. Nichtsdestotrotz kann die Wirtschaftlichkeit des Produktportfolios erhöht werden, indem die *innere Variantenvielfalt* minimiert und die *äußere Variabilität* der Produkte gleichzeitig maximiert werden (Feldhusen & Gebhardt, 2008). Die Aktivitäten und Methoden zur Strukturierung des Produktportfolios sind Zweck einer Produktdifferenzierung oder Produktstandardisierung abhängig (Franke, Hesselbach, Huch et al., 2002).

Das Prinzip der *Baukastenentwicklung* ermöglicht die Rationalisierung der erläuterten Effekte und verfolgt die Maximierung der externen Vielfalt an Produkten bei gleichzeitiger Minimierung der internen Vielfalt durch eine geringe Anzahl an Baukästen (Bartuschat, 2001; Pahl, Beitz, Feldhusen et al., 2007; Scherer, 2016). Dieser Standardisierungsansatz führt zu einer Kostenersparnis bspw. in Entwicklung sowie Produktion durch Skaleneffekte, einer Verringerung der Entwicklungszeit und damit einer insgesamt geringeren Durchlaufzeit (Bayer, 2010; Thun & Stumpfe, 2004). Risiken und Herausforderungen hingegen können bspw. erhöhter Bauraumbedarf und Gewicht, technische Kompromissen mit Einbußen bei bestimmten Eigenschaften, Imageverluste sowie höhere Qualitätsanforderungen zur Vermeidung kostenintensiver Rückrufaktionen sein (Kopenhagen, 2004; Scherer, 2016; Sedchaicharn, 2010; Stechert, 2010; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009).

In der automobilen Produktentwicklung gehören *Baukästen*, *Module*, *Plattformen* und *Baureihen* zu den verbreitetsten Standardisierungsmethoden (Bursac, 2016). Albers, Scherer, Bursac et al. (2015) definieren einen *Baukasten* als „die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen“ (Bursac, 2016, S. 53). Übergeordnetes Ziel eines Baukastens ist aus den möglichen Subsystemen jeweils technische (Gesamt-)Systeme mit verschiedenen Eigenschaften aus den verfügbaren Funktionen zu konfigurieren. Ein *Modul* wird hierbei als das technische Subsystem verstanden, das durch ein anderes ersetzt werden kann, um die Menge aller Eigenschaften und Funktionen zu variieren (Albers, Scherer, Bursac et al., 2015). Die Menge an Subsystemen, die in verschiedenen technischen (Gesamt-)Systemen eingesetzt werden, lässt sich als *Plattform* bezeichnen. Der zugehörige *Hut* umfasst demnach jene Subsysteme, welche die Menge aller Eigenschaften und Funktionen in verschiedenen, technischen (Gesamt-)Systemen variiert (Albers, Scherer,

Bursac et al., 2015). Technische Systeme, die ähnliche Produktarchitektur aufweisen, werden als *Baureihe* bezeichnet und können durch Skalierung variiert werden (Albers, Scherer, Bursac et al., 2015). (Bursac, 2016)

Nach Albers, Scherer, Bursac et al. (2015) lässt sich die Kombination der systemtheoretischen Betrachtungen in der Baukastenentwicklung am *fraktalen Charakter der Standardisierungsmethoden* auf verschiedenen Systemebenen festmachen (vgl. Abbildung 2.29).

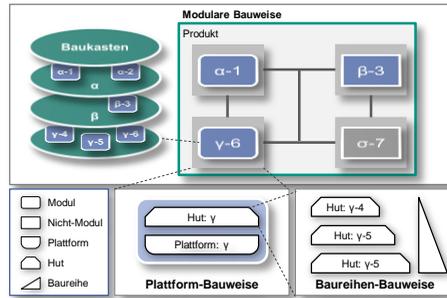


Abbildung 2.29: Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden nach Albers, Scherer, Bursac et al. (2015, S. 4) und Bursac (2016, S. 56)

Die Baukastenentwicklung inkludiert nach Bursac (2016) neben der Aktivität zur Entwicklung des fundamentalen Baukasten-Regelwerks ebenso die Aktivitäten zur Entwicklung der einzelnen Bausteine sowie die daraus konfigurierbaren Produkte. Die auf einem Baukasten basierenden Produkte werden häufig nicht parallel – sondern mit Zeitversatz – entwickelt, um einen effektiven und effizienten Ressourceneinsatz zu gewährleisten. Aufgrund der tiefgreifenden Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Modulen eines Baukastens, müssen selbst triviale Änderungen über verschiedene Produktgenerationen oder gar Produktlinien des Produktportfolios hinweg abgestimmt werden. Albers, Bursac & Scherer (2014) argumentieren, dass hierfür eine modellbasierte Kommunikationsgrundlage im Sinne von Model-Based Systems Engineering (MBSE, vgl. Abschnitt 2.1.4.1) notwendig ist, um den Baukasten und die zugehörigen Produkte konsistent abzubilden. Der Entwicklungsprozess eines Baukastens sowie darauf basierender Produkte wird als Aktivität im Sinne des iPeM (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) verstanden und verläuft – wie in Abbildung 2.30 dargestellt – kontinuierlich. (Albers, Bursac & Scherer, 2014; Albers, Scherer, Bursac et al., 2015; Bursac, 2016)

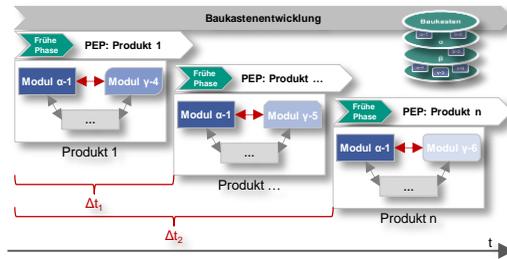


Abbildung 2.30: Entwicklungsprozesse des Baukastens und der Produkte nach Albers, Bursac & Scherer (2014, S. 20) und Bursac (2016, S. 62)

Der hohe zeitliche Versatz der Entwicklungsprozesse verursacht Unsicherheiten und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Modulen, die einkalkuliert werden müssen (Albers, Bursac & Scherer, 2014). Baukastenelemente werden demnach teilweise für Produkte entwickelt, deren eigener Entwicklungsprozess erst in ferner Zukunft beginnt. Aus diesem Grund nutzt man bspw. in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_{n+1} u.a. *strategische Vorausschau* und *systematische Entwicklungsvorhersage* (vgl. Abschnitt 2.3.1.2), um der Unsicherheit in der Zielsystembildung zu begegnen. (Bursac, 2016)

2.3.1.2 Roadmapping als kreatives Verfahren der Entwicklungsvorhersage

Der Begriff *Vorausschau* beschreibt nach dem Verständnis von Gausemeier & Plass (2014, S. 38) „das systematische Ausleuchten des Zukunftsraums mit dem Ziel, zukünftige Chancen (Erfolgs- beziehungsweise Nutzenpotentiale) aufzuspüren und auch Bedrohungen für das etablierte Geschäft von heute zu erkennen“. Die Vorausschau wird im Produktentstehungsprozess folglich als ein systematisch-partizipatorischer Prozess verstanden, der den Produktentwickelnden durch Zukunftswissen beim frühzeitigen Identifizieren und Priorisieren von Entwicklungspotentialen zur Seite steht (Marthaler, 2021; Meyer-Schwickerath, 2014). Die strategische Vorausschau lenkt somit den Entwicklungsfokus systematisch auf Suchfelder mit hohem Innovationspotential, um letztendlich einen Wettbewerbsvorsprung zu schaffen. (Gausemeier, Dumitrescu, Echterfeld et al., 2019; Marthaler, 2021; Meyer-Schwickerath, 2014).

Im Rahmen des Zukunftsmanagements existieren verschiedene Instrumente der Vorausschau bzw. Entwicklungsvorhersage. Zur Betrachtung des externen Unternehmensumfelds werden häufig *Prognosen*, *Trends* und (*Umfeld-*)*Szenarien* genutzt. *Prognosen* liefern kurzfristige Aussagen über die Zukunft durch lineare Fortschreibung von quantitativen Werten aus Vergangenheit und Gegenwart (Fink & Siebe, 2016). Aus diesem Grund lassen sich eher operative Handlungsempfehlungen ableiten, die

mit steigendem Betrachtungshorizont unzuverlässiger werden. *Trends* stellen mittelfristige Zukunftsaussagen über eindimensionale Betrachtungen technologischer und marktlicher Entwicklungen dar (Fink & Siebe, 2016). *Szenarien* hingegen dienen der langfristigen Entwicklungsvorhersage über konsistente, multiple Zukunftswelten, um ein möglichst vollständiges Gesamtbild alternativer und abgrenzbarer Entwicklungsmöglichkeiten zu erzeugen (Fink, Schlake & Siebe, 2001). In der Produktentwicklung findet das Vorgehen nach Gausemeier & Plass (2014) über systematische *Szenariovorbereitung*, *Szenariofeldanalyse*, *Szenarioprognostik*, *-bildung* und *-transfer* weite Verbreitung. Die entwickelten Szenarien können im Kontext der strategischen Produktplanung (i.S.v. Marktleistungsszenarien) „*mögliche Angebote (beschreiben), die ein Unternehmen priorisieren und zu einem [Produktportfolio] zusammenfassen kann*“ (Fink & Siebe, 2016, S. 247).

Die Zieldefinition für die Entwicklung neuer Systeme setzt neben der strategischen Produktplanung auf Basis der Szenariotechnik ebenso auf das Instrument des *Roadmappings* (Arslan, Haug, Heitger et al., 2016). Der Begriff *Roadmapping* beschreibt ein kreatives Analyseverfahren, mit dem Entwicklungspfade von u.a. Produkten, Dienstleistungen und Technologien in die Zukunft hinein analysiert, prognostiziert und visualisiert werden können (Specht, Behrens & Richter, 2017). Expertenwissen, das in einer Roadmap erfasst und gebündelt wird, unterstützt als strategisches Planungs- und Steuerungsinstrument folglich die Entwicklungsvorhersage und gruppendynamische Bewertung der Handlungsmöglichkeiten eines Unternehmens (Möhrle & Specht, 2018). Möhrle & Isenmann (2017) verwenden für eine Roadmap die Metapher einer Straßenkarte, die den Anwender bzw. Fahrer (im übertragenden Sinne die Geschäftsleitung) bei einer effektiven, effizienten und risikobeherrschenden Routenplanung (i.S.v. Entwicklungspfaden) zum Ziel unterstützen soll. Aus Innovationssicht strukturieren Roadmaps Entwicklungsvorhaben aus den Perspektiven *Markt*, *Produkt*, *Technologie* und *Ressourcen* und koordinieren darüber Aktivitäten der Portfoliostrategie zur frühzeitigen Erkennung von Abhängigkeiten, Verknüpfungen und insbesondere Synergien (Durst & Durst, 2016). Eine generische Visualisierungsmöglichkeit für solche Roadmaps mit vertikaler Ebenenstruktur nach European Industrial Research Management Association [EIRMA] (1997) ist in Abbildung 2.31 dargestellt. Die jeweiligen Entwicklungsprojekte und Ressourcen werden auf einer horizontalen Zeitachse untereinander dargestellt und durch Entwicklungsfolgebeziehungen verknüpft (Phaal, Farrukh & Probert, 2005).

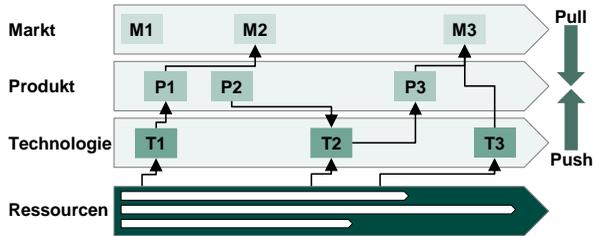


Abbildung 2.31: Darstellung einer Roadmap nach (EIRMA, 1997)

Die Fachliteratur differenziert hauptsächlich zwischen *Technologie-* und *Produkt-Roadmaps* (vgl. z.B. Garcia & Bray (1997) und Ulrich & Eppinger (2015)). *Produkt-Roadmaps* visualisieren den zeitlichen und strategischen Verlauf des Produktportfolios mit dem Ziel, Effekte von Markttrends zu erfassen und notwendige, zukünftige Technologien auszuwählen (Albright & Kappel, 2003; Kim, 2016). Neben der Abbildung aller relevanten Produktinitiativen und -plattformen (Cooper & Edgett, 2010), sollten nach Ulrich & Eppinger (2015) außerdem Wettbewerbsprodukte in die Roadmap aufgenommen werden. *Technologie-Roadmaps* hingegen dienen dazu, erwartete technologische Entwicklungen sowie mögliche technologische Akquisitionen, die das Produktportfolio beeinflussen, zu planen, zu koordinieren und zu prognostizieren (Cooper & Edgett, 2010; Phaal, Farrukh & Probert, 2005; Ulrich & Eppinger, 2015). Zur Erfassung technologischer Trends, können bspw. Studien von Forschungseinrichtungen oder wissenschaftliche Publikationen herangezogen und ausgewertet werden (Muschik, 2011).

Darüber hinaus lässt sich der Ansatz des Roadmappings auf *Projekt-* oder *Funktions-Roadmaps* übertragen (Möhrle & Isenmann, 2017). In der Konstruktion kann eine Visualisierung des Lösungsraums bzw. der Teillösungen, mit denen sich Gestaltanforderungen an ein mechatronisches System erfüllen lassen, in sogenannten *Design-Roadmaps* dargestellt werden (Kececi, 2019). Mittels des Design-Roadmappings lässt sich über eine Fokussierung der User-Experience die Kundenorientierung frühzeitig in einem Entwicklungsprojekt stärken und konzeptrelevante Gestaltelemente zeitlich planen sowie in Produkte oder Dienstleistungen integrieren (Kim, 2016). Zu guter Letzt lässt sich bspw. das Entwicklungsrisiko (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) über *Risiko-Roadmap* erfassen, beobachten, managen und schließlich minimieren (Albright & Kappel, 2003).

Das Roadmapping kann bspw. mittelfristige (1-10 Jahre) und langfristige (>10 Jahre) Zeiträume der Entwicklungsvorhersage fokussieren und entsprechende Maßnahmen oder Handlungsempfehlungen daraus ableiten (Specht, Behrens & Richter, 2017). Die Informationssammlung erfolgt über strategische Werkzeuge wie SWOT- und Portfolioanalysen, Porter's Five Forces oder STEPPI, deren Ergebnisse in einer Roadmap

konsolidiert werden (Phaal, Farrukh & Probert, 2005). Gleichmaßen werden ebenso verschiedene Szenarien der Szenariotechnik in einer Roadmap abgebildet (Geschka, Schauffele & Zimmer, 2017). Fünf Phasen definieren beim *einfachen Roadmapping* das Vorgehen über die Objekte (z.B. Produkt oder Technologie), die durch einen *Marktsog* (*engl. market pull*) oder einen *Technologiedruck* (*engl. technology push*) in die Roadmap gelangen (Specht, Behrens & Richter (2017), vgl. Abbildung 2.32).

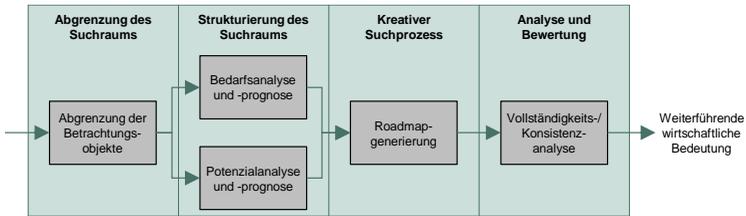


Abbildung 2.32: Vorgehen beim einfachen Roadmapping (Specht, Behrens & Richter, 2017, S. 72)

Nach initialer Klärung des Zeithorizontes der Roadmap wird der Suchraum durch eine Umfeldanalyse auf relevante Betrachtungsobjekte eingegrenzt. Anschließend erfolgt eine Strukturierung über Analyse und Prognose von Bedarf und Potenzial bspw. über Szenarien. Die Roadmap wird dann bspw. mittels Workshops oder Expertenbefragungen generiert und plausible Entwicklungspfade für die Betrachtungsobjekte werden prognostiziert. Abschließend wird die inhaltliche und zeitliche Vollständigkeit und Konsistenz überprüft und plausibilisiert. (Specht, Behrens & Richter, 2017). Eine *Produkt-Technologie-Verknüpfung über Funktionen* ermöglicht eine genauere Identifikation und Beschreibung von Inkonsistenzen und Lücken im strategischen Portfolio (Specht, Behrens & Richter (2017), vgl. Abbildung 2.33).

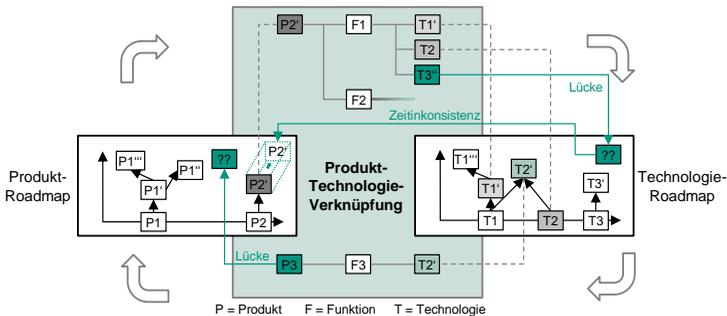


Abbildung 2.33: Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse mit Produkt-Technologie Verknüpfung nach Specht, Behrens & Richter (2017, S. 75)

Die *Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse* in der graphischen Darstellung wird über die Verknüpfung verwendeter Technologien in den einzelnen Produkten des Portfolios ermöglicht. Weiterhin wird jedes Produkt in wesentliche Funktionen und zugehörige Technologien aufgespalten. In Abbildung 2.33 zeigt sich exemplarisch, dass ein Bedarf an einer Technologie T3“ existiert, die für die Realisierung der Funktion F1 des Produkts P2' notwendig ist. Eine Technologieanalyse kann darüber hinaus das Potenzial der synergetischen Umsetzung einer neuen Funktion F3 durch die Technologie T2' offenbaren. Dieses Funktionspotenzial könnte wiederum im Produkt P3 eine identifizierte (*Innovations-*)*Lücke* im Produktportfolio schließen. Der identifizierte, technologische Bedarf T3“ weist eine *Zeitinkonsistenz* auf, da das Produkt P2' erst realisiert werden kann, wenn diese Technologie T3“ verfügbar ist. Mittels der Produkt-Technologie-Verknüpfung können demnach die (funktionalen) Lücken und Zeitinkonsistenzen in der Produktentwicklung identifiziert werden (Specht, Behrens & Richter, 2017). Ein weiterer Ansatz der Konsistenzanalyse nach Gausemeier (2013) liefert diejenigen Kombinationen bzw. Handlungsoptionen, die in einer Geschäfts- oder Produktportfoliostrategie kompatibel sind, anhand der paarweisen Bewertung von Ausprägungen strategischer Variablen.

2.3.2 Risiko- und Reifegradverständnis in der Produktentwicklung

In der Produktentwicklung stehen das *Innovationspotenzial* und *Entwicklungsrisiko* in einem untrennbaren Zusammenhang (Cooper, 2001). Das Streben nach erfolgreichen Produkten steht der Nutzung von Wissen sowie *Handhabbarkeit von Unsicherheit* (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) als Zielkonflikt gegenüber (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Granig, 2007; Waitzinger, 2015). Innovation und Risiko sind gleichermaßen von der Informationsverfügbarkeit und Wissen abhängig, da beides bei steigender Produktdifferenzierung zunimmt bzw. zu Unsicherheit führt (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013; Shenhar, Dvir, Milosevic et al., 2005). Die Optimierung des Innovationspotenzials und Reduzierung des Entwicklungsrisikos (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) erfordert daher eine systematische Erhebung des Produktreifegrads (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) über geeignete Modelle (Gladysz, Beautier, Albers et al., 2016). Weiterführende Erläuterungen finden sich darüber hinaus in Anhang A.2.1.

2.3.2.1 Wissen und Unsicherheit in der Produktentwicklung

Im Handlungssystem wird in der Produktentstehung *Wissen* generiert (Albers & Braun, 2011b). Dabei definiert sich Wissen als „*die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Personen zur Lösung von Problemen einsetzen*“ (North, 2011, S. 37). Nach Albers & Braun (2011b) ist Wissen als subjektives Konstrukt somit stets an einen Wissensträger gebunden, der dieses auf Grundlage seiner kognitiven Fähigkeiten und seiner Erfahrungen interpretiert (Meboldt, 2008). *Explizites Wissen* liegt in kodifizierten

Artefakten (bspw. Dokumente, Modelle) vor, *implizites Wissen* baut sich unbewusst über Erfahrungen im Wissensträger auf. Explizites Wissen lässt sich austauschen und weitergeben, wohingegen implizites Wissen zuvor expliziert werden muss. Die Wissens-Ansammlung, Verbreitung und Anwendung im Produktentwicklungsprozess bzw. der Produktspezifikation ist wesentlich und hat bedeutenden Erfolgseinfluss. (Albers & Braun, 2011b; Seiffert & Rainer, 2008).

Galbraith (1973) bezeichnet die Differenz zwischen benötigtem und vorhandenem Wissen als sogenannte *Unsicherheit*. Die Unsicherheit stellt einen Zustand dar, in dem mehrere potenzielle Ergebnisse möglich sind und kann entweder reduzierbar (epistemisch) oder nicht reduzierbar (aleatorisch) sein (Muschik, 2011). Komplexe Produktentstehungsprozesse zeichnen sich in der Frühen Phase grundsätzlich durch einen hohen Grad an Unsicherheit aus (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Verworn & Herstatt, 2007). In Kombination mit einem Mangel an objektiven Informationen gestaltet sich die prospektive Planung von Produkt und seinem Entwicklungsprozess schwer vorhersehbar, sodass häufig auf subjektive Bewertungen und Annahmen zurückgegriffen werden muss (Jeschke, Jakobs & Dröge, 2013). In der Literatur existieren mehrere Ansätze zur *Klassifizierung von prozessimmanenter Unsicherheit* in der Produktentwicklung (vgl. Tabelle A.1). Eine detaillierte Übersicht der Ansätze zur *Klassifizierung von Unsicherheit* findet sich in Anhang A.2.1.

2.3.2.2 Entwicklungsrisiko

Im allgemeinen Sprachgebrauch beschreibt Risiko ein Ereignis mit „*möglicher negativer Auswirkung*“ und das Antonym Chance ein Ereignis mit „*möglicher positiver Auswirkung*“ (Werdich, 2012, S. 147). Der Risikobegriff wird im Zusammenhang mit der Produktentwicklung häufig mit Unsicherheiten in einem Entwicklungsprozess (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) verbunden. Das Risiko wird hierbei als Effekt oder Auswirkung der bestehenden Unsicherheit betrachtet (Grebici, Goh & McMahon, 2008; Hubbard, 2010; McManus & Hastings, 2005; Thunnissen, 2005). Genauer gesagt definiert die DIN ISO 31000:2018-10 Risiko als die „*Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele*“ (S. 7), das sich mittels Risikoursachen, potenziellen Ereignissen, deren Auswirkungen und Wahrscheinlichkeit beschreiben und konkretisieren lässt. Zur mathematischen Risikobeschreibung werden in verschiedenen Ansätzen häufig quantifizierte, mögliche Auswirkungen mit deren Auftretenswahrscheinlichkeit multipliziert. Da die *Quantifizierung* (über Punktwertungen oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen) mittels subjektiver Bewertungen entsteht, wird teilweise eine *Scheingenauigkeit* erreicht, die suggeriert, dass Risiko beherrschbar sei (Gassmann, 2006; Oehmen, 2016). Risiko ist nach Ansicht von McManus & Hastings (2005) vielschichtig, d.h. wengleich aus einer Perspektive negative Auswirkungen resultieren, ergeben sich aus anderen Blickwinkeln wiederum Chancen. Eine Berücksichtigung von sowohl Chancen als auch Risiken in der Pro-

duktentstehung ist essenziell. Ein herausragendes Beispiel hierfür ist die *Tragweitenanalyse der SPALTEN-Problemlösungsmethodik* (vgl. Abschnitt 2.1.3.1) im iPeM (Albers, Burkardt, Meboldt et al., 2005; Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016).

Ergänzend dazu findet sich in Anhang A.2.1 findet sich eine Übersicht der *Kategorisierung des Entwicklungsrisikos* eines Produkts sowie die Erläuterung des *Risiko-Portfolios im Modell der PGE* unter Zuhilfenahme der Charakteristika von sowohl Referenzsystem-Elementen (RSE) als auch den Neuentwicklungsanteil.

2.3.2.3 Produktreifegrad

Der *Reifegrad eines Produkts* drückt den Grad der Anforderungserfüllung durch die Produktentwicklung aus (Krehmer, Meerkamm & Wartzack, 2009; Weinzierl, 2006). Zu den Anforderungen zählen nach Krehmer, Meerkamm & Wartzack (2009) neben der Befriedigung von Kunden- und Anwenderbedürfnissen, ebenso Unternehmens- und Umwelanforderungen (bspw. aus Gesetzen, Gesellschaft, o.ä.) sowie solche, die mit der Auswahl und Realisierung einer Lösungsalternative verbunden sind. Der Produktreifegrad bietet zudem die Möglichkeit, eine Aussage über die *technische Reife* eines Produkts zu treffen (Nagel, 2011). Vor diesem Hintergrund können Anforderungen aus Kunden- oder Anwendersicht mit dem aktuellen Objektsystem verglichen werden, um technische Eigenschaften und Funktionen der physischen Gestalt zu beurteilen. Im Zuge dessen lässt sich der technische Reifegrad der Realisierung sowie die Übereinstimmung eines Konzepts mit den definierten (Funktions-)Anforderungen aus Unternehmens- und Kundensicht beschreiben (Nagel, 2011). Nach Albers, Lohmeyer & Ebel (2011) beschreibt der Reifegrad den Grad der Vollständigkeit eines Systems hinsichtlich Verständnis und Realisierung deren Elemente. Der Reifegrad bezieht sich dabei auf Elemente sowohl des Zielsystems als auch des Objektsystems und ist daher als Zustand hinsichtlich definierter Indikatoren zu einem beliebigen Zeitpunkt zu verstehen (Albers, Lohmeyer & Ebel, 2011). Im Verständnis nach Weber (2012) misst eine *merkmalsbezogene Reife* die Vollständigkeit der Produktdefinition. Eine *eigenchaftsbezogenen Reife* gleicht hingegen den momentanen Lösungsstand mit definierten Anforderungen ab (Weber, 2012).

In der Frühen Phase schafft eine Erhebung des Produktreifegrad Transparenz und baut kommunikative Barrieren zwischen den unterschiedlichen Disziplinen in der Produktentwicklung ab. Die Einschätzung des aktuellen, konzeptuellen Entwicklungsstands sowie möglicher, technischer Realisierung ermöglichen frühzeitige Reaktion und Ableitung von Handlungsalternativen. Gleichmaßen fördert die *Reifegraderhebung* nach Gladysz, Beautier, Albers et al. (2016) eine Sensibilisierung beteiligter Akteure hinsichtlich relevanter Themen und führt damit zu einer möglichen Effizienzsteigerung innerhalb des Problemlösung- bzw. Entwicklungsteams. Trotz alledem gestaltet sich die Bestimmung des Reifegrads keinesfalls trivial, da gerade objektive

Kenngößen nur aufwändig ermittelbar sind (Braun, 2014). Einen quantitativen Vergleich vorab definierter Ziele mit der gegenwärtigen Gesamtheit der Zielsystem-Elemente kann ein möglicher Indikator des Produktreifegrads sein, wenngleich dieser Ansatz einen einheitlichen Zielrahmen im Sinne der Vergleichbarkeit voraussetzt (Albers, Heimicke, Hirschter et al., 2018). Nichtsdestotrotz sollten jederzeit ebenso individuelle Projektrahmenbedingungen in die Reifegraderhebung einfließen (Braun, 2014). Pfeifer-Silberbach (2005) ergänzt, dass der Reifegrad in vereinfachter Form im Rahmen von Meilensteinen- oder Stage-Gate-Freigaben erfolgen kann. Gladysz, Beutier, Albers et al. (2016) unterstreichen an dieser Stelle, dass die Festlegung von Anzahl der Meilensteine/Gates sowie deren Bedeutung und jeweiligen Abgrenzungen unternehmens-, produkt- sowie kundenspezifisch zu definieren ist.

Weiterführende Erläuterungen zur Modellierung von Zielen in der Frühen Phase bzw. der Unterscheidung zwischen Härtegrad und Reifegrad als auch die Beschreibung verschiedener Reifegradmodelle finden sich ergänzend in Anhang A.2.1.

2.3.3 Validierung im Produktentstehungsprozess

Nach ALBERS (2010)³² stellt Validierung die zentrale, wissensgenerierende Aktivität der Produktentstehung dar. Die Aktivitäten der (*frühen und kontinuierlichen*) *Validierung* (vgl. Abschnitt 2.3.3.1 und 2.3.3.2) lassen sich dabei im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) modellieren. Zur effizienten Validierung bedarf es einer generationsübergreifenden Entwicklung und Nutzung von Validierungssystemen (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2017; Matthiesen, Gwosch, Mangold et al., 2017), die sich über Ansätze wie bspw. das *IPEK X-in-Loop-Framework* (vgl. Abschnitt 2.3.3.3 bzw. Anhang A.2.2) beschreiben lassen.

2.3.3.1 Grundlegende Aktivitäten der Validierung

Zum Verständnis der Bedeutung im Produktentstehungsprozess müssen die Aktivitäten der *Validierung* und der – im allgemeinen Sprachgebrauch häufig synonym verwendeten – *Verifikation* voneinander abgegrenzt werden (Albers, 2010; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Die VDI Richtlinie 2206 definiert die *Verifikation* als eine Überprüfung, welche die Übereinstimmung der Realisierung eines technischen Systems mit der zugrundeliegenden Spezifikation beschreibt (VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Im Verständnis des ZHO-Modells (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) handelt es sich bei der *Verifikation* um den „*Vergleich von Elementen des Objektsystems mit Elementen des Zielsystems [...], mit dem Ziel, deren Konformität zu beurteilen*“ (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015, S. 77). Inwiefern das technische System überhaupt einen Kunden-,

³² vgl. 3. zentrale Hypothese nach Albers (2010, S. 5).

Anwender- oder Anbieternutzen erfüllt bzw. ob das definierte Zielsystem für die Stakeholder von Relevanz ist, wird durch Verifikation nicht überprüft (Albers & Düser, 2011; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016).

Nach der VDI-Richtlinie 2206 (VDI-Richtlinie 2206:2004-06) beschreibt die Validierung eine „Prüfung [...], ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt“ (S. 39). Aus diesem Grund fokussiert die Validierung den Nutzen der (Produkt-)Eigenschaften in Bezug zu relevanten Anspruchsgruppen und überprüft somit die Gültigkeit des Zielsystems hinsichtlich der *Anforderungserfüllung eines technischen Systems aus Kunden-, Anwender- und Anbietersicht*. Die Validierung liefert die Antwort auf die Frage, ob das richtige Produkt entwickelt wird, die Verifikation beantwortet hingegen nur, ob ein Produkt korrekt entwickelt wurde (VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Die Stakeholder müssen demnach berücksichtigt werden, um das Produkt in seinem jeweils erreichten Entwicklungsstand „mit seinem künftigen Einsatz in Zusammenhang [zu setzen]“ (Klingler, 2017, S. 18) und letztlich zu validieren. Stakeholder sind dabei all diejenigen, die ein legitimes Interesse an den Prozessen oder den Artefakten der Produktentwicklung haben und somit potenziell über den Erfolg oder Misserfolg eines Produktes entscheiden (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015). Über das Handlungssystem hinaus gilt es hierbei, weitere Anspruchsgruppen (z.B. insbesondere Kunden und Anwender, aber ebenso Lieferanten, Gesetzgeber, Gesellschaft o.ä.) eines Produktes zu berücksichtigen. (Albers & Düser, 2011; Albers, Matros, Behrendt et al., 2015; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016).

Die Verknüpfung der Aktivitäten von Validierung und Verifikation, Stakeholdern sowie weiteren Aktivitäten der Produktentwicklung und handelnden Akteuren wird im *System der Produktentstehung* nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) konkretisiert. Das System der Produktentstehung (vgl. Abbildung 2.34) ist dabei sowohl an das iPeM als auch das erweiterte ZHO-Modell angelehnt.

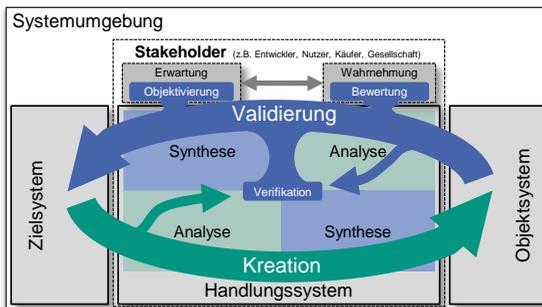


Abbildung 2.34: Validierung im System der Produktentstehung nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 545)

Die Validierung im System der Produktentstehung beinhaltet die Teilaktivität der *Verifikation* und umfasst zudem die Teilaktivitäten der *Bewertung* und *Objektivierung* (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Die *Bewertung* verfolgt eine „*Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholdersicht*“ und „*erfolgt überwiegend subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen*“ (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015, S. 77). Zur *Objektivierung* werden nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 559) Validierungsergebnisse „*in Form von neuen oder modifizierten Entwicklungszielen in das Zielsystem des Produktentwicklungsprozesses zurückgeführt*“. In diesem Schritt wird somit überprüft, inwieweit Zielsystem-Elemente die Erwartungen der Stakeholder objektiv wiedergeben und identifiziert, welche Potentiale zur Erhöhung der Objektivität des Zielsystems existieren (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015). Die Teilaktivitäten der Bewertung und Objektivierung bezwecken den Abgleich von Zielsystem-Elementen und der Entwicklungsstände mit den Erwartungen und Bedürfnissen der Stakeholder, um einerseits technische Umsetzbarkeit und andererseits Erfolg des Produktes am Markt sicherzustellen (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Ein effektiver Abgleich wird insbesondere durch die Einbindung relevanter Stakeholder in den Validierungsprozess ermöglicht (Albers, Fischer, Klingler et al., 2014). Die Stakeholder (z.B. Kunden/Anwender) lassen sich hierbei direkt (über Kunden-/Anwendertests) oder indirekt (über Kunden-/Anwenderersatzmodelle) in die Validierungsaktivitäten integrieren (Gängl-Ehrenwerth, Faullant & Schwarz, 2013; Heiss, 2010; Rode, 2013). Bedingt durch Zeit- und Kostenrestriktionen industrieller Produktentwicklung, muss ein effizientes Vorgehen in Bezug zu Aufwand und Umfang der Validierungsaktivitäten gewählt werden (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Eine Möglichkeit bietet die Kritikalitätsbewertung nach Albers, Klingler & Wagner (2014), die Validierungsaktivitäten anhand der drei Kriterien Bekanntheit des Anwendungsszenarios, Bekanntheit der Technologie und Auswirkungen des Funktionsversagens priorisiert.

2.3.3.2 Frühe und kontinuierliche Validierung

Validierungsaktivitäten sind ein wichtiges Element für die Sicherstellung der Kundenwertigkeit eines Produkts am Markt, müssen zur effektiven und effizienten Durchführung aber im Produktentwicklungsprozess (PEP) verankert werden (Albers, 2010; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Eine Vielzahl von Modellen zu Produktentwicklungsprozessen integriert Validierung (vgl. z.B. Eigner, Koch & Mugge (2017)). Diese Validierungsaktivitäten beschränken sich darin jedoch häufig auf abgeschlossene Phasen zum Ende des Entwicklungsprozesses (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2017). Damit die Ergebnisse und der Wissensgewinn aus den Validierungsaktivitäten stetig in den PEP integrieren werden kann, bedarf es Ansätze zur *frühzeitigen und kontinuierlichen Validierung* sowie einer *Parallelisierung der Entwicklung eines Produkts und des entsprechenden Validierungssystems* (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2017). Nur so kann das Zielsystem kontinuierlich erweitert und konkretisiert werden. Insbesondere Relationen und Wechselwir-

kungen zwischen Aktivitäten und (Teil-)Ergebnissen von Produkt- und Validierungssystementwicklung sind dabei zu berücksichtigen, um Erkenntnisse und Aktivitäten für den weiteren PEP abzuleiten (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2017). Zur Modellierung und Darstellung dieser teilweise komplexen Abhängigkeiten bieten sich Ansätze des Model-Based Systems Engineering (MBSE, vgl. Abschnitt 2.1.4.1) an.

Die frühzeitige Validierung zeichnet sich durch ihre Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse aus und kann somit potentiell zeitaufwändige oder kostenintensive Modifikationen in späten Entwicklungsphasen vorbeugen (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019; Porter, 2004). Ein Grund hierfür kann mangelndes Verständnis von Kunden- und Anwenderanforderungen in der Frühen Phase sein, deren Auswirkungen sich bspw. in Form von Änderungskosten nach der *Zehnerregel* (*engl. rule of ten*) nach Clark & Fujimoto (1991) von einer Entwicklungsphase zur nächsten um den Faktor zehn steigern können. Gleichermäßen nimmt zusätzlich die Möglichkeit der Einflussnahme im Verlauf eines Entwicklungsprojektes antiproportional ab, sodass Änderungen im schlimmsten Fall gar nicht mehr in wirtschaftlich vertretbaren Rahmen umsetzbar sind (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Frühe und kontinuierliche Validierungsaktivitäten tragen hingegen dazu bei, marktliche Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) zu reduzieren und wirken sich damit letztlich positiv auf den späteren Markterfolg eines Produktes aus (vgl. z.B. Verworn & Herstatt (2007) und Cooper & Kleinschmidt (1993). Initial definierte Anforderungen spiegeln hierbei genauer die realen Kunden- und Anwenderbedürfnisse wider, die wiederum ständig im Projektverlauf hinsichtlich der Erfüllung durch das Produkt oder Entwicklungsergebnisse hinterfragt werden (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2017). Das Potential frühzeitiger und kontinuierlicher Validierung zeigt sich mittels der Differenzierung zwischen *Pull-* und *Push-Prinzip der Validierung* (Albers, Matros, Behrendt et al. (2015), vgl. Abbildung 2.35).

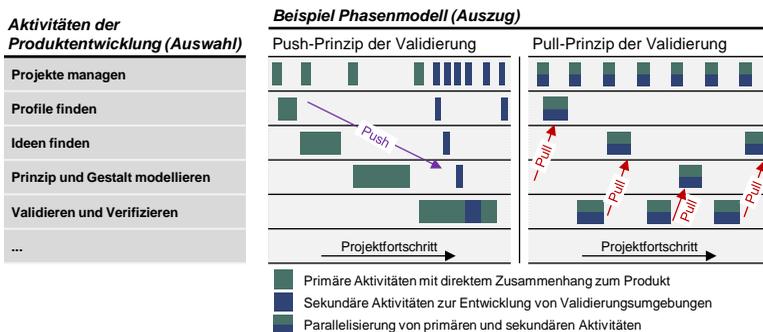


Abbildung 2.35: Push-Prinzip und Pull-Prinzip der Validierung nach Albers, Matros, Behrendt et al. (2015, S. 78)

Das *Push-Prinzip* orientiert sich an klassische, phasenorientierte Vorgehensmodelle, in denen die Validierung erst mit konkreten Entwicklungsartefakten (bspw. physischen Prototypen) und stets nachgelagert stattfindet (Klingler, 2017). In diesem Sinne werden Kernaktivitäten der Produktentstehung (bspw. Finden von Produktprofilen oder Modellieren von Prinzip und Gestalt) vollständig abgeschlossen, bevor die Vorbereitung und Durchführung der Validierungsaktivitäten begonnen werden. (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Matros, 2016)

Das *Pull-Prinzip* versteht die Validierung demgegenüber als zentrale, prozessbegleitende Aktivität (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015). Der Bedarf an Validierungsaktivitäten wird frühzeitig und proaktiv auf Basis technologischer und marktlicher Unsicherheit identifiziert und daraufhin diejenigen Artefakte (bspw. Produktprofil, Prototyp, Simulationsmodell) entwickelt, die erforderliche Erkenntnisse und Wissen generieren sowie zur Erreichung des Validierungsziels beitragen (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Effizientere Planung und Parallelisierung der primären und sekundären Validierungsaktivitäten (vgl. Abbildung 2.35) nach dem Pull-Prinzip unterstützt frühzeitige Definition der Validierungsbedarfe, frühzeitiges Einbringen gewonnenen Wissens und letztlich den Markterfolg des zu entwickelnden Produkts. (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Matros, 2016)

In der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses muss der Produktentwickelnde bei der Validierung einige Hindernisse überwinden, die sich aus den Charakteristika dieser Entwicklungsphase ergeben (vgl. Abschnitt 2.2.5). Eine Eingrenzung und Priorisierung von Validierungsaktivitäten ist mit Unsicherheit in Bezug zu Kunden- und Anwenderanforderungen behaftet, da relevantes Wissen häufig implizit vorhanden und spärlich dokumentiert ist – was sich wiederum in abstrakt formulierten Validierungszielen niederschlägt (Klingler, 2017). In der Frühen Phase stützt sich die Validierung zudem auf modellbasierte Methoden und Referenzsystem-Elemente, deren Eigenschaften und Merkmale das zu entwickelnde Produkt aufgrund der verfügbaren, zeitlichen und finanziellen Ressourcen oder unzureichender Wiedergabetreue nicht abbilden können (Albers & Düser, 2011). In der industriellen Praxis werden zur Einbindung aller relevanten Stakeholder zunehmend Techniken der *virtuellen Produktentwicklung* wie bspw. virtuelle Simulationsmodelle oder Produktmodelle auf Basis der *Virtual- oder Augmented-Reality-Technologie* als zusätzliche Unterstützung eingesetzt (vgl. z.B. Albers & Düser (2011), Verworn & Herstatt (2007), Seiffert & Rainer (2008) und Wiedemann (2014)).

2.3.3.3 Validierungsansätze

In Abhängigkeit von Entwicklungsphase und Reifegrad des zu entwickelnden Produkts bzw. Systems werden verschiedene *Validierungsmethoden und -ansätze* genutzt (Klingler, 2017). In der Frühen Phase stehen der Validierung im Speziellen häufig nur einzelne Teile des Produkts mit heterogenen Reifegraden zur Verfügung. Da Kunden-

und Anwendernutzen im Sinne der Emergenz sich erst aus dem Verhalten des Gesamtprodukts generieren, werden stets die Wechselwirkungen des betrachteten (Sub-)Systems mit allen relevanten, umgebenden Systemen in der Validierung abgebildet. Dazu werden einerseits geeignete Restsystem-Modelle und zusätzliche Umwelt- und Kunden-/Anwender-Modelle in die Betrachtungen einbezogen. (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Klingler, 2017; Matros, 2016)

Eine Übersicht der gängigsten Validierungsansätze sowie eine spezifische Erläuterung des *IPEK-X-in-the-Loop (IPEK-XiL) Ansatzes* finden sich in Anhang A.2.2.

Den Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase steht die zentrale Herausforderung einer Überführung relevanter (Produkt-)Eigenschaften in verkürzte Produktmodelle, sogenannte Prototypen, gegenüber, um die Erfüllung eines Validierungsziels zu gewährleisten. Auf Grundlage des IPEK-XiL-Validierungsframeworks nutzen Reinemann, Hirschter, Mandel et al. (2018) Referenzsystem-Elemente (RSE) unmittelbar als Bestandteil physisch-virtueller Prototypen in einem methodischen Vorgehen zur Validierung von Produkten in *Augmented Reality-Umgebungen* (AR-Umgebungen). Daran knüpft eine Priorisierung, Auswahl und Konkretisierung lösungsoffener Produkteigenschaften in Synthese-Validierungszyklen auf Basis initialer Zielsysteme an (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019; Reinemann, 2021). Nichtsdestotrotz ist es zur Freigabe der Markteinführung eines Produktes unumgänglich, reale Versuche an Sub- oder Gesamtsystemen durchzuführen (Geier, Stier, Düser et al., 2009).

In der Versuchsmethodik kann daher im Sinne einer *integrierten Entwicklungsumgebung*³³ die Simulation, bspw. des Systemverhaltens oder von Umwelteinflüssen und Umgebungseigenschaften, in den Realversuch integriert werden. Hierbei bedarf es einer einheitlichen Klassierung einzelnen interagierender Subsysteme und deren Wechselwirkungen in der Modellbildung und -implementierung (Geier, Stier, Düser et al. (2009), vgl. Abbildung 2.36).

³³ engl. Integrated Development Environment (IDE)

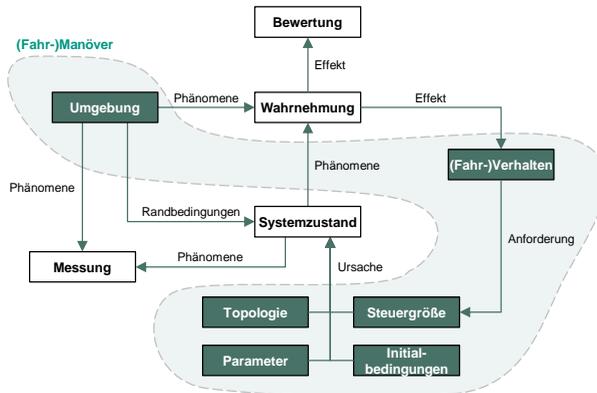


Abbildung 2.36: (Sub-)Systemklassierung und -wechselwirkung zur Abbildung der Verknüpfung von Manövern und Phänomenen im Kontext der Noise Vibration Harshness Validierung von Fahrzeugen nach Geier, Stier, Düser et al. (2009, S. 5)

Am Beispiel von Antriebssystemversuchen äußert sich der Systemzustand in *Phänomenen* wie bspw. „*Getrieberasseln*“ (vgl. Abbildung 2.36). Der *Kunden/Anwender* (bzw. in diesem Fall Fahrer) nimmt diese (System-)Phänomene zusammen mit umweltinduzierten Phänomenen wahr. Dies wirkt sich einerseits auf seine *subjektive Bewertung* des Antriebssystems und andererseits auf sein *individuelles Verhalten* in Interaktion mit dem Fahrzeug unter umweltbedingten Randbedingungen aus. *Topologie*, *Parameter* und *Initialbedingungen* sowie *Fahrer-induzierte Steuergrößen* charakterisieren und beeinflussen das Antriebssystem bzw. dessen *Zustand*. Diese vier Größen können jedoch dynamische Veränderungen im Zusammenspiel mit Fahrer und Umwelt erfahren, sodass man dabei von *(Fahr-)Manövern* spricht. Im Zuge einer Objektivierung lassen sich Phänomene aus Umwelt und System ebenso über Messtechnik erfassen oder in simulative Auswertelgorithmen einspielen. Das Beispiel in Abbildung 2.36 verdeutlicht, wie eng Manövern und Phänomene zueinander in Wechselwirkung stehen. Die Auftretswahrscheinlichkeit gewisser Phänomene ist mit dem Verlauf bestimmter Manövern verknüpft, daher muss sich die Modellierung einerseits für die Analyse eines Phänomens und andererseits für das durchzuführende Manöver eignen. (Geier, Stier, Düser et al., 2009)

2.3.4 Zwischenfazit: Schlüsselfaktoren

Die bedeutende Rolle der *Produktspezifikation* in der Frühen Phase ist eng mit der frühzeitigen und kontinuierlichen Generierung von Wissen durch Validierung verknüpft. Der *Schlüsselfaktor* hierbei ist eine *Stakeholder-Zentrierung* in den Aktivitäten des Spezifizierens unterschiedlicher Systemelemente einer Produktgeneration. Methoden der Standardisierung und der systematischen Entwicklungsvorhersage als Eingangsgrößen für die Spezifikation fokussieren sich jedoch vornehmlich auf physische Elemente bzw. Technologien. Die Betrachtung von *Funktionen des Gesamtprodukts* in den Aktivitäten der Spezifikation bieten hingegen die Chance, einerseits die Stakeholdersicht in der Frühen Phase zu stärken und dies andererseits mit Methoden zur Unterstützung des Produktentwickelnden (bspw. *Funktions-Roadmapping*) zu verknüpfen. Analog der Baukastenentwicklung sollte hierbei ein *Produktportfolio-übergreifender Fokus* gesetzt werden, um *Synergiepotentiale* zu heben und Aufwand, Kosten und Zeit zu sparen.

2.4 Fazit: Forschungslücke und Erfolgsfaktoren

Auf Grundlage der Diskussion des *systemischen Verständnisses in der Produktentstehung* (vgl. Abschnitt 2.1) wurden in Kapitel 2 die zentralen Modelle, Ansätze und Methoden zur *Produktspezifikation in der Frühen Phase* (vgl. Abschnitt 2.3) eingeführt. Die Inhalte der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung* liefern hierbei das modelltheoretische Fundament für die weiteren Betrachtungen der vorliegenden Forschungsarbeit. Das *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS (vgl. Abschnitt 2.2) dient im Zuge dessen als zentrales Element in der Weiterentwicklung prozessualer und methodischer Unterstützung und letztlich dem Schließen der identifizierten Forschungslücke aus dem Stand der Forschung.

In der bisherigen Forschung zur Produktspezifikation in der Frühen Phase liegt der Schwerpunkt überwiegend auf den lösungsspezifischen, physischen Elementen, deren technische Machbarkeit unter Berücksichtigung ökonomischen Risikos untersucht wird. Solche Ansätze beinhalten jedoch selten Aspekte der *Spezifikation aus Funktionssicht*. Die Abgrenzung zwischen *technischen Funktionen* und *Funktionen des Gesamtproduktes*, die einen direkt wahrnehmbaren Wert für Stakeholder (u.a. Kunde/Anwender) schaffen, wurde bisher noch nicht systematisch analysiert und durchgeführt. Eine Verallgemeinerung des Funktionsbegriffs ist problematisch anzusehen und gerade in der Frühen Phase nicht zielführend. Anknüpfend an diese Feststellung fehlt es folglich an einem *generischen Produktmodell*, das den Produktentwickelnden beim Spezifizieren komplexer Produkte über verschiedene Sichten (Eigenschaften, Funktionen, physische Elemente) und Systemebenen leitet und unterstützt. Der Schlüssel

liegt hierbei im Einbeziehen von *Referenzen* und dem *Systemtripel aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem* in ein *aktivitätsbasiertes, dynamisches Produktmodell*. Nicht zuletzt zeigt die Baukastenentwicklung physischer Elemente die *Synergien* und *Potentiale* einer *Produktportfolio-übergreifenden Betrachtung* auch von *Funktionen* in der Produktspezifikation auf.

	Erfolgsfaktoren				
	Systemdenken	Stakeholder-Zentrierung	lösungsoffene/-spezifische Elemente	Referenzsystem-Elemente	Basisaktivitäten der Produktentwicklung
Erfolgsfaktoren:					
vorhanden					
teilweise vorhanden					
nicht vorhanden					
Generische Referenz-Produktmodelle/-methoden der Produktspezifikation					
<i>Systementwicklung als Informationsfluss</i> [Abschnitt 2.1.1.2]					
<i>Hierarchische Modellierung von technischen Systemen (Pyramidenmodell)</i> [Abschnitt 2.1.2.2]					
<i>Modellraum des Konstruierens</i> [Abschnitt 2.1.3.2]					
<i>V-Modell (VDI Richtlinie 2206:2004-06)</i> [Abschnitt 2.1.3.4 bzw. Anhang A.1.3]					
<i>Der Entwurfsraum als Grundstruktur des Entwicklungsgeschehens</i> [Abschnitt 2.1.3.4]					
<i>Münchener Produktkonkretisierungsmodell</i> [Abschnitt 2.1.3.5]					
<i>Kaiserslauterner Systemkonkretisierungsmodell</i> [Abschnitt 2.1.3.5]					
Ansätze der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung					
<i>Systemtheorie</i> [Abschnitt 2.1.1]					
<i>Erweitertes ZHO-Modell</i> [Abschnitt 2.1.3.3]					
<i>Referenzsystem im Modell der PGE</i> [Abschnitt 2.2.3]					
<i>Verifikation und Validierung im PEP</i> [Abschnitt 2.3.3]					
<i>IPEK-X-in-the-Loop Framework</i> [Abschnitt 2.3.3.3 bzw. Anhang A.2.2]					

Abbildung 2.37: Berücksichtigung der identifizierten Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation in relevanten, bestehenden Ansätzen und Modellen in der Literatur (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 359)

Aus der Diskussion der Grundlagen und des Stands der Forschung konnten zusammenfassend *fünf übergreifende Erfolgsfaktoren* identifiziert werden (vgl. Abbildung 2.37): *Systemdenken*, *Stakeholder-Zentrierung*, *Differenzierung lösungsoffener und lösungsspezifischer Elemente*, *Referenzsystem-Elemente (RSE)* und *aktivitätsbasierte Dynamik* (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020).

In Bezug auf die KaSPro finden alle fünf Erfolgsfaktoren in fragmentierter Weise über verschiedene Ansätze hinweg Beachtung (vgl. Abbildung 2.37). Das *Systemdenken* wird von den wenigsten der darüber hinaus betrachteten Modelle vollumfänglich berücksichtigt und bietet Potentiale zur Weiterentwicklung. Wenngleich alle Modelle – mit Ausnahme des Pyramidenmodells der Produktkonkretisierung (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) – Aktivitäten des Zerlegens und Zusammenführens eines Produktes integrieren, fehlt ihnen eine Systemorientierung bei der Definition und Beschreibung von Systemen und Subsystemen sowie deren hierarchischen Beziehungen (vgl. Konzepte der Systemtheorie nach Ropohl (2009) in Abschnitt 2.1.1.2). Zudem vernachlässigen die Ansätze die Möglichkeit, das Produkt nicht nur als monolithisches System-of-Subsystems, sondern als System-of-Systems in seinem Ökosystem (vgl. Abschnitt 2.1.1.3) zu berücksichtigen. Eine starke Anerkennung findet die *Stakeholder-Zentrierung* im Kaiserslauterer Systemkonkretisierungsmodell (vgl. Abschnitt 2.1.3.4), das kontinuierliche Verifikations- und Validierungsaktivitäten ermöglicht, die Lösungselemente auf jeder Konkretisierungsebene mitbestimmen. Das IPEK-X-in-the-Loop-Framework integriert die Stakeholder-Zentrierung durch allgegenwärtige Validierungsaktivitäten mit dem Denken in Systemen. Die Berücksichtigung von *lösungsoffenen und lösungsspezifischen Elementen* wird in den Ansätzen, die hierfür jeweils eine Ebenen-basierte Struktur anwenden, vollumfänglich anerkannt und umgesetzt. *Referenzsystem-Elemente (RSE)* bleiben in den generischen Referenzmodellen völlig unberücksichtigt. Da die Ansätze von Stakeholder-Anforderungen als exogene Inputvariablen ausgehen, weisen sie auf eine Entwicklung auf dem „*weißen Blatt Papier*“ hin und vernachlässigen daher das Konzept eines Referenzsystems, wie es im Modell des PGE (vgl. Abschnitt 2.2.3) verankert ist. Schließlich integrieren alle generischen Referenzmodelle und -methoden mindestens partiell *grundlegende Aktivitäten der Produktentwicklung*. Dies zeigt sich insbesondere im erweiterten ZHO-Modell und der Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess nach ALBERS, die das Spezifizieren von Struktur und Inhalt eines Produkts auf Grundlage iterativer Aktivitäten beschreiben. Die Modelle stellen Aktivitäten zum Hinzufügen/Entfernen und Verknüpfen von Elementen der Spezifikation auf einer Ebene oder zwischen verschiedenen Ebenen bereit, um das Zerlegen und Zusammenführen, Konkretisieren und Abstrahieren oder Erweitern und Eingrenzen des Lösungsraumes zu erlauben. Nichtsdestotrotz lassen sie keine weiteren Entwicklungsaktivitäten zu, die den *dynamischen Charakter* eines Produkts während der gesamten Entwicklung veranschaulichen, sondern konstatieren eine konstante und iterative Abhängigkeit zwischen jedem spezifizierten Element. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird zur abschließenden *Klärung des Forschungsgegenstandes* (Blessing & Chakrabarti, 2009) die Zielsetzung und Vorgehensweise der vorliegenden Forschungsarbeit erörtert.

3.1 Zielsetzung

Anknüpfend an das Fazit aus Grundlagen und Stand der Forschung in Kapitel 2 wird zunächst der *Forschungsbedarf* zur Überleitung auf das *Ziel dieser Forschungsarbeit* erläutert. Die Zielsetzung wird darauffolgend in drei zentralen *Forschungshypothesen* fokussiert und schließlich durch nach SPALTEN (vgl. Abschnitt 2.1.3.1) strukturierte *Forschungsfragen* operationalisiert.

3.1.1 Forschungsbedarf und -ziel

Im Rahmen der Klärung des Forschungsgegenstandes über die Literaturrecherche im vorangehenden Kapitel wurden verbreitete, generische Referenzmodelle und -methoden (vgl. Abbildung 2.37), die sich auf die Produktspezifikation in der Frühen Phase konzentrieren, betrachtet. Diese Modelle und Werkzeuge zeichnen sich größtenteils durch universell anwendbare Frameworks für die Produktentwicklung in wissenschaftlichen und praktischen Kontexten aus. Die Ansätze berücksichtigen jedoch in keiner tauglichen Weise Referenzen aus vorangehenden Produktentwicklungen. Einzig das *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS (vgl. Abschnitt 2.2) fußt auf dem systematischen Nutzen eines Referenzsystems durch den Produktentwickelnden. Ein weiterer Schwerpunkt der Betrachtungen lag auf etablierten und Spezifikations-bezogenen Ansätzen der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Motiviert wird dies durch die starken Forschungsanstrengungen und zahlreiche daraus resultierende Modelle zur Produktspezifikation, die in der KaSPro angesiedelt sind. Dazu zählen u.a. das *erweiterte ZHO-Modell* (vgl. Abschnitt 2.1.3.2), das Verständnis der *frühzeitigen und kontinuierlichen Validierung* im Produktentstehungsprozess (vgl. Abschnitt 2.3.3.2) oder das *IPEK-X-in-the-Loop Validierungsframeworks* (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

Die im Stand der Forschung identifizierten *fünf Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation* (vgl. Abschnitt 2.4 und Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020)):

- *Systemdenken,*
- *Stakeholder-Zentrierung,*
- *Differenzierung lösungsoffener und lösungsspezifischer Systemelemente,*
- *Referenzsystem-Elemente (RSE) und*
- *Aktivitätsbasierte Dynamik*

werden durch die generischen Referenzmodelle und -methoden in unterschiedlichem Umfang einbezogen. Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass keines der betrachteten Referenzmodelle und -methoden jeden der fünf Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation integriert. In Bezug auf die KaSPro finden hingegen alle Erfolgsfaktoren in fragmentierter Weise über verschiedene Ansätze hinweg Beachtung. Daher ist es erforderlich, bestehende Ansätze zu verschmelzen, um ein umfassendes, *generisches Referenz-Produktmodell* (vgl. Abschnitt 2.1.2.2 und Abbildung 2.8) zu erstellen, das die Produktspezifikation in Theorie und Praxis unterstützt.

Aus dieser neuen Erkenntnis zu den *Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation* und dem *Paradigmenwechsel in der Automobilindustrie* ergeben sich zudem *Forschungsbedarfe* insbesondere zum *Spezifizieren aus Funktionssicht*. In der vorliegenden Forschungsarbeit soll ein wissenschaftlicher Beitrag zur Integration der Erfolgsfaktoren in prozessuale und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden beim Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes in zunehmend diversifizierten Anbieter-Produktportfolios geleistet werden. Vor diesem Hintergrund eignet sich das praxisnahe, wissenschaftlich begründete *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS, welches das Fundament der entwicklungsmethodischen Forschung dieser Arbeit bildet. Weiterhin bedarf es eines *konsistenten Verständnisses von Funktionen und deren Abbildung auf Basis des Referenzsystems im Modell der PGE*. Die automobilen Produktentwicklung muss darüber hinaus durch einen systematisierten *Referenzprozess und methodische Unterstützung der Produktentwickelnden beim Spezifizieren aus Funktionssicht im Modell der PGE* unterstützt werden. Der Forschungsbedarf mündet daher in folgender Zielsetzung.

Ziel der Forschungsarbeit:

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, den Produktentwickelnden bei dem effektiven Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes in der Produktspezifikation prozessual und methodisch im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung zu unterstützen.

3.1.2 Forschungshypothesen

Die dargestellte Zielsetzung wird in drei zentralen Forschungshypothesen fokussiert. Die drei Annahmen greifen den Bedarf der Erforschung eines Referenz-Produktmodells zum Spezifizieren komplexer Produkte, dem konsistenten Verständnis und der Abbildung von Funktionen des Gesamtprodukts in der Frühen Phase sowie der methodischen Unterstützung des Produktentwickelnden beim Spezifizieren aus Funktionssicht im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS auf.

Forschungshypothese 1 (Funktionsverständnis und -abbildung):

Das Spezifizieren aus Funktionssicht erfordert ein(e) konsistente(s) Verständnis, Abbildung und Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes zur Produktspezifikation im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung.

Forschungshypothese 2 (Referenz-Produktmodell):

Das Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes führt zu einer komplexen Verknüpfung von Eigenschaften und physischen Elementen, die eine generische, Modell-gestützte Strukturierung zum Spezifizieren komplexer Produkte erfordert.

Forschungshypothese 3 (Referenzprozess & methodische Unterstützung):

Der Produktentwickelnde kann bei dem Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes prozessual sowie methodisch im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung unterstützt werden und dies in der automobilen Produktentwicklung effektiv anwenden.

3.1.3 Forschungsfragen

Ausgehend vom Forschungsbedarf und den zugrundeliegenden Forschungshypothesen werden dazu jeweils Forschungsfragen formuliert. Vor dem Hintergrund der Operationalisierung der Zielsetzung sollen die Forschungsfragen das Vorgehen strukturieren. Die systematische Beantwortung der Forschungsfragen kann in diesem Zusammenhang als Problemlösungsprozess aufgefasst werden, daher wurden die Forschungsfragen nach der SPALTEN Problemlösungsmethodik (vgl. Abschnitt 2.1.3.1) strukturiert.

Forschungsfragen (FF) zu Forschungshypothese 1:

- FF1.1** Welche Besonderheiten charakterisieren Funktionen in Literatur und automobiler Produktentwicklungspraxis in Bezug auf die Frühe Phase im Modell der PGE? (SPA)
- FF1.2** Wie lassen sich die Phänomene der Variation von Funktionen im Modell der PGE generalisieren? (L)
- FF1.3** Wie wirken sich die Variationen von Funktionen auf physische Elemente aus? (T)
- FF1.4** Wie lässt sich eine konsistente Auffassung von Verständnis, Abbildung und Modellierung von Funktionen im Modell der PGE entwickeln? (E)
- FF1.5** Inwieweit lassen sich das Verständnis, die Abbildung und Modellierung von Funktionen in der Produktentwicklungspraxis durch den Produktentwickelnden effektiv nutzen? (N)

Forschungsfragen (FF) zu Forschungshypothese 2:

- FF2.1** Welche relevanten Erfolgsfaktoren zur Produktspezifikation können in der Produktentwicklungspraxis identifiziert werden? (SPA)
- FF2.2** Welche Referenzsystem-Elemente sind im Rahmen der Produktspezifikation verfügbar und wie können ihre Informationen für das Spezifizieren aus Funktions- und Eigenschaftssicht genutzt werden? (LT)
- FF2.3** Wie lassen sich diese Informationen und Zusammenhänge in einem generischen Referenz-Produktmodell abbilden und Aktivitäten daraus ableiten? (E)
- FF2.4** Wie kann eine Modell-gestützte Strukturierung zum Spezifizieren komplexer Produkte den Produktentwickelnden bei einer effektiven Produktspezifikation unterstützen? (N)

Forschungsfragen (FF) zu Forschungshypothese 3:

- FF3.1** Wie, wann und wo werden Funktionen des Gesamtproduktes aktuell für einen übergreifenden Einsatz in unterschiedlichen Produktgenerationen/-linien in der Automobilentwicklung spezifiziert? (S)
- FF3.2** Welcher konkrete Bedarf an Unterstützung der Spezifikation von Produktkonzepten aus Funktionssicht besteht in der Produktentwicklung? (P)
- FF3.3** Wie sehen alternative Lösungen einer Produktportfolio-übergreifenden Spezifikation aus Funktionssicht aus? (A)
- FF3.4** Was lässt sich aus dem generierten Wissen in Bezug auf prozessuale und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden induzieren? (LT)
- FF3.5** Wie lässt sich ein Vorgehen zum Spezifizieren aus Funktionssicht im Modell der PGE abbilden und methodisch für den Produktentwickelnden unterstützen? (E)
- FF3.6** Wie effektiv kann der Produktentwickelnde einen Referenzprozess und die methodische Unterstützung in der automobilen Sportwagenentwicklung anwenden? (N)

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen sowie die Verortung in der Struktur dieser Arbeit wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.2 Vorgehensweise

Die wissenschaftliche Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit wird nachfolgend vorgestellt. Die Vorgehensweise innerhalb eines Forschungsprojektes muss systematisch geplant werden und zielgerichtet sein, um eine nachvollziehbare Argumentationskette aufzubauen und belastbare Ergebnisse zu erzielen (Blessing & Chakrabarti, 2009). Grundlage bildet die *Design Research Methodology* (DRM) nach Blessing & Chakrabarti (2009), an die sich das Vorgehen in dieser Arbeit anlehnt. Die verwendeten empirischen Methoden sowie die Untersuchungsumgebung werden darauffolgend beschrieben.

3.2.1 Forschungsmethode

Die von Blessing & Chakrabarti (2009) entwickelte *Design Research Methodology* (DRM) verfolgt das Ziel, eine systematische und allgemeingültige Struktur für Forschungsarbeiten speziell aus dem Bereich der anwendungsorientierten Methodenforschung in der Produktentwicklung bereitzustellen. Das Forschungsvorgehen strukturiert sich in vier Phasen (Blessing & Chakrabarti, 2009):

- Die *Klärung des Forschungsgegenstands* bildet die initiale Phase im Vorgehensmodell der DRM. Eine Einordnung des Forschungsthemas in Grundlagen und den Stand der Forschung bildet die Ausgangsbasis zur Ableitung von Zielsetzung und Forschungsfragen.
- In Zuge einer *Deskriptiven Studie I* (DS-I) wird das zuvor gewonnene Verständnis des Forschungsgegenstands mittels weitergehender, mitunter empirischer Analysen vertieft. Aus den Untersuchungen werden Anforderungen an die zu entwickelnde Methode oder Systematik deduziert.
- In der *Präskriptiven Studie* (PS) wird anschließend die Methode oder Systematik zur Unterstützung des Produktentwickelnden entwickelt. Die Ausarbeitung der Methode oder Systematik erfolgt dabei in Anbetracht der geforderten Unterstützungsleistung, deren Erfüllung bereits während der PS über die sogenannte *Unterstützungsevaluierung* zu überprüfen ist.
- Die entwickelte Methode/Systematik wird in der *Deskriptiven Studie II* (DS-II) evaluiert. Die Evaluation erfolgt dabei hinsichtlich der Erfüllung der Anwendbarkeit der Methode/Systematik (*Anwendbarkeitsevaluierung*) und des Erfolgsbeitrags der Methode/Systematik (*Erfolgsevaluierung*).

In Abbildung 3.1 ist das Framework der DRM in Bezug zu der vorliegenden Forschungsarbeit dargestellt.

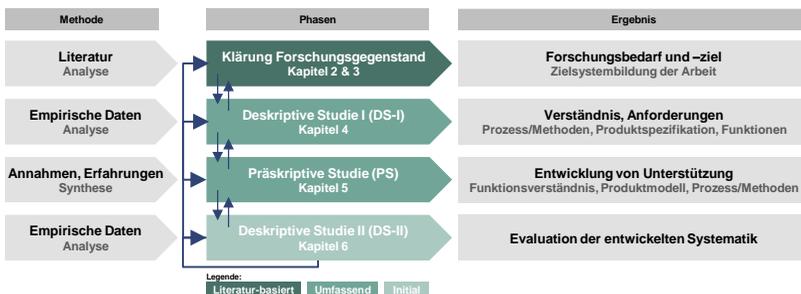


Abbildung 3.1: Design Research Methodology (DRM) in Bezug zur vorliegenden Arbeit nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 15)

In Abhängigkeit von der Art des Forschungsvorhabens können die vier generischen Phasen in unterschiedlichem Umfang durchlaufen werden. In diesem Zusammenhang unterscheiden Blessing & Chakrabarti (2009) zwischen einem *rein literaturbasierten* Studiendesign, einer *umfassenden* Studie sowie einer *initialen* Studie. Infolgedessen ergeben sich durch die verschiedenartige Kombination dieser Ausprägungen von Klärung des Forschungsgegenstandes, DS-I, PS und DS-II sieben mögliche Typen von Forschungsprojekten in der Produktentwicklung (vgl. Abbildung 3.2)

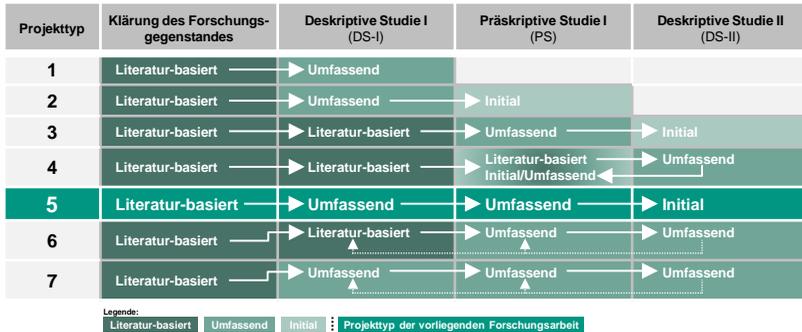


Abbildung 3.2: Mögliche Typen von Forschungsprojekten in der Produktentwicklung nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 18) und Zuordnung der vorliegenden Arbeit zu Projekttyp 5

Die Vorgehensweise des Forschungsprojekts, das dieser vorliegenden Arbeit zugrunde liegt, entspricht der des fünften Projekttyps. Ein Forschungsprojekt dieser Art ist eine Kombination der Typen 2 und 3. Ziel ist es, Unterstützung zu entwickeln, aber das Niveau des Verständnisses der bestehenden Situation in der Produktentwicklungspraxis ist dürftig (Blessing & Chakrabarti, 2009). Zum tieferen Verständnis von Ablauf und Aktivitäten realer Entwicklungsprojekte sowie der Veränderung und Reflexion unmittelbar problematischer Produktentstehungssituationen war der Forscher der vorliegenden Arbeit zur empirischen Analyse ebenso als teilnehmender Praktiker in die multidimensionalen Untersuchungsumgebungen (vgl. Abschnitt 3.2.3) integriert. Die gewählte Vorgehensweise der praxisnahen Forschung lässt sich als *Action Research* und somit als iterativer Prozess beschreiben, bei dem Forscher und Praktiker gemeinsam an einem bestimmten Zyklus von Aktivitäten arbeiten (Avison, Lau, Myers et al., 1999). Daher beinhaltet Projekttyp 5 des Forschungsvorgehens sowohl die tiefgreifende *Situationsanalyse zur Problemeingrenzung*, *Alternative Lösungssuche* und *Tragweitenanalyse* (umfassende DS-I) sowie darauf aufbauend die *Entwicklung* und *Implementierung* von *methodischer Unterstützung* (umfassende PS). Wie bei jeder umfassenden Präskriptiven Studie folgt darauf eine initiale *Evaluation* der Systematik

(initiale DS-II) zur *Nachbereitung* der Forschungsergebnisse und dem *Lernen* für zukünftige Transferanwendungen. Eckert, Clarkson & Stacey (2003) betonen, dass erfolgreiche Werkzeuge und Verfahren in einer ernsthaften industriellen Anwendung getestet werden sollten, um die Verbreitung von Forschungsergebnissen zu unterstützen. Darüber hinaus bietet *Action Research* die Möglichkeit, nützliche Forschungserkenntnisse über die Entwurfspraxis, den Implementierungsprozess sowie über die methodische Unterstützung des Produktentwickelnden selbst durchzuführen (Eckert, Clarkson & Stacey, 2003).

Zur Klärung des Forschungsgegenstands wurden anhand einer tiefgreifenden Literaturanalyse relevante Grundlagen und Stand der Forschung untersucht (Kapitel 2). Die Zielsetzung sowie die Forschungshypothesen und -fragen wurden basierend darauf abgeleitet (Kapitel 3). Die Literaturanalyse zur Klärung des Forschungsgegenstandes bildet gleichzeitig Grundlage für die durchgeführte DS-I. In einer umfassenden DS-I (Kapitel 4) werden drei empirische Studie durchgeführt. Zunächst werden *Prozesse und Methoden der funktionalen Produktspezifikation* in der automobilen Produktentwicklungspraxis analysiert. Anschließend wird der *Unterstützungsbedarf* analysiert und daraus *Lösungsansätze zum Spezifizieren aus Funktionssicht* generiert. In der dritten Studie findet zum Abschluss der DS-I eine *Bewertung und Tragweitenanalyse des Funktionsverständnisses und -abbildung* in der Frühen Phase statt. Aufbauend auf den aus der DS-I abgeleiteten Anforderungen folgt eine umfassende PS (Kapitel 5), die aus drei Bausteinen besteht: *Verständnis und Abbildung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE, generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration* und ein *Referenzprozess sowie methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE*. Die entwickelte Systematik wird anschließend in einer initialen DS-II (Kapitel 6) sowohl in der Sportwagenentwicklung bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG als auch im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung evaluiert.

3.2.2 Empirische und Literatur-basierte Methoden

Die Design Research Methodology (DRM) nach Blessing & Chakrabarti (2009) eignet sich dazu, Forschungsprojekte systematisch zu planen. Das Framework der DRM weist allerdings nicht ausreichend auf die konkreten Methoden hin, die den Methodenentwickler beim praktischen Vorgehen innerhalb der Forschung unterstützen. Auf Basis des iPeM (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) wurde von Marxen (2014) das *integrated Design Support Development Modell* entwickelt (vgl. Abbildung 3.3).

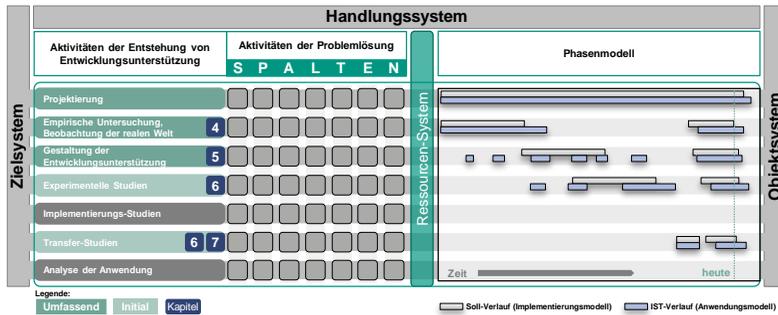


Abbildung 3.3: Integrated Design Support Development Modell nach Marxen (2014, S. 179) und in Bezug zur vorliegenden Arbeit

Das Metamodell ermöglicht eine Abbildung des Vorgehens im Phasenmodell und unterstützt den Forscher bei der Auswahl geeigneter Methoden. Wie aus dem Phasenmodell ersichtlich wird, verlief die Forschungsarbeit in Wirklichkeit stark iterativ, wird hinsichtlich der schriftlichen Ausarbeitung im Text jedoch sequenziell elaboriert.

Die konkreten Forschungsmethoden, die durch Auswahl in den einzelnen Phasen – insbesondere im Rahmen der Deskriptiven Studien in Kapitel 4 und 6 – zur Anwendung kommen werden im Anhang B näher vorgestellt. Die Gründe für die Selektion der Methoden ist im zugehörigen Steckbrief jeweils farblich hervorgehoben. In den Steckbriefen sind zudem die Anwendungsfelder sowie Vor- und Nachteile der Methoden dargestellt (vgl. Abbildung B.1 bis Abbildung B.7).

3.2.3 Untersuchungsumgebungen

Zur Durchführung der empirischen Studien sowohl in Kapitel 4 als auch Kapitel 6 wurden verschiedene Untersuchungsumgebungen genutzt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

3.2.3.1 Volkswagen AG

Die *Volkswagen AG* ist ein 1937 in Berlin gegründeter, deutscher und gleichzeitig weltweit größte Automobilhersteller mit Sitz im niedersächsischen Wolfsburg. Die heutige Volkswagen AG agiert als der Mutterkonzern der Fahrzeugmarke Volkswagen Pkw und integriert darüber hinaus die Tochtergesellschaften Seat, Škoda Auto, Audi und die Luxusmarken Porsche, Bentley, Bugatti, Lamborghini und Ducati (Motorräder). Ferner zählen die Gesellschaften Volkswagen Nutzfahrzeuge, MAN und Scania zur

Nutzfahrzeugsparte der Volkswagen AG. Das Stammwerk der Volkswagen AG befindet sich in Wolfsburg, mit 123 weiteren Produktionsstandorten (6 in Nordamerika, 9 in Südamerika, 72 in Europa – davon 28 in Deutschland, 4 in Afrika und 33 in Asien). Im Jahr 2019 arbeiteten circa 119.000 Mitarbeiter bei der Volkswagen AG (ohne Tochtergesellschaften, insgesamt circa 671.000 Mitarbeiter) und verkaufte circa 10.956.000 Fahrzeuge. Die Volkswagen AG erwirtschaftete 2019 einen Umsatz von 252,63 Mrd. € und 19,29 Mrd. € Gewinn. (Volkswagen AG, 2020)

3.2.3.2 Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Die *Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG* ist ein 1931 in Stuttgart gegründeter deutscher Automobilhersteller mit besonderem Fokus auf die Entwicklung von Sportwagen und Sitz im baden-württembergischen Stuttgart-Zuffenhausen. Seit 2012 ist das Unternehmen in den Volkswagen-Konzern integriert und agiert dabei mit eigener Markenidentität und in operativer Eigenverantwortung. Das Stammwerk der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG mit Sitz der Geschäftsführung, Vertrieb und Teilen der Produktion verweilt fortwährend in Stuttgart-Zuffenhausen. Das Entwicklungszentrum befindet sich außerhalb von Stuttgart in Weissach, ein weiterer Produktionsstandort in Leipzig. Im Jahr 2019 arbeiteten circa 35.000 Mitarbeiter für die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, circa 6.000 im Entwicklungszentrum Weissach. Das Produktportfolio zielt auf das Premium-Segment im Wettbewerb ab und umfasst exklusive zweitürige Sportwagen sowie sportliche Limousinen und Sport Utility Vehicle (SUV). Im Jahr 2019 verkaufte die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG circa 280.000 Fahrzeuge und erwirtschaftete 28,52 Mrd. € Umsatz und 4,4 Mrd. € Gewinn. In Abbildung 3.4 wird schematisch die Matrixorganisation der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG aus „Baureihe“ und „Entwicklung“ dargestellt. (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2020b)

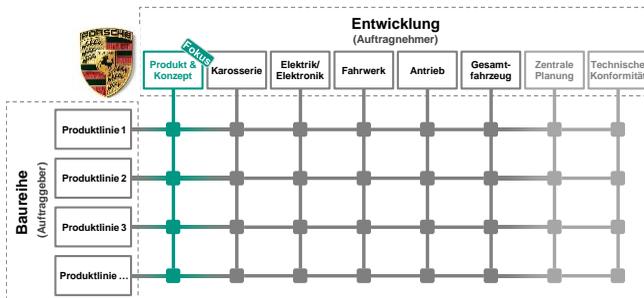


Abbildung 3.4: Betrachtungsfokus der Produkt- und Konzeptentwicklung in der Organisationsstruktur der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Anlehnung an Brass & Seiffert (2013, S. 1135)³⁴

³⁴ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Zwischen den beiden Ressorts herrscht ein unternehmensinternes Auftraggeber- und Auftragnehmer-Verhältnis. Die sogenannte „Baureihe“ definiert in ihrer Rolle eines Projekt-orientierten Managementbereichs das Zielsystem des Produktportfolios über die *Produktsubstanz* („Was“ wird am Markt eingeführt?) sowie die *zeitliche Lage* der zukünftigen Produktgenerationen („Wann“ wird am Markt eingeführt?). Die „Baureihe“ strukturiert sich insbesondere auf Basis der *Produktlinien des Produktportfolios*. Die unabhängigen, aber dennoch gleichberechtigten *Linienbereiche der Entwicklung* sind für die *Realisierung des Produktportfolio-übergreifenden Zielsystems* bis hin zur Markteinführung verantwortlich („Was“ wird „wann“ entwickelt?). Die Organisationsstruktur der „Entwicklung“ orientiert sich bisweilen an den klassischen Fahrzeugsystemen Karosserie, Elektrik/Elektronik, Fahrwerk, Antrieb sowie einem integrativen Bereich Gesamtfahrzeug. Die Frühe Phase der automatisierten Produktentwicklung wird bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in der Abteilung „Produkt & Konzept“ gebündelt – in dieser Abteilung lag der Fokus der Betrachtungen in dieser Forschungsarbeit.

3.2.3.3 Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung

Die Lehrveranstaltung *IP – Integrierte Produktentwicklung* ist ein von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers seit 1997 jährlich im Wintersemester durchgeführtes Live-Lab (vgl. Anhang B.7) am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Ein Live-Lab (vgl. Anhang B.7, Albers, Walter, Wilmsen et al., 2018; Walter, Albers, Haupt et al., 2016) erzeugt für einen begrenzten Zeitraum das Modell eines realen Anbieter-Ökosystems. Neben Vorlesung und Workshops fokussiert IP die praktische Projektarbeit. In dieser kontrollierbaren Forschungsumgebung können gezielt ausgewählte Phasen eines Prozesses oder einzelne Methoden und Fragestellungen empirisch untersucht werden. Im Kontrast zu reinen Laborstudien bearbeiten die Studierenden eine reale Entwicklungsaufgabe eines jährlich wechselnden Projektpartners aus verschiedensten Branchen. 42 Studierende der Studiengänge Maschinenbau, Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen am KIT bearbeiten in 5-7 Entwicklungsteams die gestellte Aufgabe über einen Zeitraum von fünf Monaten mit Prozessen und Methoden u.a. auf Basis des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS in fünf Phasen (vgl. Abbildung 3.5). (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017)



Abbildung 3.5: Die fünf Phasen des Live Labs IP – Integrierte Produktentwicklung (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017, S. 1017; IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020)

Eingangs wird eine initiale Analyse von Referenzprodukten am Markt sowie dem Stand der Technik durchgeführt [1], um Marktpotenziale zu identifizieren [2] und Produktprofile und -ideen zu generieren [3]. Die Entwicklung und Ausarbeitung des Konzepts [4] mündet schließlich in der Realisierung finaler Prototypen [5]. Die studentischen Entwicklungsteams stellen entsprechend der Meilensteine ihre Ergebnisse periodisch dem Projektpartner vor (vgl. Abbildung 3.5). Betreut durch wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEK sowie Senior-Manager des Projektpartners wenden die Studierenden in jeder Phase eine Vielzahl von verschiedenen Prozessen, Methoden und Tools an, die an die jeweilige Situation adaptiert werden, um den Projekterfolg sicherzustellen. Während der mehr als 20 vergangenen Jahre konnten zahlreiche Erfolgsfaktoren der Co-Kreation von Unternehmensprozessen, Studierenden und Universitäten situationsabhängig durch Beobachtungen und Evaluationen im Live-Lab IP abgeleitet werden. (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017)

Der Jahrgang 2018/2019 beschäftigte sich mit der vom IP-Projektpartner thyssenkrupp Industrial Solution AG gestellten Themenstellung zu *smarten Organismen in der zukunftsrelevanten Versorgung mit Ressourcen durch Nutzung des Potenzials von Automatisierung, Digitalisierung & Modularisierung* (vgl. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2018)). Im Wintersemester 2019/2020 bearbeiteten die IP-Studierenden eine Entwicklungsaufgabe zur *zukünftigen Mobilität für Personen und Güter auf städtischen Straßen über flexible, modulare und skalierbare Fahrzeug- und Transport-Konzepte* des Projektpartners Robert Bosch GmbH (vgl. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019)). Diese zwei Instanzen sind Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit.

3.2.3.4 re:work Smart Requirements Engineering

Das Expertenforum *re:work Smart Requirements Engineering*³⁵ ist das größte deutschsprachige Zusammentreffen zum Anforderungsmanagement in der Welt der physischen Produktentwicklung. Das jährlich stattfindende Event vereint dabei über 100 Anforderungs-, System- und Produktmanager der D/A/CH-Region, die sich mit der fehlerarmen Entwicklung komplexer Systeme in ihrem Berufsalltag beschäftigen. Im Jahr 2019 standen neben herkömmlichen Frontalvorträgen von Vertretern führender Industrieunternehmen ebenso Workshops im Fokus, in denen eine Plattform für den Austausch zu Branchen-übergreifenden Fragestellungen geboten wurde. Ein unabhängiger Moderator leitete dabei jeweils den wertvollen Erfahrungsaustausch unter den Experten und unterstützte den gegenseitigen Erkenntnisgewinn in der Diskussion.

³⁵ Der Internetauftritt ist unter folgender URL zu finden: <https://www.smart-requirements-engineering.de>, letzter Aufruf am 30.11.2020.

Die Validität der dokumentierten Ergebnisse konnten dabei durch periodisches Durchmischen der Expertengruppen stetig erhöht werden. (We.CONECT Global Leaders GmbH, 2019)

3.3 Fazit: Forschungsdesign

In diesem Kapitel wurde die Zielsetzung und das forschungsmethodische Vorgehen dieses Forschungsprojektes entlang der vier Phasen der Design Research Methodology (DRM) beschrieben. Zur Untersuchung der Transformation und Reflexion unmittelbar problematischen Situationen in der Produktentstehung verfolgte der Forscher der vorliegenden Arbeit zudem u.a. den Ansatz des Action Research (vgl. Avison, Lau, Myers et al. (1999)), um durch langfristige Integration in reale Entwicklungsumgebungen und -projekte Theorieansätze und Praxis stärker zu verbinden. In Abbildung 3.6 ist die Zuordnung der Forschungsinhalte des Forschungsprojekts, die verfolgte Zielsetzung sowie die verwendeten empirischen Methoden zu den entsprechenden DRM-Phasen zusammenfassend dargestellt.

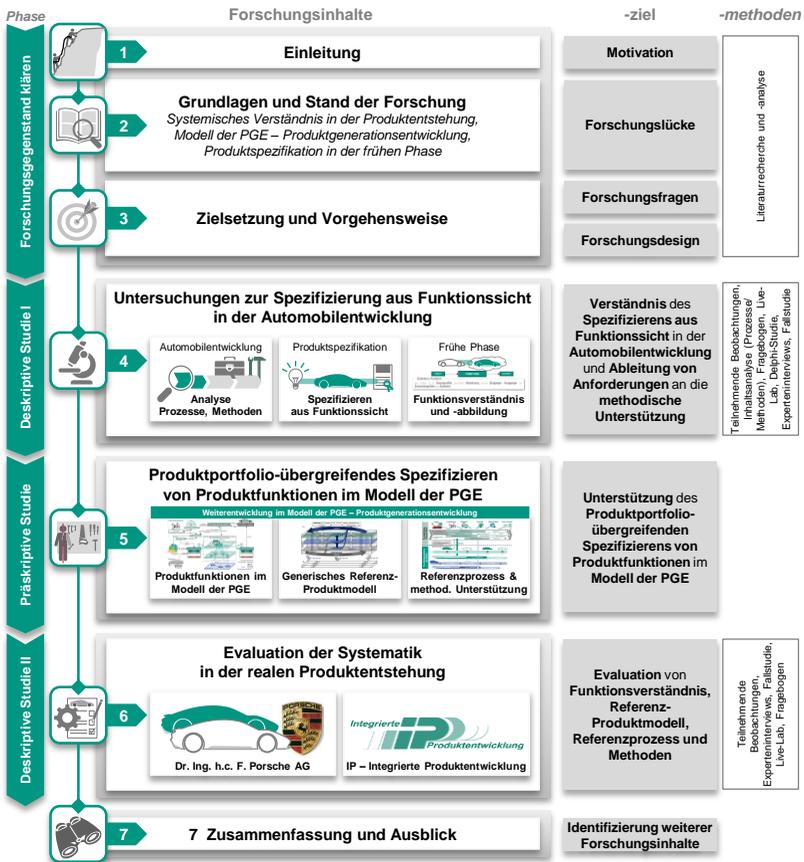


Abbildung 3.6: Übergreifende Vorgehensweise der vorliegenden Forschungsarbeit³⁶

³⁶ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, IPEK – Institut für Produktentwicklung

4 Empirische Untersuchungen zur Spezifizierung von Produktkonzepten aus Funktionssicht

In diesem Kapitel wird in Anlehnung an die Design Research Methodology (DRM, vgl. Abschnitt 3.2.1) eine umfassende *Deskriptive Studie I (DS-I)* durchgeführt, um die Literatur-basierte Klärung des Forschungsgegenstandes durch neue empirische Daten zu ergänzen. In Abschnitt 4.1 wird zunächst die Vorgehensweise und das Betrachtungsumfeld der DS-I beschrieben. Prozesse und Methoden der funktionalen Produktspezifikation in der automobilen Produktentwicklungspraxis werden in Abschnitt 4.2 analysiert, um Herausforderungen und Probleme einzugrenzen. Im folgenden Abschnitt 4.3 werden, nach der Identifikation des Bedarfs an Unterstützung des Produktentwickelnden, Lösungsansätze zur Spezifizierung von Funktionen des Gesamtproduktes generiert. Die dritte empirische Studie der DS-I in Abschnitt 4.4 zielt auf eine Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase der Produktentwicklung. Die Deskriptive Studie I wird mit Fazit und Darstellung der abgeleiteten Anforderungen an die folgende Präskriptive Studie abgeschlossen (vgl. Abschnitt 4.5).

4.1 Vorgehensweise und Betrachtungsumfeld der Deskriptiven Studie I

Das Ziel einer Deskriptiven Studie I (DS-I) ist die tiefgreifende Analyse von komplexen Aktivitäten der Produktentwicklung, um eine solide Grundlage für die Entwicklung von prozessualer und methodischer Unterstützung des Produktentwickelnden zu schaffen (Blessing & Chakrabarti, 2009). Im Rahmen der umfassenden DS-I wurden vertiefende Literaturanalysen sowie empirische Erhebungen über u.a. Prozess-, Methoden- und Dokumentanalysen, Fragebögen, eine Delphi-Studie, Workshops, Fallstudien und teilnehmende Beobachtungen durchgeführt. Zur empirischen Analyse und Synthese von Anforderungen an die Unterstützung wurden diese in drei übergeordnete Studien strukturiert. Abbildung 4.1 zeigt dazu die Forschungsfragen (FF) aus Abschnitt 3.1.3, die im Rahmen der DS-I beantwortet werden sollen, sowie deren Zuordnung zu den drei inhaltlichen Abschnitten (4.2, 4.3 und 4.4) dieses Kapitels.

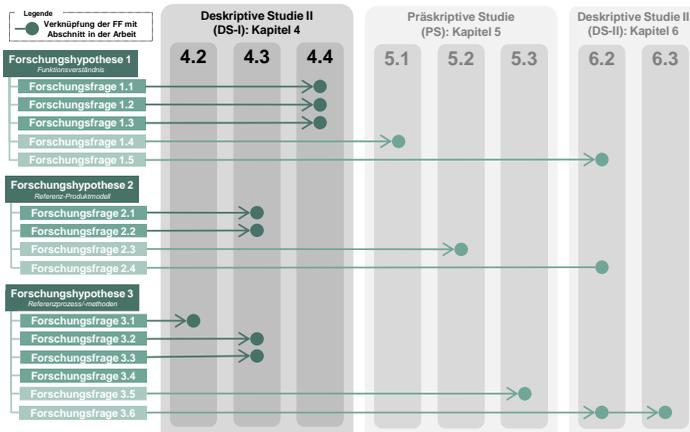


Abbildung 4.1: Verknüpfung zwischen Forschungsfragen (FF) und Abschnitten der Deskriptiven Studie I (DS-I) in der vorliegenden Arbeit – Darstellung nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 68)

In einem ersten Schritt wurde in einer 3-jährigen, teilnehmenden Beobachtung eine Prozess-, Methoden- und Dokumentenanalyse in der automobilen Produktentwicklungspraxis durchgeführt, um die Forschungsfragen 3.1 und 3.4 zu beantworten (vgl. Abschnitt 4.2). In diesem Rahmen konnte ein Verständnis für die aktuelle Situation geschaffen sowie Probleme und Herausforderungen in der Entwicklungspraxis identifiziert werden. Zur Objektivierung der folgenden Bedarfsanalyse und Generierung von alternativen Lösungsvorschlägen wurde in Abschnitt 4.3 mehrere Problemlösungsteams aus Branchen-übergreifenden Experten zusammengestellt, um die Forschungsfragen 2.1, 2.2, 3.2 und 3.3 zu beantworten. Die zweite Studie sollte die Relevanz der Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation bewerten sowie alternative Konzepte zur Bewältigung der Herausforderungen und Unterstützung des Produktentwickelnden diskutieren. Das Betrachtungsumfeld bestand hierbei aus Expertenbefragungen, dem Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung und einem Systems Engineering Expertenforum. Die dritte Studie fokussierte sich auf eine Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 4.4), geleitet durch die Forschungsfragen 1.1, 1.2 und 1.3. Die konzentrierten Ergebnisse einer systematischen Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.1.1.5) wurden in einem Workshop in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklung genutzt, um ein Anbieter-übergreifendes Funktionsverständnis zu synthetisieren. Anschließend wurden in zwei Fallstudien bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG sowohl Muster aus Funktionssicht bei der Variation physischer Elemente als auch Phänomene der Variation von Funktionen untersucht. Die DS-I schließt mit den abgeleiteten Anforderungen an die Präskriptive Studie (vgl. Abschnitt 4.5).

4.2 Analyse von Prozessen und Methoden der funktionalen Produktspezifikation in der automobilen Produktentwicklungspraxis

In einer ersten Studie soll zunächst in der Produktentwicklungspraxis die aktuelle Situation in Bezug zur funktionalen Produktspezifikation analysiert werden, um Probleme und Herausforderungen einzugrenzen. Dazu wurde eine 3-jährige, *teilnehmende Beobachtung* und *Inhaltsanalyse* bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG einschließlich einiger Schnittstellen zur Volkswagen AG durchgeführt. Ziel hierbei war es, Informationen zum Spezifizieren aus Funktionssicht zu strukturieren, in der Wissensbasis zu konzentrieren sowie die Schwierigkeiten dabei zu erforschen, um letztendlich die Ursachen im automobilen Produktentstehungsprozess (PEP) einzugrenzen.

Vor diesem Hintergrund sollen folgende Forschungsfragen aus Abschnitt 3.1.3 im Zuge dieser empirischen Studie beantwortet werden:

FF3.1 Wie, wann und wo werden Funktionen des Gesamtproduktes aktuell für einen übergreifenden Einsatz in unterschiedlichen Produktgenerationen/-linien in der Automobilentwicklung spezifiziert?

FF3.4 Was lässt sich aus dem generierten Wissen in Bezug auf prozessuale und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden induzieren?

Die in Abschnitt 4.2 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikationen Fahl, Hirschter & Albers (2021), Fahl, Hirschter, Kamp et al. (2019), Albers, Haug, Fahl et al. (2018), und Albers, Haug, Heitger et al. (2019) veröffentlicht worden. Die empirischen Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden teilweise in vom Autor Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Fahl (2017)³⁷, Endl (2019)³⁸ und Staiger (2020)³⁸ am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers und Kamp (2019)³⁸ am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt.

4.2.1 Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen

Im ersten Teil der umfassenden DS-I wurden initial aktuelle *Prozesse, Methoden und Artefakte* der *funktionalen Produktspezifikation* in der automobilen Produktentwicklungspraxis bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) sowie teilweise

³⁷ Unveröffentlichte Masterarbeit des Autors.

³⁸ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

der Volkswagen AG analysiert. Die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG eignete sich als Untersuchungsumgebung für die *3-jährige teilnehmende Beobachtung* (vgl. Abschnitt B.1) bzw. Problemstellung, da das große Unternehmen (ca. 35.000 Mitarbeiter in 2019) im integrierten Volkswagen-Konzern (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) Synergien in der Portfolio-übergreifenden Funktionsentwicklung sucht. Des Weiteren ist die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG ein typisches Beispiel eines Unternehmens, das in der Praxis explizit und teilweise implizit nach dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) agiert. Das Studiendesign, die verwendeten, empirischen Methoden sowie eine kurze Übersicht von Ziel und Inhalte ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

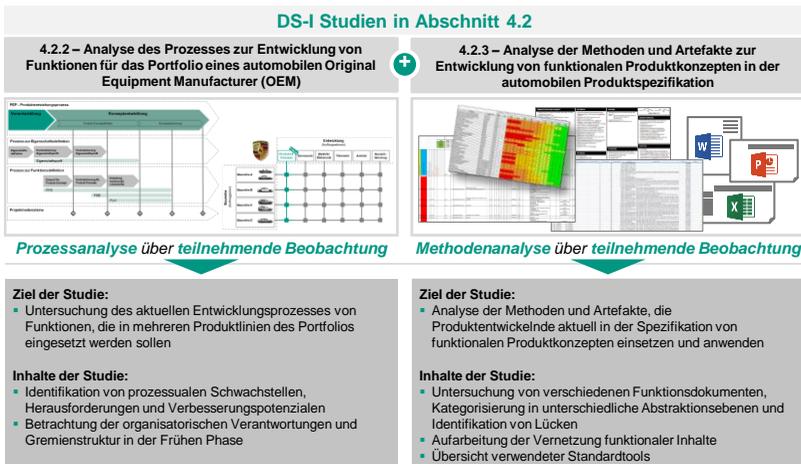


Abbildung 4.2: Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 4.2 der DS-I

Im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung der automobilen Produktentwicklungspraxis wurden zunächst die Prozessinhalte der Entwicklung von Funktionen zum übergreifenden Einsatz im Produktportfolio untersucht (vgl. Abschnitt 4.2.2). Anschließend daran wurde in einem zweiten Schritt eine Analyse der im Laufe des Funktionsentwicklungsprozesses erzeugten Artefakte und der methodischen Unterstützung des Produktentwickelnden durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.2.3).

4.2.2 Analyse des Prozesses zur Entwicklung von Funktionen für das Portfolio eines automobilen Original Equipment Manufacturer (OEM)

Zur Untersuchung des aktuellen Vorgehens zur Entwicklung von Funktionen in der automobilen Produktentwicklung, wird in diesem Abschnitt zunächst eine Prozessanalyse in der Frühen Phase bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG durchgeführt.

4.2.2.1 Studiendesign und -vorgehen

Die Analyse der aktuellen Entwicklungsprozesse von Funktionen, die in mehreren Produktlinien des Portfolios eingesetzt werden sollen, wurden über eine *Prozessanalyse* (vgl. Anhang B.2) im Rahmen einer *teilnehmenden Beobachtung* (vgl. Anhang B.1) realisiert. Ziel der Studie war die Identifikation prozessualer Schwachstellen, Herausforderungen und Verbesserungspotenzialen. Die Untersuchung soll zur Beantwortung der Forschungsfragen 3.1 und 3.4 beitragen. Basierend auf diesem Studiendesign wurde nachfolgendes Vorgehen gewählt (vgl. Abbildung 4.3).



Abbildung 4.3: Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung (Prozessanalyse)

Zu Beginn der Prozessanalyse fokussierte sich die teilnehmende Beobachtung insbesondere auf die Schnittstellen der Entwicklung von Funktionen in der Frühen Phase bzw. in der sogenannten automobilen Konzeptentwicklung der Forschungsumgebung (in der vorliegenden Arbeit die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, vgl. Abschnitt 3.2.3.2) [1]. Anknüpfend daran wurden die Prozesse und Meilensteine der Funktionsentwicklung in den automobilen Produktentstehungsprozess (PEP) eingeordnet [2]. An dieser Stelle wurden zudem die organisationalen Zusammenhänge betrachtet [3]. Zum Abschluss erfolgte die Synthese der Erkenntnisse der Prozessanalyse auf Basis der generierten Ergebnisse [4].

4.2.2.2 Ergebnisse

Die Funktionsorientierung in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklung spielt aktuell eine entscheidende Rolle (Albers, Haug, Heitger et al., 2019). Vor diesem Hintergrund werden die etablierten und historisch gewachsenen Produkt- bzw. Fahrzeugentwicklungsprozesse kritisch hinterfragt. Initial wurden daher die Schnittstellen der Entwicklung von Funktionen, insbesondere in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_{n+1} , untersucht. Die Beobachtungen in mehreren Entwicklungsprojekten,

konnten drei grundlegende Sichten auf ein Fahrzeug offenbaren: **Eigenschaften**, **Funktionen** und **physische Elemente** (Albers, Heitger, Haug et al., 2018). *Funktionen* werden dabei in der Frühen Phase insbesondere aus Sicht des Kunden oder Anwenders betrachtet. In einem solchen Verständnis sind Funktionen eng mit den sogenannten *kundenerlebbaaren Produkteigenschaften* (vgl. Heitger (2019)) verknüpft. Diese *Funktionen des Gesamtfahrzeugs* beschreiben, wie ein gewünschtes Produktverhalten realisiert und damit ein direkter Nutzen für Kunde und/oder Anwender geschaffen werden kann (vgl. Abbildung 4.4).

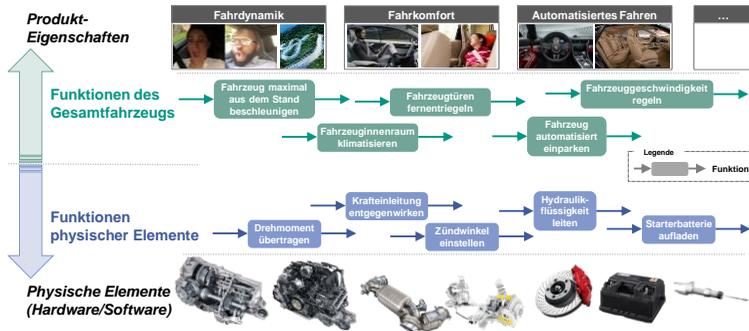


Abbildung 4.4: Schematische Zusammenhänge von Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen – Darstellung nach Endl (2019, S. 55)³⁹

Eine Funktion, die das „Fahrzeug aus dem Stillstand maximal beschleunigen“ soll, (ugs. Rennstart oder Launch Control genannt) realisiert bei Ausführung folglich ein Produktverhalten, das u.a. die Produkteigenschaft „Fahrdynamik“ oder noch präziser die „Längsdynamik“ für den *Kunden und/oder Anwender* erlebbar macht. Im Unterschied dazu werden Funktionen im Entwicklungsprozess aber ebenso verwendet, um die technischen Zusammenhänge in *physischen Elementen* (Hardware/Software) zu beschreiben. Diese Art von Funktionen sind für Stakeholder wie bspw. Kunde und/oder Anwender keinesfalls direkt wahrnehmbar, da sie auf die Wirkbeziehungen zwischen *Stoff-, Energie- und Informationsflüssen* in einem physischen Element zurückgehen. In diesem Fall wird eher die *Produktentwickelnden-Sicht* auf die technische Realisierung fokussiert. In der teilnehmenden Beobachtung hat sich gezeigt, dass bei der Beschreibung und Formulierung von Funktionen oftmals weder zwischen der Stakeholder- bzw. Produktentwickelnden-Sicht noch der Systemebene (bspw. Funktion des Gesamtfahrzeugs oder eines physischen Elements) differenziert wird.

³⁹ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit. Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

In dieser Forschungsarbeit werden die Funktionen des Gesamtproduktes einer Produktgeneration G_{n+1} betrachtet, die nicht nur Produktgenerations-spezifisch, sondern in mehreren Produktlinien des Produktportfolios eines Anbieters eingesetzt werden sollen. Dafür spielt insbesondere die Verknüpfung zu den Produkteigenschaften eine bedeutende Rolle. Weiterer Komplexitätstreiber ist der kontinuierliche Anstieg von Produktlinien, Produktvarianten sowie die steigenden Stakeholder-Anforderungen in Bezug zur Individualisierung von Fahrzeugen (Lindemann, Reichwald & Zäh, 2006). In der Prozessanalyse konnte festgestellt werden, dass sich der automobiler PEP im Wesentlichen an dem durch Gusig & Kruse (2010) und Frech (2018) beschriebenen Vorgehen orientiert (vgl. Abschnitt 2.1.3.3). Die Spezifikation des initialen Zielsystems lässt sich in der Entwicklungspraxis in der Frühen Phase dieser Produktgeneration G_{n+1} in den *Eigenschafts- und den Funktionsdefinitionsprozess* gliedern. Dabei handelt es sich um Produktgenerations-spezifische Prozesse der G_{n+1} , das heißt, insbesondere Funktionen werden jeweils nur spezifisch für ein Fahrzeugprojekt definiert. Aus Eigenschaftssicht erfolgt eine Definition jedoch teilweise auf Basis des strategischen Produktportfolios. Gleichmaßen fokussiert die *Baukastenentwicklung* (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) eine Produktportfolio-übergreifende Entwicklung physischer Elemente. Im Gegensatz dazu existiert ein solches, systematisches Vorgehen zur Produktportfolio-übergreifenden Entwicklung von Funktionen des Gesamtfahrzeugs bisher noch nicht. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Die Bildung des initialen Zielsystems startet in der Vorentwicklung mit der Beschreibung von Differenzierungszielen gegenüber Referenzprodukten auf Basis der Produkteigenschaften. Der Kunden- und Anwendernutzen wird hierbei in der automobilen Produktentwicklung durch das *Eigenschaftsprofil* (vgl. Abschnitt 2.2.5) konkretisiert (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Das Eigenschaftsprofil bildet die Grundlage und den Ausgangspunkt für die Definition der Funktionen des Gesamtproduktes. Aus der lösungsoffen beschriebenen Differenzierung einer Produktgeneration wird über die Entwicklung eines *funktionalen Produktkonzeptes* die vor Kunde und Anwender relevante, funktionale Produktsubstanz definiert (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Das bedeutet, dass in der Praxis die wichtigsten und kundenrelevanten Funktionen des Fahrzeugs (z.B. Geschwindigkeitsregelanlage, Notbremsassistentz, etc.) zusammengetragen werden. Über die verschiedenen Meilensteine der Konzeptentwicklung hinweg wird das funktionale Produktkonzept konkretisiert und mündet schließlich in der Erstellung *Funktionaler Lastenhefte*, d.h. die spezifische Definition u.a. aller Anforderungen an und ausgehend von einer Funktion wie bspw. der Geschwindigkeitsregelanlage. In der Frühen Phase dieser Produktgeneration G_{n+1} finden die Produktgenerations-spezifische Eigenschafts- als auch Funktionsdefinition jeweils in einem Produktentwicklungsteam statt, das die konzeptionelle Arbeit leistet. In der teilnehmenden Beobachtung konnte festgestellt werden, dass die funktionalen Produktkonzepte verschiedener Produktgenerationen aus unterschiedlichen Produktlinien nicht systematisch miteinander vernetzt werden. Die Entwicklung von Funktionen, die im

Produktportfolio übergreifend eingesetzt werden sollen, erfolgt oftmals in dem Fahrzeugprojekt, das den sogenannten „*Ersteinsetzer*“ der Funktion stellt. Das bedeutet, dass Anforderungen (bspw. in Bezug zu unterschiedlichen Fahrzeugabmessungen) aus anderen Projekten an eine solche Funktion oftmals nicht vollumfänglich oder früh genug berücksichtigt werden. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

In der Prozessanalyse konnte zudem festgestellt werden, dass die Matrixorganisation der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG (vgl. Abbildung 3.4) im Fall der Funktionen des Gesamtfahrzeugs das Ausschöpfen von Entwicklungssynergien in Teilen behindert. Die einzelnen Produktlinien fokussieren sich in der Praxis vornehmlich auf ihre eigenen Fahrzeugprojekte bzw. Produktgenerationen. Etablierte Prozesse der Baukastenentwicklung und strategischen Differenzierung der Produktlinien über Produkteigenschaften stehen einer rudimentären Betrachtung der Funktionsentwicklung im Kontext des Produktportfolios gegenüber. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

4.2.2.3 Erkenntnisse

Die Synthese der generierten Ergebnisse führt zunächst zu der Feststellung, dass *keine strukturierter Prozess zur Produktportfolio-übergreifenden Entwicklung von Funktionen* existiert. Funktionen des Gesamtproduktes, die in mehreren Produktlinien eingesetzt werden sollen, sind vor allem „*Ersteinsetzer*“-getrieben. Hierbei kann es zu einer *mangelnden Berücksichtigung oder Intransparenz von Anforderungen* (i.S.v. „*Scheuklappen*“-Sicht) weiterer Produktlinien und deren -generationen kommen. Das führt dazu, dass die Funktion in weiteren Produktlinien im schlimmsten Fall noch einmal einzeln entwickelt werden muss, da wenig oder keine Entwicklungssynergien realisiert wurden. Es ist daher wichtig, das Zielsystem sowohl auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden des Produktportfolios, aber auch der einzelnen Produktgenerationen konkret zu spezifizieren. Dies muss anschließend in die *Gesamtfahrzeug-Spezifikationen* fließen, um dann ins Objektsystem des Fahrzeugs integriert werden zu können. Des Weiteren gibt es *keine strukturierte Betrachtung der Auslöser* einer Produktportfolio-übergreifenden Funktion. In diesem Zusammenhang können *endogene* (bspw. Technologie, Strategie) und *exogene Faktoren* (bspw. Wettbewerb, Gesetze) differenziert werden. Weiterhin kann eine *Unterscheidung zwischen neuen, weiterzuentwickelnden sowie stillzulegenden Funktionen* getroffen werden. In Kombination mit der Stärkung eines *funktionalen Verständnisses von Referenzsystem-Elementen* kann zwischen der Menge an grundsätzlich zugänglichem und bereits in der Wissensbasis vorhandenen Funktionen differenziert werden. Darüber hinaus fehlt es an einer *übergreifenden Strukturierung der Zusammenhänge der verschiedenen Systemsichten* (Eigenschaften, Funktionen, physische Elemente) und einem Framework zur Ableitung der notwendigen oder erforderlichen Entwicklungsaktivitäten. Auf dieser Grundlage könnte eine Abschätzung oder strategische Definition der *Übernahme- und Neuentwicklung von Funktionen* – analog dem Verständnis der Variationsarten im Modell der PGE –

bereits in der Frühen Phase Indizien für einerseits *Innovationspotenzial* und andererseits *Entwicklungsrisiko* liefern. Weiterhin besteht die Herausforderung, belastbare Aussagen über *Vollständigkeit* und *Konsistenz* zwischen „funktionalem“ Portfolio und den einzelnen Produktgenerationen zu treffen. Eine *systematische Bewertung und Auswahl von Funktionsideen* bspw. in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_{n+1} kann strukturierte Entscheidungen auf der Abstraktionsebene des Produktportfolios fördern und auf die Produktgenerations-spezifische Spezifikation funktionaler Produktkonzepte übertragen werden. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

4.2.3 Analyse der Methoden und Artefakte zur Entwicklung von funktionalen Produktkonzepten in der automobilen Produktspezifikation

Basierend auf den Erkenntnissen der Prozessaufnahme wurden detaillierte Untersuchungen der verwendeten Methoden und Artefakte zur Entwicklung und Spezifikation von automobilen Produktkonzepten aus Funktionssicht durchgeführt.

4.2.3.1 Studiendesign und -vorgehen

Zur tieferen Ergründung der derzeitigen, methodischen Unterstützung bei der Spezifikation funktionaler Produktkonzepte, wurden die Hilfsmittel und Werkzeuge der Produktentwickelnden zur Funktionsentwicklung in einer *Methoden- und Dokumentenanalyse* (vgl. Anhang B.2) über eine *teilnehmende Beobachtung* (vgl. Anhang B.1) untersucht. Der Fokus lag dabei auf Funktionsdokumenten, deren Kategorisierung in unterschiedliche Abstraktionsebenen sowie die Identifikation von Lücken. In diesem Sinne sollten die Forschungsfragen 3.1 und 3.4 tiefgreifender in Bezug zu Methoden und Werkzeugen ergründet werden. Die Aufarbeitung der Vernetzung funktionaler Inhalte umfasste dabei ebenso eine initiale Inspektion der funktionalen Modellierungsmöglichkeiten in der Frühen Phase sowie verwendeter Standardtools. Aus dem beschriebenen Studiendesign wurde folgendes Vorgehen in der Studie abgeleitet (vgl. Abbildung 4.5).



Abbildung 4.5: Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung (Methoden- und Dokumentenanalyse)

In einem ersten Schritt wurden die existierenden Methoden und Werkzeuge, die den Produktentwickelnden im Rahmen der Entwicklung von Funktionen unterstützen, in der Forschungsumgebung (in der vorliegenden Arbeit die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, vgl. Abschnitt 3.2.3.2) analysiert [1]. Daran schloss sich eine Erforschung zugehöriger Artefakte an, die im Laufe der Spezifikation von Funktionen erzeugt werden, um ein tieferes Verständnis zu gewinnen [2]. Der dritte Schritt umfasste eine Einordnung der existierenden Unterstützung in den zuvor auf Funktionen eingegrenzten, relevanten Teil des Produktentstehungsprozesses (PEP) [3]. Die Synthese der Erkenntnisse bildete den Abschluss dieser Methoden- und Dokumentenanalyse in der automobilen Produktspezifikation.

4.2.3.2 Ergebnisse

Der Entwicklungsprozess von Funktionen wird zumindest Produktgenerations-spezifisch durch einige Methoden und Werkzeuge unterstützt. Die in der Methoden- und Dokumentenanalyse identifizierten Artefakte können – wie in Abbildung 4.6 dargestellt – in die Funktionsentwicklung im PEP eingeordnet werden. Insgesamt lässt sich dabei festhalten, dass die Funktions-Artefakte teilweise unvollständig und auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen vorhanden sind. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

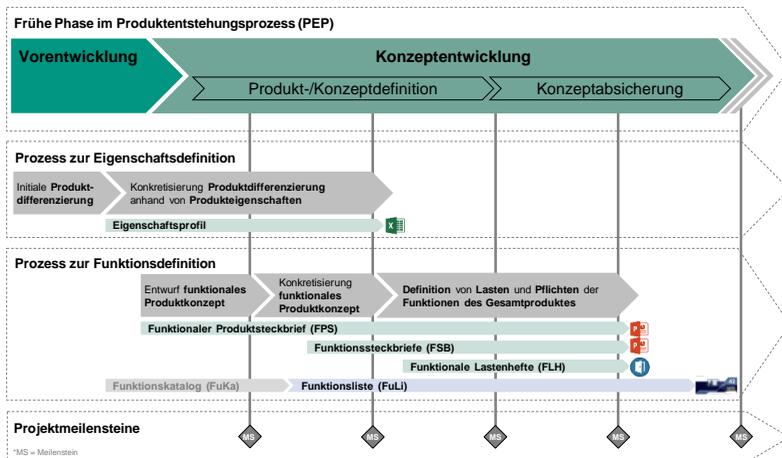


Abbildung 4.6: Einordnung der Methoden und Werkzeuge der Funktionsentwicklung in den Produktentstehungsprozess (PEP) – Darstellung nach Endl (2019, S. 71)⁴⁰ und Fahl, Hirschter & Albers (2021, S. 5)

⁴⁰ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

Anknüpfung findet die Produktgenerations-spezifische Funktionsentwicklung in der Frühen Phase initial am *Eigenschaftsprofil* (vgl. Abschnitt 2.2.5, Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018)) statt. Aus dem Eigenschaftsprofil, das in *Microsoft Excel* erstellt und gepflegt wird, geht die Ausprägung der Zieleigenschaften hervor, argumentativ durch Relevanz- oder Positionierungsbegründungen bestärkt. An dieser Stelle können daher bereits Funktionen des Gesamtproduktes zur Konkretisierung verknüpft werden.

Im funktionalen Produktkonzept wird das Eigenschaftsprofil aus Funktionssicht konkretisiert und die wesentliche, funktionale Produktsubstanz zur Befriedigung der Stakeholder-Bedürfnisse (insb. Kunde und Anwender) modelliert (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Aus diesem Grund beinhaltet der *Funktionale Produktsteckbrief*⁴¹ (FPS) diejenigen Funktionen des Gesamtproduktes, die zur Produktdifferenzierung gegenüber internen Referenzprodukten oder dem Wettbewerb beitragen. Darüber hinaus werden in der Entwicklungspraxis allerdings oftmals ebenso funktionale Themen mit großer technischer Konzeptrelevanz für das Gesamtfahrzeug (i.S.v. Produktentwickelnden-Sicht) hinzugefügt. In der Summe umfasst er somit durchschnittlich *50-100 Funktionen des Gesamtfahrzeugs* (bspw. Mehrzonige Innenraumklimatisierung, (aktive) Wankstabilisierung, etc.). Gruppieren werden die Funktionen auf dem FPS insbesondere nach ihren initiierenden Produkteigenschaften (bspw. Fahrdynamik, Fahrkomfort, etc.), teilweise werden auch Referenzprodukte angegeben. Bisher gibt es allerdings kein übergreifendes, methodisches Vorgehen zur Definition und Pflege des funktionalen Produktsteckbriefs. Das Artefakt wird in *Microsoft PowerPoint* erstellt und händisch auf Stand gehalten.

Zur Erläuterung und Detaillierung der Funktionen auf dem Funktionalen Produktsteckbrief (FPS), werden jeweils *Funktionssteckbriefe*⁴² (FSB) erstellt (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Diese dienen der Spezifikation, der – durch die Funktion beeinflussen – Produkteigenschaften und identifizieren bzw. konkretisieren ebenso die lösungsspezifischen physischen Elemente, die zur Realisierung notwendig sind. Das Artefakt beinhaltet zudem projektspezifische Beschreibungen, die jedoch nicht zentral für alle Produktlinien zugänglich sind. Eine Verknüpfung der Funktionssteckbriefe in Form einer Abbildung der funktionalen Schnittstellen untereinander ist dabei nicht realisiert. Die Produktgenerations-spezifischen Funktionssteckbriefe werden in der Frühen Phase ebenfalls in *Microsoft PowerPoint* erzeugt und aktualisiert.

Mit Fortschritt der Konzeptentwicklung und zunehmendem Konkretisierungsgrad erreicht der Funktionssteckbrief (FSB) seine Grenzen und wird in einem umfangreicheren *Funktionalen Lastenheft* (FLH) detailliert. In diesem Artefakt wird die Gesamtheit der Anforderungen an eine spezifische Funktion aus Anbietersicht vereinigt. Das

⁴¹ Ein Beispiel der überarbeiteten Version des FPS findet sich in Abbildung D.19

⁴² Ein Beispiel der überarbeiteten Version des FSB findet sich in Abbildung 6.11

Funktionale Lastenheft (FLH) wird zum Abschluss der Konzeptentwicklung im Sinne eines Vertragsdokumentes verabschiedet bzw. freigegeben. Es wird dann an die Serienentwicklung oder ggf. externe Dienstleister zur Realisierung der Funktion übergeben. Das Funktionale Lastenheft (FLH) bildet damit ebenso Grundlage für die funktionale Reifegradplanung entlang des weiteren Produktentstehungsprozesses bis hin zur Freigabe der Markteinführung. Eine in der Automobilindustrie aktuell sehr verbreitete Form der Dokumentation von (funktionalen) Lastenheften geschieht bspw. über *IBM DOORS*⁴³ (engl. Akronym Dynamic Object Oriented Requirements System). Parallel dazu wird ein Produktportfolio-übergreifender *Funktionskatalog* (FuKa) für die Entwicklung der Elektrik/Elektronik (E/E) Architektur genutzt, aus dem Produktgenerations-spezifische *Funktionslisten* (FuLi) ausgeleitet werden können. Im Gegensatz zu FPS, FSB und FLH fokussieren diese Artefakte nur die Produktentwickelnden-Sicht, da sie die Grundlage für bspw. die Partitionierung einzelner Funktionsblöcke auf Steuergeräten darstellen. Die Volkswagen AG setzt dazu bspw. konzernweit das modulare Tool „*system42*“ mit dem Teilumfang „*function42*“ ein, um den Funktionskatalog zentral zu pflegen und einzelne Funktionslisten für Produktgenerationen auszuleiten (Lange, 2010).

Eine übergreifende Vernetzung der vorwiegend Text- und Tabellenbasierten Standardtools findet bisher nicht oder nur sehr rudimentär statt. Der zeitliche Einsatz und Umfang von Software-basierter Modellierung variiert projektspezifisch extrem. Eine vollständige Modellierung scheint in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklung jedoch nicht zielführend. Potenziale bieten an dieser Stelle eine verkürzte Modellierung der funktionalen Wirkketten oder die Stärkung von modellbasierten Entwicklungsansätzen wie *Model-Based Systems Engineering* (vgl. Abschnitt 2.1.4.1).

4.2.3.3 Erkenntnisse

Die vertiefende Methoden- und Dokumentenanalyse konnte die Erkenntnisse der vorangehenden Untersuchung des Funktionsentwicklungsprozesses in der Frühen Phase grundsätzlich noch einmal bestätigen und erweitern. Die teilnehmende Beobachtung in der Konzeptentwicklung konnte *verschiedene Abstraktionsgrade von Funktionen* in den unterschiedlichen Artefakten identifizieren. Diese *Systemebenen*, auf denen Funktionen betrachtet werden, werden teilweise *spezifisch für Fachbereiche* oder *externe Dienstleister* definiert. Aus der globalen Anbietersicht fällt es daher schwer, die einzelnen *Artefakte in einem Gesamtsystem einzuordnen* oder die spezifischen Ebenen „*umzurechnen*“. Durch die teilweise *singuläre Betrachtung* innerhalb der Organisationsstrukturen, sind die *Auswirkungen im Gesamtsystem* (bspw. i.S.v. beeinflussten Produkteigenschaften oder möglichen Optimierungen/Synergien von

⁴³ vgl. International Business Machines Corporation [IBM] (n.d.).

physischen Elementen) *nicht transparent darstellbar* oder *zurückzuverfolgen*. Gleichmaßen generieren die verschiedenen Abstraktionssichten und -ebenen von Funktionen für verschiedene Produktentwickelnde oder Problemlösungsteams einen unterschiedlichen Nutzen in Bezug zu deren spezifischer Entwicklungsaufgabe. In diesem Hinblick kann die *Nutzung von vorhandenem Wissen* im Sinne eines Referenzsystems weiter gestärkt werden. Auf Ebene der *E/E-Architekturentwicklung* wird dieser Ansatz über einen Produktportfolio-übergreifenden Funktionskatalog bzw. die daraus abgeleiteten Produktgenerations-spezifischen Funktionslisten bereits grundsätzlich gelebt. Bei der Betrachtung von Funktionen des Gesamtproduktes aus einer Kunden- und Anwendersicht besteht Potenzial, die *Herkunft und Reife* von „funktionalen“ Referenzsystem-Elementen (RSE) und deren starker *Vernetzung über die drei Sichten* (Eigenschaften, Funktionen, physische Elemente) systematisch zu betrachten. Dies kann ein Bewusstsein für vorhandene *Wissens- oder Spezifikationslücken* schaffen. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Weiterhin fehlt es an einer Methodik zur *Bestimmung von Übernahme- und Neuentwicklungsanteilen von Funktionen*. Die *Funktionsformulierung* wird teilweise willkürlich variiert, ohne dass die Bedeutung oder Auswirkungen auf Ausprägung und Prinzip der Funktion ersichtlich sind. Diese Tatsache wird durch die *zunehmende Vernetzung von Funktionen*, die in Interaktion mit weiteren *Funktionen von Partnersystemen* oder im *System-of-Systems* stehen. *Mehrdeutige oder unscharfe Formulierungen* verhindern darüber hinaus eine strukturierte Abschätzung von *Innovationspotenzial*, aber ebenso von *Entwicklungsrisiko*. Den Entscheidern fällt es in der Frühen Phase daher schwer, *Funktionen objektiv zu priorisieren*, und sie fassen Entschlüsse zu neuen Funktionsideen oftmals „aus dem Bauch heraus“. Eine Vereinheitlichung in einem *Modell von Funktionen des Gesamtproduktes*, an dem sich der Produktentwickelnde in Bezug zu Wirkbeziehung und Schnittstellen orientieren kann, schafft Abhilfe. Eine solche Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes sowie die *systematische Gliederung in Subfunktionen oder Strukturierung in Haupt- und Nebenfunktionen* unterstützt die Synchronisation zwischen funktions-spezifischen Modellen und den Produktmodellen der Produktgenerationen im Produktportfolio. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Zur Berücksichtigung der *Stakeholder-Zentrierung* in der Frühen Phase sollte der Fokus initial auf einer lösungsoffenen Beschreibung der Funktionen des Gesamtproduktes liegen, um einerseits den *Lösungsraum nicht zu früh einzugrenzen* und andererseits von der *vorhandenen Wissensbasis zu profitieren*. In diesem Zuge kann explizit zwischen *gewünschten/beabsichtigten und unerwünschten/unbeabsichtigten Funktionen* unterschieden werden. Mit Fortschritt der Konzeptentwicklung sind lösungsspezifische Inhalte der Funktionen des Gesamtproduktes kontinuierlich, aber systematisch in der *Spezifikation funktionaler Produktkonzepte* zu konkretisieren. Die Spezifikation Produktgenerations-spezifischer, funktionaler Produktkonzepte gestaltet sich sehr aufwändig und intransparent, da das verteilte Wissen der Entwicklungsfachbereiche

mühsam zusammengetragen werden muss. In der operativen Entwicklungspraxis fehlt es an einer Art „*funktionalem Baukasten*“, der eine *Produktportfolio-übergreifende Planung und Steuerung der Funktionen des Gesamtproduktes* ermöglicht, um Wissen zu zentralisieren und Komplexität nicht nur Produktgenerations-spezifisch zu begegnen. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

4.2.4 Zwischenfazit: Handlungsfelder

Im Rahmen einer 3-jährigen teilnehmenden Beobachtung sowie einer tiefgreifenden Inhaltsanalyse von Prozessen und Methoden in der automobilen Produktentwicklung wurden über die Beantwortung der Forschungsfragen 3.1 und 3.4 (vgl. Abschnitt 3.1.3) mehrere Handlungsfelder zur Weiterentwicklung bestehender Modelle, Prozesse und Methoden identifiziert (Fahl, Hirschter & Albers, 2021):

- Strukturierung von Prozessen sowie Vereinheitlichung der Abstraktionsgrade und -ebenen sowie Nomenklaturen und Formulierungen in der Entwicklung des „funktionalen“ Portfolios eines Anbieters
- Betrachtungsfokus in der Frühen Phase stärker auf den für Kunde oder Anwender wahrnehmbaren Funktionen legen, die einen direkt greifbaren Wert oder Nutzen des Gesamtproduktes schaffen
- Aufwertung der Entwicklungsunterstützung, die der Produktentwickelnde flexibel und anpassbar beim Spezifizieren einsetzen kann
- Unterstützung der gezielteren Generierung und Priorisierung von neuen Funktionsideen in der Frühen Phase
- Systematisierung der transparenten und rückverfolgbaren Spezifikation von Funktionen des Gesamtproduktes in Generationen
- Stärkere Berücksichtigung der Auswirkungen auf Realisierung von Funktionen oder sogar der Stilllegung bzw. der Beendigung von Funktionslebenszyklen bereits in der Spezifikation

Insgesamt folgt daraus die zwingend notwendige Stärkung eines Verständnisses der unterschiedlichen Zugänglichkeiten von Referenzsystem-Elementen und die obligatorische Ausweitung der Nutzung des Referenzsystems in der Produktspezifikation (aus Funktionssicht). (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Im Anschluss an die erfolgte *Situationsanalyse* und *Problemeingrenzung* im Kontext der automobilen Produktentwicklungspraxis werden im folgenden Abschnitt 4.3 der *Bedarf methodischer und prozessualer Unterstützung* identifiziert sowie in unterschiedlichen Domänen und Branchen nach *alternativen Lösungen zum Spezifizieren aus Funktionssicht* gesucht.

4.3 Unterstützungsbedarf und Lösungsansätze zum Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes

In der zweiten empirischen Studie wird zunächst der Bedarf an methodischer und prozessualer Unterstützung des Produktentwickelnden beim Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes über Fragebogenstudien ergründet. Dazu sollen zunächst folgende Forschungsfragen aus Abschnitt 3.1.3 beantwortet werden:

FF2.1 Welche relevanten Erfolgsfaktoren zur (funktionalen) Produktspezifikation können in der Produktentwicklungspraxis identifiziert werden?

FF3.2 Welcher konkrete Bedarf an Unterstützung der Spezifikation von Produktkonzepten aus Funktionssicht besteht in der Produktentwicklung?

Im Anschluss daran sollen alternative Lösungen zur Spezifizierung von Funktionen des Gesamtproduktes entwickelt werden. Die nachstehenden Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 3.1.3) werden dafür in einer Branchen-übergreifenden Fragebogen- und Delphi-Studie innerhalb eines Systems Engineering Expertenforums behandelt:

FF3.3 Wie sehen alternative Lösungen einer Produktportfolio-übergreifenden Spezifikation aus Funktionssicht aus?

FF2.2 Welche Referenzsystem-Elemente sind im Rahmen der (funktionalen) Produktspezifikation verfügbar und wie können ihre Informationen für das Spezifizieren aus Funktions- und Eigenschaftssicht genutzt werden?

Die in Abschnitt 4.3 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikationen Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020), Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) und Fahl, Hirschter, Maier et al. (2020) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vgl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die empirischen Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden teilweise in vom Autor bzw. Tobias Hirschter Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Wöhrle (2020)⁴⁴ und Haag (2020)⁴⁵ am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers durchgeführt.

⁴⁴ Unveröffentlichte, von Tobias Hirschter Co-betreute Masterarbeit.

⁴⁵ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

4.3.1 Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen

Mit dem Ziel, den Bedarf der Unterstützung des Produktentwickelnden bei der Spezifizierung von Funktionen des Gesamtproduktes zu identifizieren, wurde im zweiten Teil der umfassenden DS-I zunächst eine *zweiteilige Fragebogenstudie* (vgl. Anhang B.3) durchgeführt. Daran anknüpfend wurde auf einem Expertenforum eine weitere *Fragebogenstudie in eine übergreifende Delphi-Studie* (vgl. Anhang B.4) integriert, um alternative Lösungsansätze für den Unterstützungsbedarf zu generieren. In Abbildung 4.7 ist das Studiendesign, die verwendeten, empirischen Methoden sowie eine kurze Übersicht von Ziel und Inhalten schematisch dargestellt.



Abbildung 4.7: Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 4.3 der DS-I

In einer Fragebogenstudie wurden zunächst Produktentwickelnde aus der industriellen Entwicklungspraxis verschiedenster Branchen zur Beurteilung *der fünf Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation* (vgl. Abschnitt 2.4) aus der Klärung des Forschungsgegenstandes befragt. Angereichert wurden die Ergebnisse um eine zweite Befragung im *Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung* des Jahrgangs 2018/2019 (vgl. Abschnitt 4.3.2). Basierend auf dem identifizierten Unterstützungsbedarf wurde eine Kombination aus Fragebogen und Delphi-Studie mit Experten des Systems Engineering auf dem Forum *re:work Smart Requirements Engineering 2019* durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.3).

4.3.2 Bedarfsanalyse zur Unterstützung der Spezifikation von Produktkonzepten aus Funktionssicht

Zur Identifizierung der notwendigen methodischen und prozessualen Unterstützung des Produktentwickelnden bei der Spezifizierung funktionaler Produktkonzepte wird in diesem Abschnitt eine Bedarfsanalyse in der industriellen Entwicklungspraxis sowie innerhalb des *Live-Labs IP – Integrierte Produktentwicklung* (vgl. Abschnitt 3.2.3.3) durchgeführt.

4.3.2.1 Studiendesign und -vorgehen

In Abschnitt 4.2 wurden die Herausforderungen bei der übergreifenden Spezifizierung von Funktionen in der automobilen Produktentwicklung analysiert. Im Stand der Forschung (vgl. Kapitel 2) wurden initial die *fünf Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation* (vgl. Abschnitt 2.4) Systemdenken, Stakeholder-Zentrierung, Differenzierung lösungsoffener und lösungsspezifischer Elemente, Referenzsystem-Elemente (RSE), aktivitätsbasierte Dynamik ermittelt [1]. Anschließend wurden deren Abdeckung in verbreiteten Forschungsansätzen und -modellen in der Literatur gegenübergestellt [2]. Das daran anknüpfende Vorgehen ist in Abbildung 4.8 veranschaulicht.



Abbildung 4.8: Vorgehen im Zuge der Fragebogenstudie

In dieser Studie sollen die Forschungsfragen 2.1 und 3.2 beantwortet werden. Basierend auf den Erkenntnissen des Literaturvergleichs wurden zwei Fragebögen konzipiert [3]. Ziel der ersten Befragung ist es zunächst, die fünf Erfolgsfaktoren durch Experten industrieller Produktentwicklung hinsichtlich der Branchen-übergreifenden Relevanz in der Praxis bewerten zu lassen [4] (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020). Aufbauend darauf wurde eine zweite *Fragebogenstudie* (vgl. Anhang B.3) im *Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung* (vgl. Abschnitt 3.2.3.3) zur Ermittlung der Rolle von Funktionen des Gesamtproduktes in der Produktspezifikation durchgeführt [5] (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Zum Schluss erfolgt die Synthese der Erkenntnisse aus den zwei Fragebögen [6].

Insgesamt nahmen *32 Produktentwickelnde verschiedener Hierarchieebenen* – von (Senior) Manager (34%) bis hin zu Vorstandmitglied/Geschäftsführer (9%) – an der ersten Fragebogenstudie teil. Die Verteilung der Teilnehmer über *Industriesektor* bzw.

Unternehmensgröße (vgl. Abbildung 4.9) sowie Berufserfahrung und Tätigkeitsbereich (vgl. Abbildung 4.10) ist nachfolgend abgebildet. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

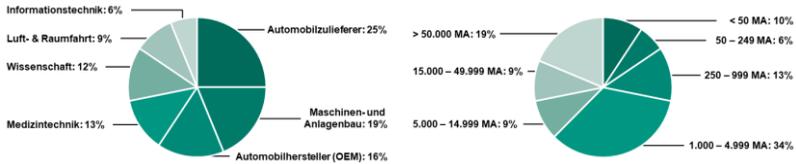


Abbildung 4.9: Verteilung der Befragten nach Industriesektor und Unternehmensgröße [Mitarbeitende] in der ersten Fragebogenstudie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 358)

Die Fragebogenteilnehmer sind hauptsächlich in der automobilen Produktentwicklung (41%) sowie dem Maschinen- und Anlagenbau (19%) beschäftigt. Da die Verteilung der Befragten aus den sieben Branchen heterogen ist, konnte mittels der Studie eine Branchen-übergreifende Meinung ermittelt werden (vgl. Abbildung 4.9, links). Auf der rechten Seite kann der Abbildung 4.9 ebenfalls entnommen werden, dass ein Großteil der Befragten (37%) für großen Unternehmen mit mehr als 5.000 Mitarbeitenden (MA) tätig ist. Mit annähernd 30% sind kleinere Unternehmen (<1.000 MA) und Start-Ups zugleich ebenso ausreichend vertreten. Das arithmetische Mittel der Unternehmensgröße liegt bei 26.739 Mitarbeitenden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)



Abbildung 4.10: Verteilung der Befragten nach Berufserfahrung [Jahre] und Tätigkeitsbereich in der ersten Fragebogenstudie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 358)

Im arithmetischen Mittel haben die Teilnehmer der ersten Fragebogenstudie 7,5 Jahre Berufserfahrung, fast die Hälfte mehr als 6 Jahre Berufserfahrung, wohingegen 16% als Berufseinsteiger (<2 Jahre) gelten (vgl. Abbildung 4.10, links). Das Tätigkeitsfeld der Teilnehmer kann größtenteils Forschung & Entwicklung (44%) sowie Strategie & Konzept (28%) zugeordnet werden (vgl. Abbildung 4.10, rechts). Der Median und das gestutzte Mittel mit $\alpha = 5\%$ wurden über das arithmetische Mittel hinaus berechnet, um den Einfluss von Ausreißern zu bereinigen. Die Werte zeigten keine signifikante

Abweichung auf, daher werden die Daten nicht durch Extremwerte verfälscht (Fahrmeir, Heumann, Künstler et al., 2016). Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit wurden die Mittel zu Unternehmensgröße und Berufserfahrung zuvor ausschließlich auf Basis des arithmetischen Mittels aufgeführt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Zur Ermittlung der Rolle von Funktionen des Gesamtproduktes im Rahmen der Produktspezifikation wurde ferner eine zweite Umfrage in sieben unabhängigen Entwicklungsteams des Projekts „*IP - Integrierte Produktentwicklung*“ am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. In diesem Projekt arbeiteten 41 Studierende über einen Zeitraum von vier Monaten hauptberuflich an einer Aufgabenstellung des Projektpartners thyssenkrupp Industrial Solutions AG. Die Studenten beschäftigten sich dabei mit der Themenstellung „*Von Großmaschinen bis zu intelligenten Organismen in der zukunftsrelevanten Versorgung mit Ressourcen – Schaffung innovativer Lösungen durch Nutzung des Potenzials von Automatisierung, Digitalisierung & Modularisierung*“ (IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018). Im Fragebogen wurde nach Projektabschluss die Bedeutung von Funktionen des Gesamtproduktes in der Frühen Phase untersucht. (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

4.3.2.2 Ergebnisse

Zur Gewährleistung der allgemeinen Aussagekraft der erhobenen Antworten, wurden die Teilnehmer in der ersten Fragebogenstudie zunächst gebeten, ihre bisherigen *Erfahrungen mit Produktmodellen* zu bewerten. Für entweder *akademische oder wissenschaftliche Zwecke* haben 75% der Experten „*sehr häufig*“ oder „*häufig*“ mit Produktmodellen gearbeitet (47% sehr häufig, 28% häufig, 19% manchmal, 6% selten). Im Zusammenhang mit einer *praxisbezogenen Produktentwicklung* haben 62% „*sehr häufig*“ oder „*häufig*“ mit Produktmodellen gearbeitet (34% sehr häufig, 28% häufig, 22% manchmal, 13% selten, 3% nie). Die Teilnehmer bestätigten darüber hinaus weitgehend die *prinzipielle Nützlichkeit von Produktmodellen* (50% sehr nützlich, 28% eher nützlich, 16% weder noch, 6% eher nicht nützlich). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Anschließend an die Klärung der Erfahrung im Umgang mit Produktmodellen wurden die Teilnehmer zu den *fünf Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation* (vgl. Abschnitt 2.4) befragt, die den Kern der Fragebogenstudie ausmachten. Einerseits bewerteten die Experten die *Relevanz der Faktoren für die Produktentwicklung*. Andererseits wurde abgefragt, inwieweit bei früheren Entwicklungsprojekten aus ihrer Erfahrung heraus ein *Defizit bei der Berücksichtigung der Erfolgsfaktoren* festgestellt werden konnte. Abbildung 4.11 zeigt die Auswertung der Ergebnisse. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

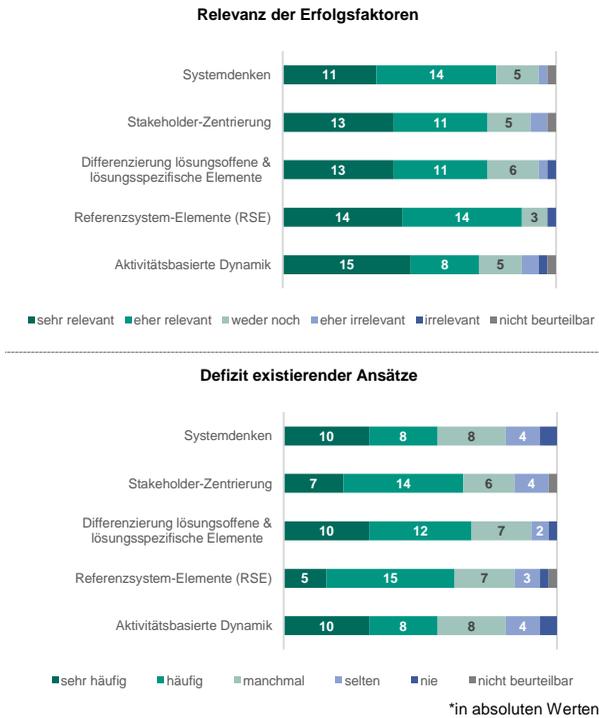


Abbildung 4.11: Umfrageergebnis (n=32) zur Relevanz von Erfolgsfaktoren der Produktspezifizierung und Defiziten existierender Ansätze in Forschung und Praxis (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 359)

Die Ergebnisse der Befragung lassen sich wie folgt zusammenzufassen. Die befragten Fachexperten konnten die aus der Fachliteratur abgeleiteten, zentralen Erfolgskriterien als *signifikant relevant* bestätigen. Unter den 32 Teilnehmern bewerteten 28 (88%) die *explizite Berücksichtigung von Referenzsystem-Elementen* (RSE) als „*sehr relevant*“ oder „*eher relevant*“. Darüber hinaus lässt sich hervorheben, dass fast die Hälfte der Teilnehmer (46%) eine *Berücksichtigung der Aktivitätsbasierten Dynamik* in der Produktentwicklung als sehr relevantes Erfolgskriterium empfinden. Die Umfrageergebnisse weisen zwar für alle fünf Erfolgskriterien auf praktische Relevanz hin, zeigen aber ebenso deutlich die jeweiligen Defizite bei deren Berücksichtigung in Entwicklungsprojekten auf. Im Zuge dessen deuten 63% der Teilnehmer auf eine „*häufig*“ oder „*sehr häufig*“ unzureichende Berücksichtigung von RSE in der Entwicklungspraxis hin. Aus der Kombination der Aussagen beider Ergebnisse der ersten Fragebogenstudie

(vgl. Abbildung 4.11) lässt sich schließen, dass den Erfolgsfaktoren in der aktuellen Produktentwicklungspraxis im Verhältnis zu wenig Rechnung getragen wird. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Der relevante Auszug der zweiten Fragebogenstudie im Rahmen von IP – Integrierte Produktentwicklung ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

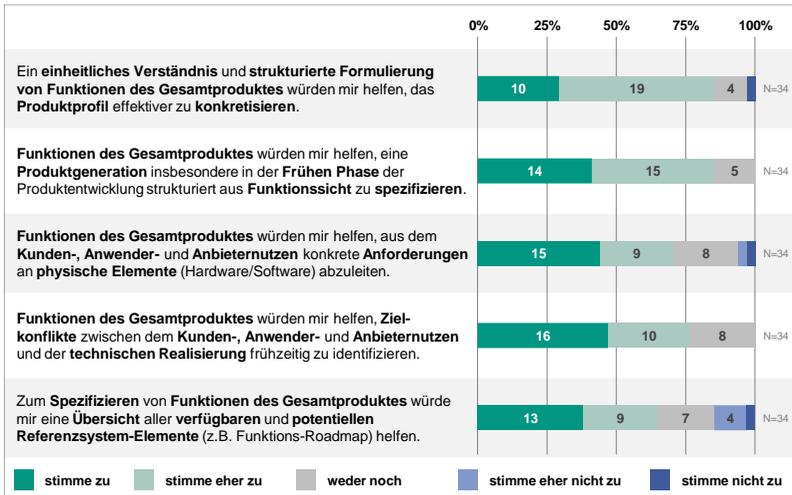


Abbildung 4.12: Umfrageergebnis (n=34) der Fragebogenstudie in IP – Integrierte Produktentwicklung 2018/2019 (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 4)

In der zweiten Fragebogenstudie stimmten mit 85% mehr als dreiviertel der studentischen Produktentwickelnden der Auffassung, dass Funktionen des Gesamtproduktes helfen, das Produktprofil einer Produktgeneration zu konkretisieren, voll oder zumindest teilweise zu. Gleichermäßen konnte bestätigt werden, dass insbesondere in der Frühen Phase die Funktionen des Gesamtproduktes genutzt werden, um die Produktgeneration zu spezifizieren. Die Teilnehmer der Fragebogenstudie bestärkten zudem den Standpunkt, dass Kunden-, Anwender und Anbieternutzen über Funktionen des Gesamtproduktes in konkrete Anforderungen an physische Elemente überführt werden können. Etwa dreiviertel der studentischen Produktentwickelnden waren der Meinung, dass Funktionen des Gesamtproduktes bei der Identifikation von Zielkonflikten zwischen Stakeholder-Anforderungen und der technischen Realisierung unterstützen. Zu guter Letzt stimmten 64% der Studierenden ganz oder teilweise zu, dass eine Übersicht aller verfügbaren und potenziellen Referenzsystem-Elemente (RSE) von Funkti-

onen des Gesamtproduktes – bspw. in Form einer Funktions-Roadmap – das Spezifizieren aus Funktionssicht positiv unterstützt hätte. Das Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 3.2.3.3) schafft für einen begrenzten Zeitraum das Modell eines realen Anbieter-Ökosystems. Nichtsdestotrotz gibt es teils Limitationen die diskutierten Ergebnisse der Fragebogenstudie direkt auf die reale Entwicklungspraxis zu übertragen. Die IP-Studierenden wurden vorab in Vorlesungen und Workshops intensiv mit Prozessen und Methoden u.a. auf Basis des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS vertraut gemacht. Aus diesem Grund werden die studentischen Produktentwickelnden, im Speziellen, systematisch auf die zu bewertenden Fragestellungen hingeleitet. Die große Zustimmung zum Unterstützungsbedarf in der Fragebogen-gestützten Umfrage muss dahingehend relativiert werden. (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

4.3.2.3 Erkenntnisse

Insgesamt lässt sich aus den Fragebogenstudien festhalten, dass die initial in der Klärung des Forschungsgegenstandes identifizierten *Erfolgsfaktoren ebenso einen hohen Praxisbedarf in der Produktspezifikation* aufweisen. Diese werden bisher jedoch noch *nicht ausreichend in Produktmodellen berücksichtigt*. Die Produktentwickelnden wünschen sich eine stärkere Berücksichtigung von *Systemdenken* (Systemansichten und -ebenen), *Stakeholder-Zentrierung*, *Differenzierung zwischen lösungsoffenen und -spezifischen Elementen*, *Nutzung von Referenzsystem-Elementen (RSE)* und einer *aktivitätsbasierten Dynamik* in der Weiterentwicklung existierender Ansätze zur Produktspezifikation. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass *Funktionen des Gesamtproduktes ein Mittel zur Konkretisierung von Produkteigenschaften* darstellen. Im Zuge dessen können *funktionale Produktkonzepte* genutzt werden, um einerseits *Stakeholder-Bedürfnisse in konkrete Anforderungen* an physische Elemente (Hardware/Software) *abzuleiten* und andererseits *Zielkonflikte* zwischen lösungsoffenen Produkteigenschaften und der lösungsspezifischen Realisierung zu *identifizieren*. Hieraus lässt sich ableiten, dass Funktionen des Gesamtproduktes ebenso in der *Bewertung der Produktspezifikation* von bedeutender Relevanz sind. Zusammenfassend lässt sich insbesondere der *Unterstützungsbedarf bei der Spezifikation funktionaler Produktkonzepte* hervorheben. Das funktionale Produktkonzept kann zur Konkretisierung des Produktprofils beitragen und zeichnet sich dabei durch *multidisziplinäre Zusammenhänge* in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_n aus. Nicht zuletzt konnte der Bedarf einer Übersicht „*funktionaler*“ Referenzsystem-Elemente als mögliche Unterstützung der Produktentwickelnden beim Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes identifiziert werden.

Die Erkenntnisse der Fragebogenstudie fließen in die nachfolgende Branchen-übergreifende Generierung alternativer Lösungen. Die identifizierten Unterstützungsbedarfe sollen dabei im Hinblick auf die Spezifikation von Produktkonzepten aus Funktionssicht beantwortet werden.

4.3.3 Branchen-übergreifende Generierung alternativer Lösungen zur Entwicklungsunterstützung des Spezifizierens aus Funktionssicht

Nachdem die spezifischen Herausforderungen der funktionalen Produktspezifikation in der automobilen Produktentwicklung analysiert und Unterstützungsbedarf auf Basis des Forschungsgegenstands und der Entwicklungspraxis identifiziert wurde, soll in diesem Abschnitt die Expertise von Produktentwickelnden aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Perspektiven zur Generierung von alternativen Lösungen zur Unterstützung des Spezifizierens aus Funktionssicht genutzt werden.

4.3.3.1 Studiendesign und -vorgehen

Als Grundlage zur Beantwortung der Forschungsfragen 2.2 und 3.3 wurde eine empirische Untersuchung über *Fragebogen und Delphi-Studie* (vgl. Anhang B.4) im Rahmen eines *Expertenforums* zum Anforderungsmanagement, der *re:work Smart Requirements Engineering 2019* (vgl. Abschnitt 3.2.3.4), durchgeführt. 120 Anforderungs- und Produktmanager sowie Systems Engineering Experten aus der D/A/CH-Region haben auf dieser industriellen Tagung gemeinsam den Umgang mit Anforderungen sowie den Herausforderungen einer effizienten Produktspezifikation in der mechatronischen Systementwicklung diskutiert. Das Expertenforum gliederte sich hierbei in Impulsvorträge ausgewählter Situationsanalysen und Problemeingrenzungen aus der Produktentwicklungspraxis und Workshops bzw. moderierten Gruppendiskussionen und Experteninterviews. Weiterführende und detaillierte Erläuterungen zum Forschungsvorgehen bzw. Studiendesign finden sich in Anhang C.1.1. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)

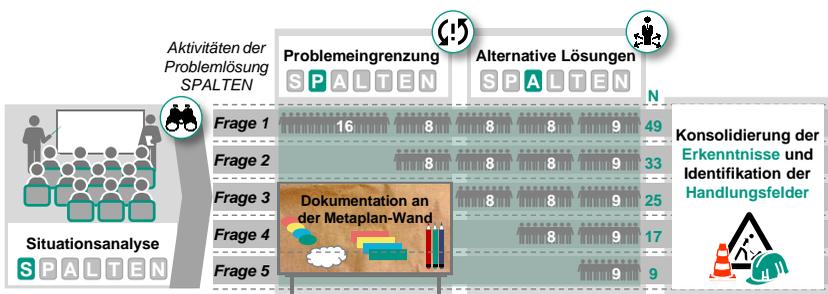


Abbildung 4.13: Studiendesign und -vorgehen zur branchenübergreifenden Generierung alternativer Lösungen (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 6)

Das gewählte Studiendesign (vgl. Abbildung 4.13) eignete sich besonders, weil die Inhalte der Fragestellungen aufeinander aufbauten, die Diskussion einen erhöhten Zeitaufwand erforderte, das Aufeinanderprallen verschiedener Perspektiven die Ergebnisgenerierung förderte und eine große Teilnehmerzahl aufgeteilt werden musste. Das Vorgehen gestaltete sich wie folgt. Die Mitglieder der einzelnen Gruppen (jeweils zwischen 8-16 Teilnehmer) starteten zunächst mit einer Beantwortung der gestellten Fragen des Fragebogens. Im Zuge dessen konnten für die geschilderte Situation bereits Probleme eingegrenzt und alternative Lösungen gefunden werden. Die Erkenntnisse wurden zum Abschluss jeder Runde gemeinsam konsolidiert und *Handlungsfelder für die Produktspezifikation* identifiziert. An einer Metaplan-Wand wurde dokumentiert, sodass die Ergebnisse in der nächsten Runde zur Präsentation der Diskussionen aus der vorherigen Runde genutzt wurden. Zusammenfassende Erkenntnisse, Überlegungen und Handlungsfelder wurden mittels Gesprächskarten und anderen Dokumentationsmaterialien festgehalten sowie visuell miteinander verknüpft. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020).

Insgesamt haben *49 Produktentwickelnden* verschiedener Hierarchieebenen – von (Senior) Manager (55%) bis hin zu Vorstandmitglied/Geschäftsführer (18%) – teilgenommen. Die granulare Übersicht zur Zusammensetzung der Teilnehmer findet sich in Anhang C.1.1 bzw. der Publikation Fahl, Hirschter, Maier et al. (2020). In den angehängten Abbildungen ist die Verteilung der Teilnehmer über *Industriesektor* bzw. *Unternehmensgröße* (vgl. Abbildung C.1) sowie *Berufserfahrung* und *Herkunftsland* (vgl. Abbildung C.2) abgebildet. Aufbauend auf der Ergebnisdiskussion des Workshops wurden wesentliche Erkenntnisse mit den Teilnehmern jeweils zum Ende der Session konsolidiert und Handlungsfelder synthetisiert, die im Folgenden vorgestellt werden – mit besonderem Fokus auf die vierte Fragestellung. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)

4.3.3.2 Ergebnisse

Die *erste Fragestellung* sollte das grundsätzliche Vorgehen zur Produktspezifikation in der Frühen Phase der Produktentwicklungspraxis erfragen. Über die *zweite Fragestellung* sollte eine Einschätzung der Teilnehmer zur Modellierung von Eigenschaften, Funktionen sowie deren technischer Realisierung in der Frühen Phase erhoben werden. Die grundsätzliche Differenzierung zwischen lösungsoffenen und lösungsspezifischen Elementen im Rahmen der Produktspezifikation wird in der *dritten Fragestellung* untersucht. Für eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Erkenntnisse der ersten drei Fragestellungen wird an dieser Stelle auf die Publikation Fahl, Hirschter, Maier et al. (2020, S. 7 f.) verwiesen. Die *vierte Fragestellung* wird im Folgenden zur Veranschaulichung der generierten Forschungsergebnisse detailliert erläutert. In diesem Zusammenhang wurde die Notwendigkeit zur Differenzierung verschiedener Ebenen von Funktionen durch die Gruppe herausgearbeitet, um so bspw. die Kunden- und Anwendersicht auf ein Produkt (In-/Output als Ereignis/Ergebnis) und die Produktentwickeln-

den-Sicht in der Realisierung des Produktes (In-/Output als Stoff-, Energie- und Informationsfluss) zu verbinden. Die adversativen Fragestellungen A und B bildeten den Startpunkt für die folgende Diskussion unter den Gruppenteilnehmern.

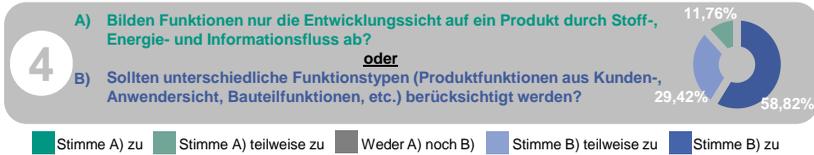


Abbildung 4.14: Vierte Frage – Unterscheidung zwischen verschiedener Ebenen von Funktionen (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 10)

Die Befragten stimmten mit 88,24% größtenteils zumindest teilweise für die Unterscheidung verschiedener Ebenen von Funktionen ab (vgl. Abbildung 4.14). Im Zuge dessen ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass der Notwendigkeit einer Differenzierung gleichermaßen eine unzureichende Berücksichtigung in den jeweiligen Unternehmen der Befragten gegenübersteht. Häufig werden Funktionen aus einer technischen Perspektive, wie sie der Produktentwickelnde bei der Realisierung des Produkts hat, eingenommen. Die methodisch richtige Vernetzung über verschiedene Ebenen findet dabei jedoch nicht statt. In der Gruppe wurden die Ursachen diskutiert. Produktentwickelnden wird früh beigebracht, in Lösungen zu denken und daher eine lösungsspezifische Sicht i.S.v. möglichen, technischen Realisierungen zu fokussieren. Die Gesamtprodukt-Perspektive wird dabei allzu häufig eher rudimentär betrachtet. Ein Perspektivenwechsel im Entwicklungsprozess ist kein triviales Unterfangen (vgl. Abbildung 4.15, links). (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)

Die zunehmende Komplexität in der Produktentwicklung trägt darüber hinaus dazu bei, dass eine übergreifende Entwicklung von Funktionen des Gesamtproduktes notwendig ist, soweit dies bei Anbietern mit einer hohen Anzahl an Produktlinien und Produktgenerationen möglich ist (vgl. Abbildung 4.15, rechts).



Abbildung 4.15: Vierte Frage – Studienergebnis aus Problemeingrenzung und Generierung alternativer Lösungen (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 11)

Weitere Lösungsvorschläge der Gruppe führten aus, dass sich anhand unterschiedlicher Ebenen von Funktionen sowohl die physische Sicht auf ein Produkt (in Form von materieller Hardware und immaterieller Software) als auch die Wahrnehmung der Kunden/Anwender (in Form von wahrnehmbaren Eigenschaften) verbinden lässt. In der Produktspezifikation sind insbesondere Funktionen des Gesamtproduktes zu berücksichtigen. Weiterhin folgerten die Befragten gemeinsam, dass eine einheitliche Systemarchitektur bei einem Anbieter die Verknüpfung unterschiedlicher Funktionen erleichtert. Insgesamt sehen die Teilnehmer in der Diskussion Handlungsfelder im Definieren und Abgrenzen der unterschiedlichen Funktionsverständnisse. Gleichermaßen kann eine strukturierte Formulierungsrichtlinie die Abgrenzung zwischen der Kunden-/Anwender- und Produktentwickelnden-Sicht stärken. Der Produktentwickelnde könnte in diesem Zuge mit einem einheitlichen Funktionsmodell unterstützt werden, das alle relevanten, sowohl lösungsoffenen als auch lösungsspezifischen, Schnittstellen abbildet. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)

Die *fünfte Fragefragestellung* beschäftigte sich mit den verschiedenen Herangehensweisen der Produktentwickelnden an die Bewertung des Reifegrads einer Produktspezifikation. An dieser Stelle wird für eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Erkenntnisse der letzten Fragestellungen in der Delphi-Studie auf die Publikation Fahl, Hirschter, Maier et al. (2020, S. 11 f.) verwiesen.

4.3.3.3 Erkenntnisse

Aus der Fragebogen- bzw. Delphi-Studie konnte eine Vielzahl an alternativen Lösungen und Handlungsfeldern auf dem Expertenforum synthetisiert werden. Hervorzuheben ist insbesondere, dass *unabhängig von Unternehmensgröße und Berufserfahrung*, die *bewusste Nutzung des Referenzsystems* als ein bedeutendes *Erfolgskriterium* der Produktspezifikation identifiziert wurde. Dabei wird die *Innovationsfähigkeit* explizit *nicht eingeschränkt*, da ein *Bewusstsein über die Herkunft und Reife einzelner Referenzsystem-Elemente* (RSE) geschärft wird. Die Studienteilnehmer sehen Vorteile in einer „*Delta-Beschreibung*“ einer Produktgeneration gegenüber *Referenzprodukten* (z.B. Vorgänger oder auch konkurrierende Produkte). Bei der Verwendung von RSE in der Produktspezifikation bedarf es allerdings einer *stärkeren Differenzierung der verschiedenen Elementtypen* – bspw. Eigenschaften, Funktionen, physische Elemente, aber auch Baukasten, Strategie oder Produktionssystem.

Kurze Iterationszyklen sind ebenso bei großen Anbietern erforderlich, um eine ausreichende *Stakeholder-Zentrierung* zu garantieren. Vor dem Hintergrund einer *Reduzierung der Komplexität* in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_n bietet es sich an, „*relevante*“ Umfänge von sowohl *lösungsoffenen als auch -spezifischen Elementen* über die *Systemansichten* von Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen zu *differenzieren* und zu *priorisieren*. Neben der Orientierung am Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen im Rahmen der Priorisierung ist ebenso die *Schaffung von einheitlicher Sprache* sowie *verständlichen Modellen und Strukturen* unentbehrlich. Die *Modellierung der lösungsoffenen und -spezifischen Elemente* sollte vor allen Dingen die *Wechselwirkungen* zwischen den verschiedenen *Systemansichten und -ebenen* inkludieren. Eine *vollständige und umfangreiche Modellierung* steht aufgrund von *Ressourcenknappheit* in der Frühen Phase einer *Priorisierung modellierter Elemente* nach. Kernaufgabe ist hierbei die *Stärkung der Aktivitäten* des „*Konkretisierens*“ und des „*Abstrahierens*“ in der Produktspezifikation.

Im Hinblick auf Funktionen gilt es, unterschiedliche Perspektiven und folglich Ebenen zu differenzieren. Die Kunden- und Anwendersicht auf Funktionen des Gesamtproduktes sind zu stärken, um damit eine *Produktgenerations-übergreifende Funktionsentwicklung* zu *fokussieren*. Für eine *Bewertung des Reifegrads der Produktspezifikation* erweisen sich *Funktionen* als wesentliches *Bindeglied* zwischen Eigenschaften und physischen Elementen, das Wechselwirkungen zwischen lösungsoffenen und -spezifischen Elementen abbilden kann. *Funktionale Produktkonzepte* schaffen dabei den *Dialog zwischen Anforderungen und der Spezifikation* sowie *der Bewertung von Produktkonzepten* aus Funktionssicht. Anknüpfend daran kann eine *Modellierung von funktionalen Wirkketten* das Verständnis der Zusammenhänge stärken. (Fahl, Hirscher, Maier et al., 2020)

Vor diesem Hintergrund ist ein strukturierendes *Produktmodell mit einheitlichen Systemebenen und -sichten* sowie ein *durchgängiges Verständnis* und *Abgrenzung* von (Produkt-)Eigenschaften und *Funktionen des Gesamtproduktes* sowie physischen Elementen (i.S.v. Hardware/Software) notwendig. Ein *konsistentes Abbildungsverständnis* zur *Nutzung des Referenzsystems* inkl. der *Variationsarten von Eigenschaften, Funktionen und physischen Subsystemen* zur *Beschreibung von Neuentwicklungs- und Übernahmeanteilen* neuer Generationen von Produkten hat das Potenzial die Produktspezifikation zu strukturieren. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)

4.3.4 Zwischenfazit: Handlungsfelder

In der zweiten, empirischen Studie der DS-I konnten unter Einsatz von Fragebogen-gestützten Umfragen in industrieller Produktentwicklung sowie im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung die Forschungsfragen 2.1 und 3.1 (vgl. Abschnitt 3.1.3) behandelt werden. Gepaart mit der Delphi-Studie und anknüpfenden Experteninterviews auf einem Expertenforum (Beantwortung der Forschungsfragen 2.2 und 3.3) wurden daraus Handlungsfelder zu Unterstützungsbedarf des Produktentwickelnden identifiziert:

- Abbau der heterogenen Streuung von sowohl Informations- sowie Wissensfragmenten als auch Artefakten zur adäquaten Allokation von Ressourcen aus Anbietersicht in der Frühen Phase und angemessene Ableitung der notwendigen Entwicklungsaktivitäten
- Transparenz über detaillierte Neuentwicklungs- und Übernahmeanteile in der Produktspezifikation auf Basis übertragener Elemente aus dem Referenzsystem in eine neue Produktgeneration
- Modell-gestützte Strukturierung zum Spezifizieren komplexer Produkte entlang determinierter Systemsichten und -ebenen, die vom Produktentwickelnden flexibel bspw. an die Spezifikation von Funktionen des Gesamtproduktes adaptiert werden kann
- Strukturierte Homogenisierung der Formulierung und Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes aus Stakeholder-Sicht, insbesondere in der Frühen Phase

Im nächsten Abschnitt wird auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse in Bezug zu *Unterstützungsbedarf der Produktentwickelnden* und der *alternativen Lösungssuche* in verschiedenen Domänen und Branchen das Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase zur Fokussierung auf eine *Lösungsauswahl* vertieft. In diesem Zuge wird ebenso die *Tragweite* einer gesamtheitlichen Implementierung von Funktionsverständnis, generischem Referenz-Produktmodell und Referenzprozess sowie methodischer Unterstützung der Produktentwickelnden untersucht.

4.4 Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase der Produktentwicklung

In der dritten Studie der umfassenden Deskriptiven Studie I werden die Erkenntnisse aus der systematischen Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.1.1.5) in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklungspraxis anhand von Fallstudien bewertet. Dazu soll insgesamt folgende Forschungsfrage aus Abschnitt 3.1.3 beantwortet werden:

FF1.1 Welche Besonderheiten charakterisieren Funktionen in Literatur und automobiler Produktentwicklungspraxis in Bezug auf die Frühe Phase im Modell der PGE?

Die Erkenntnisse aus Literatur und Praxis in Bezug auf das Funktionsverständnis in der Frühen Phase werden anschließend in zwei weiteren, empirischen Fallstudien angewendet. In diesem Rahmen sollen Ursachen identifiziert werden, um kritische oder auftretende Phänomene bei der Variation sowohl von physischen Elementen als auch Funktionen und Eigenschaften aufzudecken. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse sollen der Vermeidung von Risiko bzw. der Realisierung von Chancen bei der Implementierung eines generischen Funktionsverständnisses in der automobilen Produktentwicklungspraxis zugutekommen. Nachfolgende Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 3.1.3) werden zum Abschluss der DS-I behandelt:

FF1.2 Wie lassen sich die Phänomene der Variation von Funktionen im Modell der PGE generalisieren?

FF1.3 Wie wirken sich die Variationen von Funktionen auf physische Elemente aus?

Die in Abschnitt 4.3 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikationen Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020), Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020), Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020), Albers, Rapp, Fahl et al. (2020) und Albers, Hirschter, Fahl et al. (2022) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vsl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die empirischen Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden teilweise in vom Autor bzw. Tobias Hirschter Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Stai-ger (2020)⁴⁶, Haag (2020)⁴⁶, Endl (2019)⁴⁶, Ewert (2020)⁴⁷ und Rehn (2020)⁴⁷ am IPEK

⁴⁶ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

⁴⁷ Unveröffentlichte, von Tobias Hirschter Co-betreute Masterarbeit.

– Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers durchgeführt.

4.4.1 Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen

Zur Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase wurden im dritten Teil der umfassenden DS-I eine teilnehmende Beobachtung (vgl. Anhang B.1) sowie eine Fallstudie (vgl. Anhang B.6) im Volkswagen-Konzern (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) und zwei Fallstudien bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (vgl. Abschnitt 3.2.3.2). Das Studiendesign, die verwendeten, empirischen Methoden sowie Ziel und Inhalte ist in Abbildung 4.16 schematisch dargestellt.

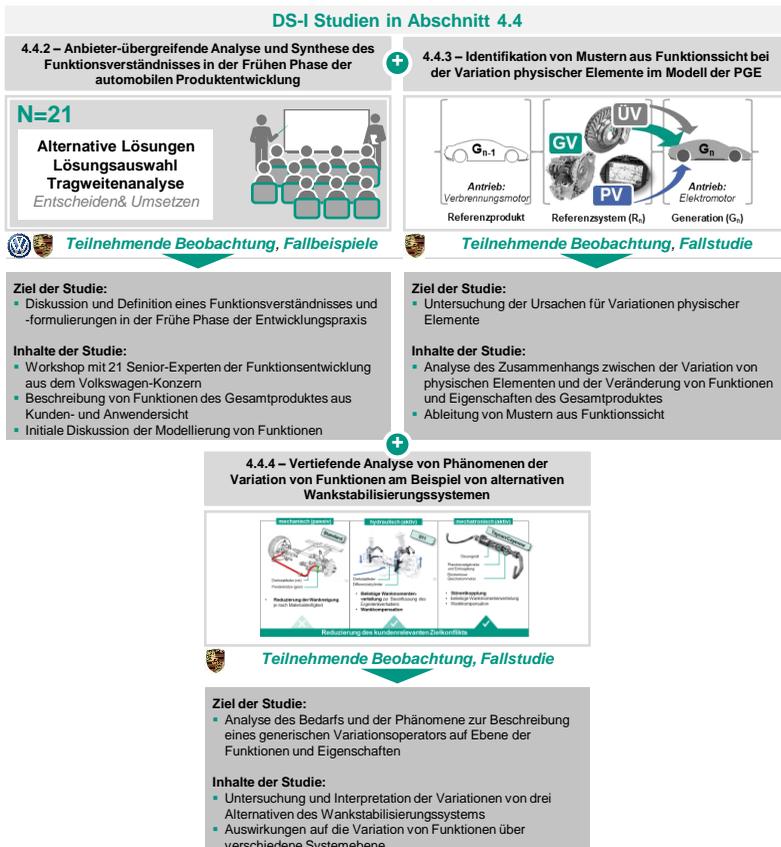


Abbildung 4.16: Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 4.4 der DS-I

Im Stand der Forschung erfolgte bereits durch eine systematische Literaturanalyse eine intensive Literaturanalyse zur Erweiterung des Funktionsverständnisses, aber ebenso dem Finden existierender Lösungsansätze (vgl. Abschnitt 2.1.1.5). Die Ergebnisse und Erkenntnisse daraus wurden als Grundlage für die Evaluierung und Bewertung in der Produktentwicklungspraxis genutzt (vgl. Abschnitt 4.4.2). Anschließend erfolgte eine Weiterverarbeitung der Erkenntnisse, Analyse und Interpretation in zwei aufeinander aufbauenden Fallstudien (vgl. Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4).

4.4.2 Anbieter-übergreifende Analyse und Synthese des Funktionsverständnisses in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklungspraxis

Auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse der systematischen Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.1.1.5), soll in dieser Studie das Verständnis von Funktionen in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklungspraxis ergründet werden. Die Analyse von Definitionen, Formulierungen und Modellierung von Funktionen in der Frühen Phase soll Grundlage für die Synthese eines Anbieter-übergreifenden Funktionsverständnisses bereitstellen. Anschließend daran soll das Wissen zur Identifikation von Auslösern der Variation physischer Elemente (vgl. Abschnitt 4.4.3) und die Analyse der auftretenden Phänomene der Variation von Funktionen (vgl. Abschnitt 4.4.4) in Fallstudien genutzt werden.

4.4.2.1 Studiendesign und -vorgehen

Ausgehend von den theoretischen Erkenntnissen (insbesondere durch die systematische Literaturanalyse in Abschnitt 2.1.1.5) wurde das Funktionsverständnis in der Entwicklungspraxis vertieft. Im Rahmen eines gemeinschaftlichen *Expertenworkshops bzw. -interviews* (vgl. Anhang B.5) mehrerer deutscher Automobilhersteller (OEM) des Volkswagen-Konzerns (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) wurde eine *teilnehmende Beobachtung* (vgl. Anhang B.1) durchgeführt. An einem Workshop, der von einem unabhängigen Moderator⁴⁸ geleitet wurde, waren insgesamt 21 Senior-Manager der Funktionsentwicklung beteiligt. Ziel war die Schaffung eines einheitlichen Funktionsverständnisses über die verschiedenen Anbieter hinweg. Zudem sollten Lösungsalternativen zur Integration des Funktionsbegriffs in die jeweiligen Bereiche von Forschung und Entwicklung (F&E), insbesondere der Konzeptentwicklung, erarbeitet werden. Dazu wurde das in Abbildung 4.17 dargelegte Vorgehen aus dem Studiendesign zur endgültigen Beantwortung der Forschungsfrage 1.1 abgeleitet.

⁴⁸ Anmerkung: In diesem Fall kein Mitarbeiter des Volkswagen-Konzerns, sondern einer externen Unternehmensberatung.



Abbildung 4.17: Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

Ausgangspunkt bildeten die spezifischen, alternativen Definitionen innerhalb der verschiedenen automobilen Anbieter, die zu Beginn zusammengetragen und wechselseitig vorgestellt wurden [1]. In einem zweiten Schritt wurden die Inkonsistenzen durch Gegenüberstellung der Funktionsbegriffe herausgearbeitet [2]. Anhand von fünf Fragen eines vorab verschickten Fragebogens wurde die initiale Diskussion des Funktionsverständnisses in der Frühen Phase der Produktentwicklungspraxis strukturiert [3]. Darüber hinaus wurde mit allen Experten diskutiert, inwieweit generische Funktionsstrukturen und Modellierungen von Funktionen über Generationen hinweg als Referenz für zukünftige Projekte dienen können. Ergebnis der Diskussion stellte die Synthese eines Anbieter-übergreifenden Funktionsverständnisses dar [4] (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Risiken und Chancen sollten durch eine Tragweitenanalyse anhand von Fallstudien (vgl. Anhang B.6) der Anbieter analysiert und zukünftiger Optimierungsbedarf identifiziert werden [5]. Schließlich wurde die initiale Implementierungs- und Evaluationsstrategie des Funktionsverständnisses über die verschiedenen Anbieter hinweg erarbeitet [6].

4.4.2.2 Ergebnisse

Die Workshop-Teilnehmer stellten in ihren Anbieter-spezifischen Vorbereitungen durchweg fest, dass Funktionen „eine Veränderung oder Transformation in einem funktionalen Kontext beschreiben“ und „einem Zweck dienen“. Insbesondere die Kunden- und Anwender-Perspektive auf eine Funktion ist in der Produktentwicklung von hoher Relevanz, da übergeordnete Funktionen eines Gesamtproduktes von Kunden und Anwendern wahrgenommen werden können. Diese tragen dann zur Differenzierung von Produkten am Markt bei. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass Funktionen bei der Betrachtung in der Frühen Phase – analog dem Literaturverständnis – Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen umwandeln. Aus der Sicht von Kunde und/oder Anwender können diese jedoch eher als „auslösende Ereignisse“ und „resultierende Ergebnisse“ charakterisiert werden. Kunden und Anwender erleben die Stoff-/Energie-/Informationsflüsse und Wechselwirkungen eines technischen Systems nicht direkt, sondern deren beobachtbaren Veränderungen der Situation und deren Auswirkungen auf das persönliche Handlungsumfeld. Demnach kann eine Funktion durch ein Ereignis ausgelöst werden und zu einem wahrnehmbaren Ergebnis führen.

Da unerwünschte oder unbeabsichtigte Funktionen ebenso in der Realität existieren, wurde die Notwendigkeit erkannt, die durch eine Funktion verursachte, tatsächliche Zustandsänderung zu berücksichtigen. Darüber hinaus wurde in den Diskussionen festgestellt, dass Funktionen in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses insbesondere aus Eigenschaften oder deren entsprechenden Anforderungen abgeleitet werden. In diesem Zuge konnte ein Konsens der Workshop-Teilnehmer über folgendes *Funktionsverständnis* erzielt werden (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 4):

„Eine Funktion ist eine Aufgabe, Handlung oder Aktivität, die ausgeführt wird, um ein gewünschtes Ergebnis zu erzielen. Die Funktion ist definiert als die Umwandlung von Eingabe- in Ausgabevariablen oder die interne Zustandsänderung eines Systems. Sie wird aus Anforderungen abgeleitet, die sich auf logischen Systemen (nicht ausschließlich dem Fahrzeugsystem) verorten und technisch durch physische Elemente (materiell/immateriell bzw. Hardware/Software) umsetzen lassen.“

Im weiteren Verlauf des Workshops wurde zudem der *fraktale Charakter von Funktionen* diskutiert. Es wurde der Schluss gezogen, dass sich Funktionen in Subfunktionen gliedern lassen, die wiederum durch Subfunktionen auf hierarchisch niedrigeren Systemebenen realisiert werden können. Darüber hinaus lassen sich Funktionen gleichermaßen über ihren Beitrag zum Zweck des Systems, i.S.v. Haupt- und Nebenfunktionen, strukturieren.

Nach der Verständigung über das Funktionsverständnis wurde anknüpfend die *Formulierung* solcher Funktionen anhand verschiedener Fallbeispiele diskutiert. An diesem Punkt waren sich die Experten einig, dass Funktionen grundsätzlich als Kombination von Substantiven und Verben formuliert werden können. Optional kann die Zweiwortformulierung durch weitere Attribute (z.B. Adverbien) ergänzt werden, um die Bedeutung oder den Zweck zu präzisieren. Neben der Feststellung, dass Subfunktionen auf Subsystem-Ebenen angesiedelt sein können, müssen ebenso übergeordnete Systemebenen (z.B. Supersysteme mit Charakter eines System-of-Systems) betrachtet werden. Anhand der Beispiele *„Sitz verstellen“* und *„Rückenlehne verstellen“* wurde ferner festgestellt, dass die Funktion zusätzlich über das Substantiv auf einer spezifischen Systemebene verortet oder einem konkreten Systemelement (hier Sitz bzw. Rückenlehne) zugeordnet werden kann. Die hierarchische Zerlegung von Funktionen ist eine grundlegende Aktivität der Produktentwicklung. Nichtsdestotrotz scheint es aus Sicht der Experten ebenso möglich, Funktionen gleichzeitig struktural bspw. anhand deren Beitrag zu Gesamtfunktionen in Haupt- und Nebenfunktionen zu gliedern. Die beiden Konzepte ergänzen sich dabei und schließen sich nicht gegenseitig aus, d.h. eine Funktion kann koinzident in Subfunktionen gegliedert und Haupt- und Nebenfunktionen strukturiert werden. Ein weiteres Ergebnis des Workshops ist die Be-

schreibung der Attribute der Funktion über Adverbien. Dies wurde anhand der Funktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ diskutiert, da das Adverb „aktiv“ diese Form der Funktion von einer „passiven“ Fahrzeugaerodynamik-Funktion trennt und damit eine Variation der Ausprägung dieser Funktion beschreibt. Bei prinzipiell unterschiedlichen Funktionen wie bspw. „*Innenraum heizen*“ und „*Innenraum belüften*“ ändert sich das Verb in der Kombination. Das Wirkprinzip einer Funktion scheint folglich über das Verb ausgedrückt zu werden.

Zur weiteren Vertiefung dieser Erkenntnis wurden die vorhandenen Konzeptdokumente der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG im Hinblick auf den Status quo der Funktionsformulierung analysiert (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Die funktionale Produksubstanz vor Kunde bzw. Anwender wird in der Frühen Phase bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG auf der Basis des so genannten „*funktionalen Produktsteckbriefs*“ (vgl. Abschnitt 4.2) erfasst. Dieses Artefakt beschreibt dabei die ca. 50-100 wichtigsten Funktionen des Fahrzeugprojekts aus Kunden- und Anwendersicht. Um diesen Sachverhalt quantitativ zu untersuchen, wurden drei in der Entwicklung befindliche Produktgenerationen aus drei verschiedenen Produktlinien eingehend untersucht. Die verschiedenen Formulierungen wurden auf Grundlage der Erkenntnisse aus der systematischen Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.1.1.5) in fünf Kategorien eingeteilt [System, Physisches Element, Substantiviertes Verb, Substantiv + (Adverb) + Verb, Sonstige] (vgl. Abbildung 4.18). Insgesamt wurden 181 Funktionen der drei funktionalen Produktsteckbriefe analysiert und den identifizierten Kategorien zugeordnet. Es wurde festgestellt, dass anstelle von Funktionen oftmals physische Elemente oder Systeme auf dem funktionalen Produktsteckbrief beschrieben werden. Andere Formulierungsformen, wie z.B. i.S.v. Dienstleistungen, Ausstattungsvarianten oder ähnliches, wurden unter der Kategorie Sonstiges klassifiziert. Diese konnten keiner der anderen vier Kategorien zugeordnet werden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.18 dargestellt (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020).

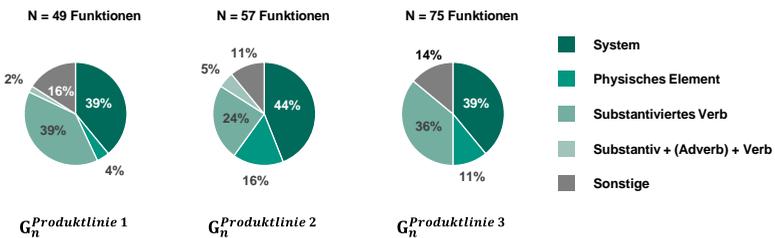


Abbildung 4.18: Analyse der Funktionsformulierung von drei Produktgenerationen aus unterschiedlichen Produktlinien auf Basis des funktionalen Produktsteckbriefs (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 5)

Schließlich konzentrierte sich der Workshop auf die Potenziale einer *Funktionsmodellierung*, die u.a. eine Reifegradverfolgung über Subfunktionen während des gesamten Entwicklungsprozesses ermöglicht. An dieser Stelle stellten die Teilnehmer fest, dass Funktionen in der praktischen Konzeptentwicklung nicht aus der Kunden- oder Anwendersicht modelliert werden. Die Modellierung findet nur für technische Funktionen im Rahmen der E/E-Architekturentwicklung zur lösungsspezifischen Umsetzung statt. Im Folgenden wurden im Workshop einige Potenziale für die softwarebasierte Modellierung von Funktionen aus Kunden- bzw. Anwendersicht aufgezeigt. Zeitpunkt und Umfang der softwarebasierten Modellierung sollten projektspezifisch festgelegt werden. Die Workshop-Teilnehmer waren sich einig, dass eine vollständige Modellierung – zumindest im Automobilbereich – in der Frühen Phase aufgrund der Komplexität von modernen Fahrzeugen nicht unbedingt zielführend ist. Dennoch scheint die Modellierung ausgewählter, funktionaler Wirkungsketten vorteilhaft zu sein. Letztlich wurde die Implementierungsstrategie über die verschiedenen OEMs hinweg entwickelt und evaluiert. Aus Gründen der Geheimhaltung kann diese in der vorliegenden Forschungsarbeit nicht weiter ausgearbeitet werden, generierte aber keine zusätzlichen, relevanten Erkenntnisse in Bezug auf das Funktionsverständnis.

4.4.2.3 Erkenntnisse

Erkenntnisse der teilnehmenden Beobachtung und Dokumentenanalyse in dieser Studie beziehen sich vorrangig auf Definition, Formulierung und Modellierung von Funktionen (des Gesamtproduktes) in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklungspraxis. Das Funktionsverständnis aus einer *insbesondere Kunden- und Anwender-orientierten Sichtweise* erfordert eine *Abstraktion von technischen Funktionen*. Zur *Stärkung der Stakeholder-Zentrierung* sollte angestrebt werden, die *Funktionen des Gesamtproduktes* als eine *lösungsoffene Wirkbeziehung* zwischen *beobachtbaren bzw. wahrnehmbaren Ereignissen* (Ursache) und *Ergebnissen* (Auswirkung) zu verstehen. Gleichmaßen muss dieses Verständnis auf die *Formulierung von Funktionen* übertragen werden, um einerseits die *Bedeutung klar herauszustellen* und andererseits die *Systemebene zu betonen*, auf die sie sich bezieht. Die Analyse der Konzeptdokumente – wie bspw. der funktionale Produktsteckbrief – haben offenbart, dass die „*Funktionen*“ darauf zu teilweise mehr als 50% eher *physische Elemente* oder *Systeme* bezeichnen (vgl. Abbildung 4.18). Darüber hinaus wurden Funktionen oftmals in Form *substantivierter Verben* formuliert. Dies entspricht weder der übereinstimmenden Meinung in der Fachliteratur (vgl. Abschnitt 2.1.1.5) noch dem Verständnis der Experten, die an dieser Studie teilgenommen haben. In Bezug zu *Modellierungsaktivitäten von Funktionen*, sehen die Experten Potenziale in einer *modellbasierten Vorgehensweise*, sofern die *Modelle der Funktionen übergreifend für weitere Produktgenerationen im Produktportfolio genutzt* werden könnten. Der *hohe initiale Aufwand* und die Randbedingungen der Frühen Phase machen eine vollumfängliche Modellierung von Funktionen nahezu unmöglich. Der *Einsatz von Model-Based Systems Engineering* (MBSE, vgl. Abschnitt 2.1.4.1) wird hierbei als Schlüsselfaktor gesehen.

4.4.3 Identifikation von Mustern aus Funktionssicht bei der Variation physischer Elemente im Modell der PGE

Um ein tieferes Verständnis von Auslösern der Variation physischer Elemente auf Basis des erarbeiteten Funktionsverständnisses aus der Praxis zu erhalten, wurde die Frühe Phase der Entwicklung eines realen Fahrzeugprojekts bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG analysiert (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020).

4.4.3.1 Studiendesign und -vorgehen

Eine *Fallstudie* (vgl. Anhang B.6) zur Untersuchung der Ursachen für Variationen physischer Elemente wurde in Form einer *teilnehmenden Beobachtung* (vgl. Anhang B.1) über einen Zeitraum von 18 Monaten in der Konzeptentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) durchgeführt (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020). Ziel war es, in Beantwortung der Forschungsfrage 1.3, dabei ein vertiefendes Verständnis zu den Auslösern der Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation zu erlangen und den Zusammenhang zu den Veränderungen von Eigenschaften und Funktionen zu analysieren.

Bei der analysierten Produktgeneration G_n handelt es sich um eine Nachfolger-Produktgeneration mit neuer Kern-Antriebstechnologie (vgl. Abschnitt 2.1.3.3). Da sich die Produktgeneration zum Zeitpunkt der Studie noch in der Entwicklung befand, wurden vorhandene Konzeptdokumente analysiert, die den damaligen Planungsstand widerspiegelten. Um die Komplexität bezüglich der Herkunft der Referenzsystem-Elemente (RSE) zu begrenzen, bezieht sich die Vorstudie zunächst nur auf ein einziges Referenzprodukt, die vorausgehende Produktgeneration G_{n-1} der gleichen Produktlinie. Die analysierten Eigenschaften sowie Funktionen beziehen sich in den nachfolgenden Betrachtungen immer auf das Gesamtprodukt. Für die Dokumentenanalyse wurden daher das *Eigenschaftsprofil*⁴⁹ der zu diesem Zeitpunkt aktuellen *Entwicklungsgeneration* $E_{n,j}$, der *funktionale Produktsteckbrief*⁵⁰ und eine *technische Produktbeschreibung* (Stückliste aller physischen Elemente) berücksichtigt. Basierend auf dem Studiendesign wurde folgendes Vorgehen gewählt (vgl. Abbildung 4.19).

⁴⁹ enthält alle Zielwerte bzw. Soll-Ausprägungen der betrachteten Eigenschaften des Gesamtproduktes, vgl. Abschnitt 2.2.5.

⁵⁰ Kondensat der direkt wahrnehmbaren, Kunden- und Anwender-relevanten Funktionen des Gesamtproduktes, vgl. Abschnitt 4.2.



Abbildung 4.19: Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung der Fallstudie (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

In einer Vorstudie wurden zunächst anhand der technischen Produktbeschreibung die Variationsarten der physischen Elemente des realen Fahrzeugentwicklungsprojekts anhand der C&C²-basierten Indikatoren⁵¹ identifiziert [1]. In der technischen Produktbeschreibung wird eine Klassifizierung von physischen Elementen benutzt, die sich leicht auf die Variationsarten im Modell der PGE übertragen ließ. In einem zweiten Schritt wurden die Auslöser dieser Variationen unabhängig der Betrachtung von Eigenschaften und Funktionen analysiert [2]. Den teilnehmenden Beobachtern der Studie war dies möglich, da sie Mitglieder des führenden Gremiums der Konzeptentwicklung der Produktgeneration G_n waren. In einer vertiefenden Dokumentenanalyse wurden anschließend *Eigenschaftsprofil*, *funktionaler Produktsteckbrief* und *technische Produktbeschreibungen* verknüpft und die Veränderungen über diese drei Sichten hinweg verglichen. Dabei wurden Muster⁵² sowohl aus Funktions- als auch Eigenschaftssicht bei der beobachteten Variation physischer Elemente analysiert [3, 4]. Das heißt, einerseits wurden die Einflüsse gezielter Veränderungen der Ausprägung von Funktionen/Eigenschaften auf die Variation physischer Elemente analysiert. Andererseits wurden gleichermaßen die umgekehrten Einflüsse der Variation physischer Elemente auf Funktionen/Eigenschaften untersucht. Da Eigenschaften, Funktionen und physische Elemente $n \times n$ zueinander verknüpft sind, wurden die berücksichtigten Wechselwirkung in der Studie zur Verringerung der Komplexität auf maximal drei Verknüpfungen limitiert. Abschließend wurden die Erkenntnisse – insbesondere aus Funktionssicht – daraus synthetisiert [5]. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020).

⁵¹ vgl. Abschnitt 2.1.3.4 oder das Vorgehen anhand dem Beispiel des Zweimassenschwungrads in Albers, Bursac & Rapp (2017).

⁵² Ein *Muster* beschreibt nach Deigendesch (2009, S. 129) die „invarianten Merkmale einer Vielzahl von Lösungen zu ähnlichen Problemstellungen in einer definierten Situation“ und charakterisiert „eine feste Struktur inhaltlicher Elemente und deren Verknüpfung zu über- und untergeordneten Mustern“.

4.4.3.2 Ergebnisse

Zur Identifizierung der Auslöser einer Neuentwicklung⁵³ (PV, GV) physischer Elemente wurde eine in der Entwicklung befindliche Produktgeneration G_n analysiert. Das Gesamtfahrzeugsystem wurde auf der Basis einer vorhandenen Referenzstruktur in 452 physische Elemente (ausschließlich Hardware) aufgeteilt und analysiert. Bezogen auf die Vorgänger-Produktgeneration G_{n-1} konnte ein Anteil von 15% *Übernahmevariation* (ÜV), ein Anteil von 71% *Gestaltvariation* (GV) und ein Anteil von 13% *Prinzipvariation* (PV) erfasst werden (vgl. Abbildung 4.20). Die Produktgeneration G_n wird mit einer prinzipiell neuen Antriebsstrangtechnologie realisiert, was den hohen Anteil an Neuentwicklungen erklärt. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

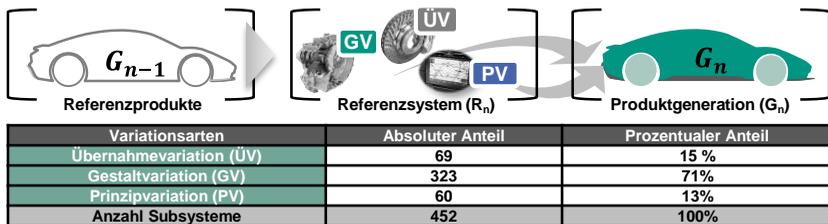


Abbildung 4.20: Variationsanteile der physischen Elemente eines realen Fahrzeugprojekts G_n in Bezug zur Vorgänger-Produktgeneration G_{n-1} (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 668)⁵⁴

Nachdem die Variationen der physischen Elemente ermittelt wurden, folgt eine umfassende, teilnehmende Beobachtung unabhängig der Betrachtung von Eigenschaften und Funktionen. Dies wurde dadurch ermöglicht, dass die teilnehmenden Beobachter Mitglieder des Produktentwicklungsteams waren, das die konzeptionelle Arbeit leitete. Bei der weiteren Analyse der Auslöser von Variationen physischer Elemente wurden die *Veränderung*⁵⁵ von Eigenschaften und Funktionen des Gesamtproduktes – insbesondere durch neue Antriebsstrangtechnologie, Steigerung der Funktionsqualität, Anpassung durch ein modifiziertes Package des Gesamtsystems, Produktlinien-übergreifende Weiterentwicklung von Subsystemen, Kosten- und Gewichtsreduzierung⁵⁶ – untersucht. In diesem Fall wurden nur die auslösenden Eigenschaften und Funktionen

⁵³ Anmerkung: Bei der Übernahmevariation (ÜV) können ebenso Neuentwicklungsanteile – bspw. an den Connectoren – festgestellt werden. Dieser Zusammenhang wurde aufgrund der sich ergebenden Komplexität in den Betrachtungen zunächst nicht explizit in dieser Studie berücksichtigt.

⁵⁴ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

⁵⁵ *Veränderung* umfasst hier das Hinzufügen, Entfernen sowie Modifikation der Merkmale (bestehende Eigenschaft) oder Wirkung (bestehende Funktion).

⁵⁶ Anmerkung: Reihenfolge mit sinkender Priorität.

des Gesamtproduktes für die Variation der physischen Subsysteme analysiert. Detaillierte Erläuterungen zum Einfluss der Variation eines physischen Elements auf die *Variation von Eigenschaften des Gesamtproduktes* findet sich in der Publikation Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020). (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Während die PV eines physischen Elements fast ausschließlich zu einer Änderung der Eigenschaft führt (97%), führt eine GV bei 48% der betrachteten Eigenschaft nicht zu einer Änderung der Eigenschaften. Dabei ist zwischen den Eigenschaften des Gesamtproduktes, wie z.B. dem „*Beschleunigungsverhalten*“, und den Eigenschaften der physischen Gestalt, wie z.B. dem „*Durchmesser der Kurbelwelle*“, zu unterscheiden. Der hohe Anteil deutet auf die Qualität des Prozesses zur Definition von Eigenschaften nach Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018) hin, der bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG angewendet wird. Umgekehrt bedeutet dies, dass nur ein sehr kleiner Teil der PV für den Kunden nicht erlebbar ist. Diese Variation der physischen Elemente wird insbesondere durch eine Weiterentwicklung bereits bestehender Subsysteme aus G_{n-1} in anderen Produktlinien (35%) sowie eine gezielte Reduktion von Kosten und Gesamtgewicht (36%) vorangetrieben. Aus diesem Grund folgt somit keine direkte Auswirkung auf die Produkteigenschaften. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Funktion → Phys. Element „Identifikation von Auslösern für die Variation von phys. Elementen“		Phys. Element → Funktion „Einfluss der Variationsarten auf Funktionen des Gesamtproduktes“				
Funktion	Variation phys. Elemente			Funktion		
	ÜV	GV	PV	Variation phys. Elemente	keine Veränderung	Veränderung
Keine Veränderung	13,5 %	85 %	1,5 %	ÜV	51 %	49 %
Veränderung	10 %	73 %	17 %	GV	48 %	52 %
				PV	7 %	93 %

Abbildung 4.21: Zusammenhang zwischen Veränderungen von Funktionen des Gesamtproduktes und den Variationsarten physischer Elemente (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 669).

Betrachtet man den Einfluss der Funktionen des Gesamtproduktes auf die Variationsarten der physischen Elemente, so ist zu beobachten, dass die funktionale Veränderung (neue Funktion, Qualitätssteigerung einer Funktion oder Modifikation der technischen Umsetzung) zu einem Neuentwicklungsanteil (PV, GV) von 90% führt (vgl. Abbildung 4.21). Dennoch lässt sich auch bei der Übernahme einer Funktion aus G_{n-1} ein kumulierter Neuentwicklungsanteil (PV, GV) von 86,5% ermitteln. Ähnlich wie beim Einfluss der Eigenschaften ist der Anteil der GV sehr hoch (85%), wenn eine Funktion übernommen wird. Der hohe Anteil an Neuentwicklungen – trotz unveränderter Funktion des Gesamtproduktes – ist analog zu den Eigenschaften auf Gewichts- und Kostenreduzierungen sowie auf das neue Antriebskonzept zurückzuführen. Abbildung 4.21 zeigt rechts die inverse Analyse. Die Identifikation der Auslöser für die Variation physischer Elemente ist aufschlussreicher, wenn man die Auswirkungen der Variationsarten und die Veränderung der Funktionen des Gesamtproduktes betrachtet. Aus

der Sicht der Funktionen führt die PV eines physischen Elements in 93% der betrachteten Fälle zu einer funktionalen Veränderung. Mit der PV einher geht eine teils massive, physische Gestaltvariation zur Umsetzung des neuen Prinzips. Auf der anderen Seite führt ein GV nur in 52% der Fälle zu einer Veränderung der Funktionen des Gesamtproduktes. Somit liegt der Prozentsatz nur geringfügig über dem Übernahmeanteil (49%), der zu einer funktionalen Veränderung führt. Der Neuentwicklungsanteil (43%), der sich nicht auf die Funktionen auswirkt, ist insbesondere als physische Gestaltanpassung aus dem Referenzprodukt G_{n-1} (56%) zu betrachten. Darüber hinaus führen Weiterentwicklungen der bereits in anderen Produktlinien des Produktportfolios realisierten, physischen Elemente, wie z.B. Sensoren für Fahrerassistenzsysteme (34%) und Maßnahmen zur Kosten- und Gewichtsreduzierung (10%), zu weiteren GVs, die ebenfalls keine Auswirkungen auf Funktionen des Gesamtproduktes haben (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020).

4.4.3.3 Erkenntnisse

Als Erkenntnis der Studie kann zunächst festgehalten werden, dass *weitere Informationen* über die *realisierenden Funktionen und Eigenschaften eines physischen Elements* notwendig sind, um *Auslöser und Wahrscheinlichkeit für deren Variation* zu identifizieren. Insbesondere aufgrund der *hohen Korrelation der Prinzipvariation mit der Veränderung von Eigenschaften und Funktionen* kann der Schluss gezogen werden, dass auf der Basis von Eigenschaften und Funktionen Rückschlüsse auf die Variation physischer Elemente gezogen werden können. Da diese Rückschlüsse, im Sinne einer *lösungsoffenen Produktdefinition*, bereits sehr früh im Entwicklungsprojekt zur Verfügung stehen, sollte dieses Wissen zur *Abschätzung der Realisierungsunsicherheit* und zur *Planung der Entwicklungsgenerationen* genutzt werden.

Eigenschaften eignen sich besonders für die *Spezifikation in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_n* im Modell von PGE. Darüber hinaus muss insbesondere in der Frühen Phase die Suche nach (vor allem internen) *Referenzsystem-Elementen (RSE) aus Funktions- und Eigenschaftssicht methodisch unterstützt* werden, um den hohen Anteil der Neuentwicklung (PV + GV insgesamt 85%) zu minimieren. Da die GV-Anteile der physischen Elemente für Eigenschaften und Funktionen sowohl für die *geplante Zieländerung* als auch für die *geplante Übernahme* vergleichsweise hoch waren, müssen die *Variationen der Eigenschaften und Funktionen weiter analysiert* werden. Die *bestehenden Variationsarten* (ÜV, GV und PV) können jedoch *nicht ohne Adaption auf Eigenschaften und Funktionen übertragen* werden. Insbesondere die *Gestaltvariation (GV)* zielt auf das *Vorhandensein von materiellen, physischen Systemelementen* (Analyse von Prinzip und Gestalt anhand von C&C²-basierten Indikatoren) ab. Es ist erforderlich, eine *einheitliche Syntax und Semantik zur generischen Beschreibung der Variationsarten von verschiedenen Systemelementen im Modell der PGE* zu definieren. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt die *Phänomene der Variation von Funktionen* (und Eigenschaften) an einem *Fallbeispiel* vertieft analysiert, um Aussagen über deren Variationsarten treffen zu können.

4.4.4 Vertiefende Analyse von Phänomenen der Variation von Funktionen am Beispiel von alternativen Wankstabilisierungssystemen in der Sportwagenentwicklung

Im Anschluss an die initiale Identifikation von Mustern der Variation von Funktionen des Gesamtproduktes im vorangehenden Abschnitt wurde eine vertiefende Analyse der Phänomene der Variation von Funktionen über mehrere Systemebenen hinweg durchgeführt. Das nachfolgende Beispiel alternativer Referenzsystem-Elemente von Wankstabilisierungssystemen ist aufgrund von geheimhaltungsrelevanten Inhalten an gewissen Stellen in Bezug zur Praxis/Realität minimal abstrahiert oder vereinfacht – ohne dabei die Erkenntnisse der Studie zu beeinträchtigen.

4.4.4.1 Studiendesign und -vorgehen

Das Modell der PGE liefert ein Beschreibungsmodell der Variationen von Systemelementen. In der vorangehenden Studie wurde jedoch aufgezeigt, dass es einen *Weiterentwicklungsbedarf der Begrifflichkeit von vergleichbaren Phänomenen der Variation aus Funktions- und Eigenschaftssicht* gibt. Das Ziel der folgenden Studie ist es daher anhand des C&C²-Ansatzes (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) in einer *Fallstudie* (vgl. Anhang B.6) die Variationsarten der physischen Elemente von drei alternativen Referenzsystem-Elementen (RSE) des Wankstabilisierungssystems in der Sportwagenentwicklung zu analysieren. Die Ergebnisse und Erkenntnisse sollen zur Beantwortung der Forschungsfrage 1.2 beitragen. Das *Stabilisierungssystem* eines Fahrzeugs bestimmt neben Federungs- und Dämpfersystem als dritter, grundsätzlicher Bestandteil die wesentlichen Fahreigenschaften. Zu den drei technischen Lösungsalternativen des Wankstabilisierungssystems zählen die *passive, hydraulische und elektromechanische Wankstabilisierung* eines Fahrzeugs (nachfolgend jeweils kurz PWS, hAWS und eAWS. Initial wird dazu eine Literaturrecherche der drei gängigsten technischen Lösungsalternativen des Wankstabilisierungssystems durchgeführt. Die Fallstudie basiert auf einer *teilnehmenden Beobachtung* (vgl. Anhang B.1) über einen Zeitraum von sechs Monaten und wurde bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG durchgeführt (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022). Die teilnehmenden Beobachter waren in der prozessualen und methodischen Ausgestaltung der Bewertung von Funktionen und Eigenschaften integriert.

Aus den vorangehend genannten Gründen eigneten sich die alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems sehr gut für eine retrospektive Untersuchung über unterschiedliche Systemebenen hinweg. Dabei wurden das Modell der PGE (vgl. Abschnitt 2.2) und der C&C²-Ansatz (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) genutzt, um das Verständnis der Variation von Systemelementen aus verschiedenen Sichten (Eigenschaften, Funktionen, Physische Elemente) zu vertiefen. Ziel war es dabei insbesondere, die Abhängigkeiten der Variationsarten in den verschiedenen Sichten zu verstehen, daraus Anforderungen an einen generischen Variationsoperator herzuleiten und das Systemverständnis auf Funktionen und Eigenschaften anzuwenden. Darüber hinaus wurde die Variation von Systemelementen auf verschiedenen Systemebenen analysiert. Eine Generalisierung der Erkenntnisse über Variationsarten von Funktionen und Eigenschaften sowie die Zusammenhänge der Phänomene in den Sichten soll den Produktentwickelnden bei der gezielten, kunden-relevanten Variation in der Frühen Phase im Modell der PGE unterstützen. Das in folgender Abbildung 4.22 dargestellte Vorgehen wurde in der Studie umgesetzt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

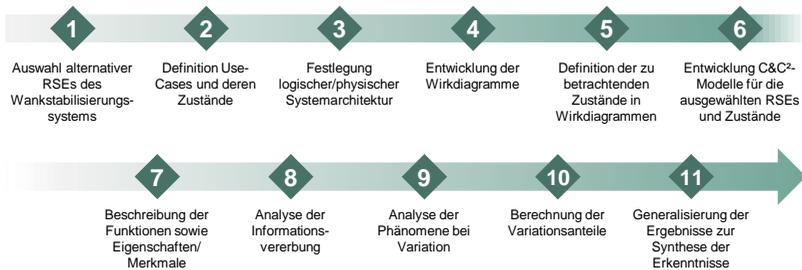


Abbildung 4.22: Vorgehen im Zuge der teilnehmenden Beobachtung der Fallstudie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 6)

In einem ersten Schritt wurden drei alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems ausgewählt [1] und Use-Cases (dynamische Abfolge von mehreren Zuständen) bzw. deren (statisch) Zustände definiert [2]. Zur Ermöglichung einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde anschließend eine logische sowie physische Systemstruktur bzw. -architektur festgelegt [3], in der die drei alternativen RSE verortet wurden. Anknüpfend daran wurden die Wirkdiagramme auf den ersten drei Systemebenen des Fahrzeugs entwickelt [4] und die zu betrachtenden Zustände in ebendiesen Wirkdiagrammen definiert [5]. Im Anschluss wurden C&C²-Modelle für die ausgewählten RSE und zugehörigen Zustände entwickelt [6]. Auf Grundlage der C&C²-Modelle sowie den Wirkdiagrammen wurden Funktionen sowie die Eigenschaften und deren Merkmale beschrieben [7]. Daraufauf wurde die Vererbung der Informationen über die Systemebenen hinweg analysiert [8], um schließlich die Phänomene der Variation aus Funktions- und Eigenschaftssicht zu untersuchen [9]. Als Nächstes wurden dazu die Variationsanteile der drei alternativen RSEs berechnet und miteinander verglichen

[10]. In einem letzten Schritt erfolgte die Generalisierung der Ergebnisse zur Synthese von Erkenntnissen [11]. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

4.4.4.2 Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden die physischen Lösungsalternativen des Wankstabilisierungssystems in aktuell am Markt verfügbaren Fahrzeugen analysiert. Hierbei konnten drei wesentliche Varianten erfasst werden, die im Folgenden als die drei alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems im Betrachtungsgegenstand dieser Studie ausgewählt wurden (vgl. Abbildung 4.23). Eine detaillierte Erörterung der Funktionsweise der drei Wankstabilisierungssysteme findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang C.2.1. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

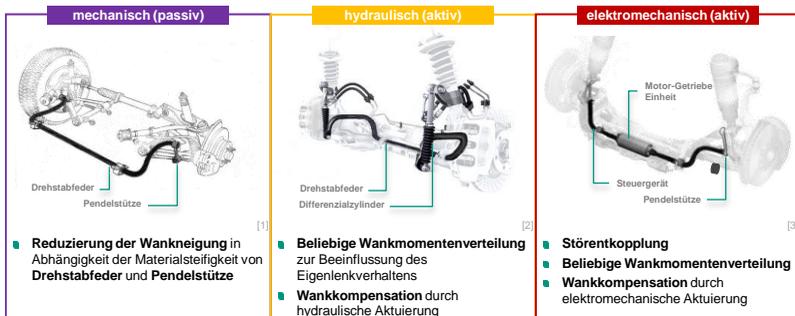


Abbildung 4.23: Übersicht der betrachteten alternativen Referenzsystem-Elemente (RSE) der passiven, hydraulisch aktiven und elektromechanisch aktiven Wankstabilisierung (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 7)⁵⁷

Anschließend wurden die relevanten, *dynamischen Use-Cases* betrachtet, in denen das Wankstabilisierungssystem das Gesamtfahrzeugverhalten maßgeblich beeinflusst (vgl. Abbildung C.3), die in Anhang C.2.1 erläutert werden. Zum Zweck einer Vergleichbarkeit der Beobachtungen und Analyseergebnisse wurde nachfolgenden eine (*lösungsoffene*) *logische Systemarchitektur* für das Fahrzeugsystem in der Studie definiert. Diese logische Systemarchitektur wurde aus Beobachtungen in der Automobilindustrie abgeleitet und hat den Anspruch einerseits keine technischen Lösungen in der Beschreibung der Systeme vorwegzugreifen und andererseits über mehrere Generationen hinweg als „Referenz-Systemarchitektur“ zu dienen. Der relevante Ausschnitt für die Studie ist in Abbildung C.4 in Anhang C.2.1 dargestellt. Anschließend an die Definition der logischen Systemarchitektur wurde darauf aufbauend eine (*lö-*

⁵⁷ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

ungsspezifische) *physische Systemarchitektur* auf drei Subsystem-Ebenen abgeleitet, um die *drei alternativen RSE der Wankstabilisierung bzw. deren konstituierenden Subsysteme*, die in dieser Studie im Fokus stehen, zu *verorten* (vgl. Abbildung C.5). Die Darstellung findet sich in Anhang C.2.1 (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Die *Zugehörigkeiten der Systemelemente* zu den drei alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems (PWS, hAWS, eAWS) sind in Abbildung C.5 in Anhang C.2.1 jeweils *farblich markiert*. In einem Fahrzeug ist grundsätzlich immer nur eine Lösungsalternative des Wankstabilisierungssystems möglich. Theoretisch könnten zwar an der Vorder- und Hinterachse unterschiedliche Varianten eingesetzt werden, das ist in der Praxis jedoch aufgrund von Aufwand, Kosten, Komplexität, etc. nahezu ausgeschlossen. Dementsprechend sind nur die über farbliche Markierung verknüpften Systemelemente notwendig und alle Weiteren – zumindest aus Sicht einer Variante des Wankstabilisierungssystems – überflüssig. Im betrachteten Beispiel wird vereinfacht nur auf die Wankstabilisierung der gelenkten Vorderachse eingegangen. Die Auswirkungen der physischen Elemente der drei alternativen Wankstabilisierungssysteme wurden ebenso aus Gründen der Übersichtlichkeit in der logischen Systemarchitektur markiert. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Mit dem Ziel, die konkreten Zusammenhänge der Use-Cases in der logischen Systemstruktur darzustellen, wurden für die Ebenen 1,2, und 3 jeweils ein *Wirkdiagramm der Systemebene* ausgearbeitet (vgl. Abbildung C.6, Abbildung C.7 und Abbildung 4.24). Beispielhaft ist nachfolgend das Wirkdiagramm auf Ebene 3 visualisiert (vgl. Abbildung 4.24), die Wirkdiagramme der Ebenen 1 und 2 finden sich mit Erläuterungen in Anhang C.2.1. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

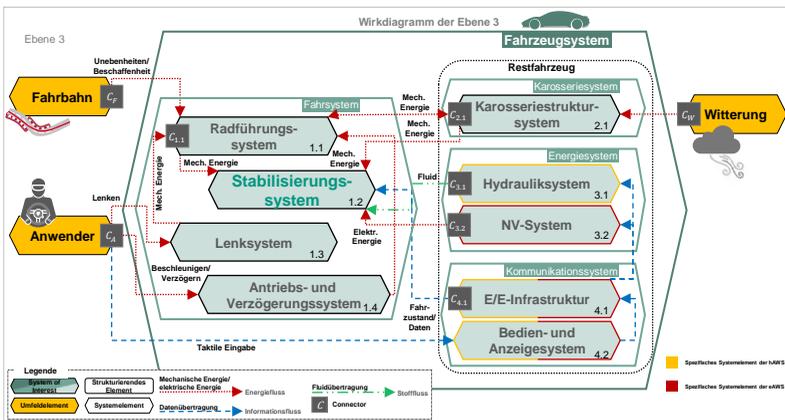


Abbildung 4.24: Wirkdiagramm der Ebene 3: Stabilisierungssystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 13)

Die Detaillierung des *Wirkdiagramms auf Ebene 3* (vgl. Abbildung 4.24) zeigt, dass die Fahrbahn direkt und uneingeschränkt auf das *Radführungssystem* im Fahrsystem wirkt. Der Energiefluss vom Anwender teilt sich hingegen auf das *Lenksystem* (Lenken) und das *Antriebs- und Verzögerungssystem* (Beschleunigen und Verzögern) auf. Sowohl Lenk- als auch Antriebs-/Verzögerungssystem übertragen nachfolgend mechanische Energie auf das Radführungssystem. Die Konkretisierung der drei Elemente im „*Restfahrzeug*“ zeigt auf, dass die Witterung, die das *Karosseriestruktursystem* erfährt, über mechanische Energie einerseits an das Radführungssystem und andererseits an das Stabilisierungssystem weitergeleitet wird. Gleichzeitig leitet das Radführungssystem bei Fahrbahnanregung mechanische Energie zurück in das Karosseriestruktursystem. Das Stabilisierungssystem wird im Fall der hAWS zusätzlich mit einem Fluid (Hydrauliköl) aus dem *Hydrauliksystem* versorgt. Die eAWS wird hingegen vom *Niedervolt-System* mit elektrischer Energie versorgt. Das *Bedien- und Anzeigesystem* nimmt bei der hAWS und eAWS taktile Eingaben (bspw. Fahrprogramm-Auswahl) des Anwenders auf, leitet diese Informationen an die *Elektrik/Elektronik-Architektur*, die wiederum Informationen an das Stabilisierungssystem sendet. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Die drei alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems werden auf der Ebene 4 im nächsten Schritt mit dem *C&C²-Ansatz* (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) analysiert. Der *C&C²-Ansatz* eignet sich insbesondere, da Funktionen mit funktionsrelevanten *Wirkflächenpaaren* (WFP) und *Leitstützstrukturen* (LSS) in einen qualitativen Zusammenhang gebracht werden (Albers, Bursac & Rapp, 2017). In der Studie wurden die *WFP* und *LSS* der Passiven und der zwei Aktiven Wankstabilisierungssysteme ermittelt und *in der jeweiligen Systemgestalt gekennzeichnet* (vgl. Abbildung C.8, Abbildung C.10 und Abbildung 4.25). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Die gestaltbezogene Ermittlung der funktionsrelevanten Wirkorte, -prinzipien und -bewegungen wird beispielhaft in einer Funktionsstruktur zugeordnet, um die Veränderung über die Varianten der RSE des Wankstabilisierungssystems hinweg aufzuzeigen (vgl. Abbildung C.9, Abbildung C.11 und Abbildung 4.26). Die *Erfassung der Systemumgebung und -grenzen*, folglich die Verknüpfung mit weiteren, *interagierenden Subsystemen* auf Ebene 4, ist ein wesentlicher Schritt im Vorgehen. Anhand der *Connectoren* der alternativen Wankstabilisierungssysteme wurden *System-Schnittstellen* und *-Wechselwirkungen zur Rückverfolgbarkeit* (engl. traceability) der *Informationsvererbung* erfasst und deren *Einfluss* auf das betrachtete RSE *spezifiziert*. Die Systeme zur Wankstabilisierung werden dabei jeweils durch *Kopplungen* der Drehstabfeder(hälften) zum *Fahrzeugaufbau* (Anbindungsstellen im Karosseriestruktursystem) und durch ein *Gelenk/Kopplung* der Pendelstütze bzw. des Differentialzylinders an dem Radträger angebunden. Im betrachteten Beispiel stellen die Anbindungsstellen an Radträger sowie Karosseriestruktursystem sowie der Anschluss an das hydraulische (Hydraulikananschluss der hAWS) bzw. das elektrische (Verkabelung der

eAWS) Energiezuführungssystem und Kommunikationssystem (hAWS/eAWS) die *Systemgrenzen* der drei alternativen RSE dar. Die genannten, physischen System-Schnittstellen sowie deren Eigenschaften sind für die Funktionserfüllung des Systems wesentlich. Die erforderlichen *Informationen und Zusammenhänge* wurden anhand von *Literaturrecherche* und *Experteninterviews* während der teilnehmenden Beobachtung *diskursiv* und *recherchierend* erhoben. *Wechselwirkungen des Wankstabilisierungssystems* sowohl mit weiteren, interagierenden Systemen als auch im Gesamtsystem wurden teilweise *simuliert*, *subjektiv durch Experten bewertet* oder *prognostiziert*. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Abbildung 4.25 zeigt beispielhaft die *Ergebnisse der C&C²-Analyse* der *elektromechanischen Aktiven Wankstabilisierung* (eAWS). Die weiteren Analyseergebnisse und Darstellungen finden sich aufgrund des Umfangs in Anhang C.2.1.

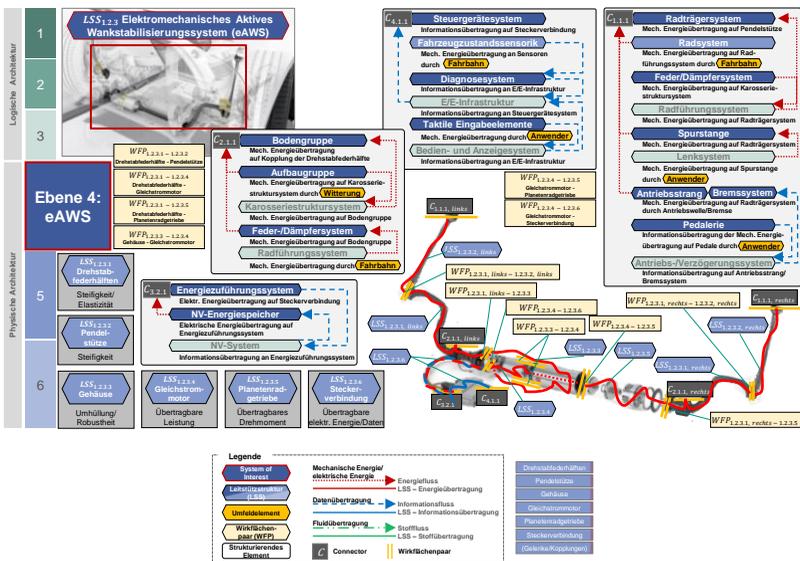


Abbildung 4.25: C&C²-Modell der Ebene 4: elektromechanisch Aktive Wankstabilisierung (eAWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 19)⁵⁸

Die eAWS wird grundsätzlich durch eine Motor-Getriebe-Einheit, die zwischen zwei *Drehstabfederhälften* (*LSS1.2.3.1*) integriert wird, realisiert. Die Drehstabfederhälften sind analog der PWS über *Pendelstützen* (*LSS1.2.3.2*) mit dem Radträger verbunden.

⁵⁸ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Die Motor-Getriebe-Einheit setzt sich aus einem *Bürstenlosen Gleichstrommotor* ($LSS_{1.2.3.4}$), einem *dreistufigen Planetenradgetriebe* ($LSS_{1.2.3.5}$) und dem *umhüllenden Gehäuse* ($LSS_{1.2.3.3}$) zusammen. Neben dem *WFP zwischen Drehstabfederhälften und den Pendelstützen* rechts und links ($WFP_{1.2.3.1-1.2.3.2}$) existiert das $WFP_{1.2.3.1-1.2.3.3}$ zwischen einer Drehstabfederhälfte und dem Gehäuse, welches wiederum starr mit dem Gleichstrommotor über das $WFP_{1.2.3.3-1.2.3.4}$ verbunden ist. Das $WFP_{1.2.3.4-1.2.3.5}$ verknüpft den Motorausgang mit dem Eingang des Planetenradgetriebe. Zwischen dem Planetenradgetriebe und der zweiten Drehstabfederhälfte gibt es schließlich das $WFP_{1.2.3.1-1.2.3.5}$ in der eAWS. Der Gleichstrommotor ist zudem über WFP mit der *Stecker Verbindung* ($LSS_{1.2.3.6}$) der eAWS verbunden. Die Drehstabfederhälften sind jeweils in Form einer Kopplung über den *Connector* $C_{2.1.1}$ an die Bodengruppe im Karosseriestrukturensystem und die Pendelstützen im *Connector* $C_{1.1.1}$ über Gelenke/Kopplungen an die Radträger angebunden. Der Kabelbaum der eAWS ist einerseits über den *Connector* $C_{4.1.1}$ an das *Steuergerätesystem* (Informationsübertragung) und andererseits über den *Connector* $C_{3.2.1}$ an das *Energiezuführungssystem* (elektrische Energieübertragung) verknüpft. In Abbildung 4.25 ist die Detaillierung der Connectoren und damit Zusammenhänge mit den interagierenden Systemen und Informationsvererbung der eAWS dargestellt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Die eAWS erfüllt analog der hAWS *zwei grundsätzliche Hauptfunktionen* im Gesamtfahrzeug (vgl. Abbildung 4.26). Einerseits kann die *Fahrer-induzierte Wankneigung des Fahrzeugs aktiv reduziert* und andererseits eine *Fahrbahn-induzierte Wankneigung aktiv beeinflusst* werden. Die zweite Hauptfunktion der eAWS ist im Vergleich zur hAWS jedoch so in ihrem *Prinzip variiert*, dass die *Wankneigung bzw. das Wankkopieren* beim Überfahren von einseitigen Fahrbahnunebenheiten *nicht nur reduziert*, sondern sogar *kompensiert* werden kann. Die beiden *Drehstabhälften* ($LSS_{1.2.3.1}$), die mit der Motor-Getriebe-Einheit verbunden sind, können bei einer einseitigen *Störangregung* demnach *gänzlich voneinander entkoppelt* werden, um ein *einseitiges Einfedern des Radträgers zuzulassen* und damit den Fahrkomfort zu erhöhen. Gleichermaßen können die *Drehstabfederhälften unabhängig voneinander* über Motor/Getriebe *bewegt bzw. tordiert* werden und damit das *Drehmoment* an den $WFP_{1.2.3.1-1.2.3.2}$ zur Pendelstütze *bedarfsgerecht aufbringen oder aufnehmen*. Im Gegensatz zur hAWS findet die Informationsübertragung und -verarbeitung teilweise im Wankstabilisierungssystem statt, sodass eine kompaktere Systemintegration ermöglicht wird. Der elektromechanischen Aktiven Wankstabilisierung müssen im Grunde nur über das *Energiezuführungssystem* Gleichstrom (48V) in $C_{3.2.1}$ und Informationen/Daten vom *Steuergerätesystem* (über $C_{4.1.1}$) bereitgestellt werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

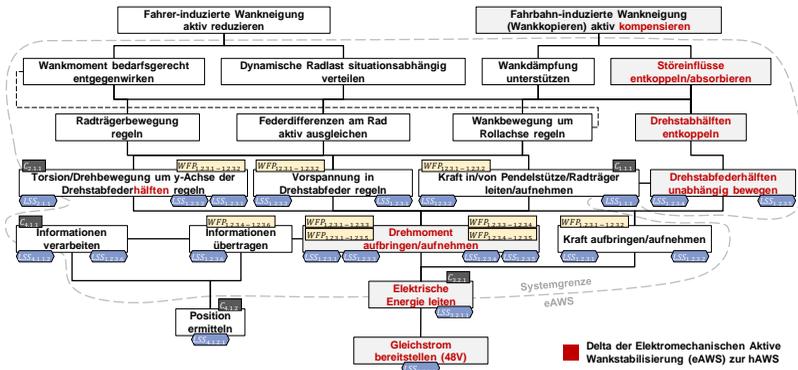


Abbildung 4.26: Funktionsstruktur des elektromechanischen Aktiven Wankstabilisierungssystems (eAWS) im Vergleich zur hAWS (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 20)

Auf Basis der Funktionsstruktur der eAWS erfolgte die Untersuchung der *resultierenden Eigenschaften* von *Wankstabilisierungssystem* und *Gesamtfahrzeug*, sowie der *durch den Produktentwickelnden beeinflussbaren Merkmalsausprägungen*. Detaillierte Ausführungen und Analyseergebnisse zu den Eigenschaften finden sich in der Publikation Albers, Hirschter, Fahl et al. (2022).

Zur tiefgreifenden Analyse wurden darüber hinaus ausgewählte Subsysteme der hAWS und eAWS weiter mit dem C&C²-Ansatz auf der Systemebene 5 untersucht, um die Phänomene der Variation von Funktionen und Eigenschaften zu beobachten und die Informationsvererbung über Ebenen hinweg zu veranschaulichen. Auf Basis der Erkenntnisse der C&C²-Analyse auf den Systemebenen 4 und 5 wurden anschließend die Phänomene bei Variation der ausgewählten RSE des Wankstabilisierungssystems aus Funktions- und Eigenschaftssicht analysiert. Für detaillierte Erläuterung der Zusammenhänge wird an dieser Stelle auf Anhang C.2.1 und die Publikation Albers, Hirschter, Fahl et al. (2022) verwiesen.

In einem letzten Schritt wurden die *beobachtbaren Variationsarten auf Ebene 4* zwischen den drei alternativen RSE mit den *berechneten Variationsanteilen aus Eigenschafts-, Funktions- und physischer Sicht* verglichen. Da die *Gestaltvariation (GV)* insbesondere auf das Vorhandensein von materiellen, physischen Systemelementen (Analyse von Prinzip und Gestalt) abzielt, kann sie nicht ohne Adaption auf Variationen aus Funktions- und Eigenschaftssicht angewendet werden. Die Ergebnisse in der Studie legen nahe, dass die Gestaltvariation (GV) und ähnliche, beobachtete Phänomene der Variation von Funktionen und Eigenschaften immer die *Veränderung der Ausprägungen von betrachteten Systemelementen* zum Gegenstand haben. Aus diesem

Grund wird in der folgenden Berechnung der Variationsanteile von einer verallgemeinerten **Ausprägungsvariation**⁵⁹ (AV) der Funktionen und Eigenschaften gesprochen – die sich gleichermaßen auf die Variation der Gestaltausprägung beziehen kann. In Abbildung C.12 in Anhang C.2.1 sind die identifizierten Variationsarten der drei alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems auf Ebene 4 sowie die berechneten Variationsanteile anhand der konstituierenden Subsysteme auf Ebene 5 dargestellt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

4.4.4.3 Erkenntnisse

Aus der Untersuchung des Zusammenhangs der Variation von physischer Gestalt und den Phänomenen der Variation von Funktionen und Eigenschaften, konnten die in Abbildung 4.27 dargestellten Erkenntnisse generalisiert werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Auslöser		Folgen	
Variationsart (physische Sicht)	Beschreibung mittels C&C ² -Ansatz	Funktionen	Eigenschaften
Übernahmevariation (ÜV)	<ul style="list-style-type: none"> • Lediglich Anpassungen an dem/den Connector(en) des physischen Elements möglich • Anzahl, Anordnung und Gestalt der Leitstützstruktur(en) (LSS) und Wirkflächenpaar(en) (WFP) bleiben unverändert 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund gleichbleibender Anzahl und Ausprägung/Gestalt der LSS und WFP des physischen Elements bei ÜV bleibt Funktion ebenfalls identisch • Veränderungen an dem/den Connector(en) lösen Veränderungen der Ausprägung von Funktionen auf höheren Ebenen im betrachteten System aus 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine ÜV eines physischen Elements löst keine Veränderung der Eigenschaften im betrachteten Systemelement aus • Veränderungen an dem/den Connector(en) lösen Veränderungen der Ausprägung von Eigenschaften auf höheren Ebenen im betrachteten System aus
Gestaltvariation (GV)	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der LSS und WFP des physischen Elements bleiben unverändert • Gestalt und Anordnung verändert sich, ohne dass WFP entfernt oder hinzugefügt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund gleichbleibender Anzahl der LSS und WFP löst die GV eines physischen Elements keine beschriftigten/gewünschten Veränderungen der Ausprägung von Funktion oder prinzipiell neue Funktionen im Systemelement aus 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund geänderter Merkmale (bspw. Material, Geometrie) im Systemelement löst die GV eines physischen Elements Veränderungen der Ausprägung von Eigenschaften aus • Eine GV eines physischen Elements löst jedoch keine prinzipiell neuen Eigenschaften aus
Prinzipvariation (PV)	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der LSS und WFP wird verändert • PV geht immer mit GV einher • Neues Lösungsprinzip im physischen Element 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund geänderter Anzahl der LSS und WFP löst eine PV eines physischen Elements prinzipiell neue Funktionen im Systemelement aus • Darüber hinaus sind identische, in Ausprägung veränderte oder prinzipiell neue Funktionen auf höheren Ebenen des betrachteten Systems möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine PV eines physischen Elements löst neue Eigenschaft im betrachteten Systemelement aus • Eine PV eines physischen Elements löst Veränderungen der Ausprägung von Eigenschaften auf höheren Ebenen im betrachteten System aus

Abbildung 4.27: Generalisierung der Erkenntnisse zu den Phänomenen der Variation von Eigenschaften und Funktionen (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 26)

Es zeigt sich, dass die *Übernahmevariation eines physischen Elements* aufgrund der *gleichbleibenden Anzahl und Ausprägung von Gestalt der WFP und LSS* eine *vollständige Übernahme der identischen Funktionen des RSE* zur Folge hat. *Veränderungen an den Connectoren des physischen Elements* lösen demnach nur *Veränderungen*

⁵⁹ Anmerkung: In Abschnitt 5.1.3 der Präskriptiven Studie der vorliegenden Forschungsarbeit wird die Ausprägungsvariation (AV) im Modell der PGE im Systemkontext formal und generisch definiert.

der Ausprägung von Funktionen auf höheren Ebenen im Gesamtsystem aus. Analog dazu können keine neuen Eigenschaften im betrachteten Systemelement durch UV ausgelöst werden. Veränderungen aus Eigenschaftssicht auf höheren Ebenen können gleichermaßen nur die Folge von Veränderungen im Connector sein. Die Gestaltvariation eines physischen Elements zeichnet sich durch eine gleichbleibende Anzahl der LSS und WFP aus, deren Ausprägung von Gestalt und Anordnung jedoch verändert wird, ohne dabei das zu Grunde liegende Lösungsprinzip zu verändern. Da keine neuen WFP oder LSS hinzugefügt oder entfernt werden, sind durch die GV ebenso keine beabsichtigten/gewünschten Veränderungen der Ausprägung von Funktionen oder prinzipiell neue Funktionen im betrachteten Systemelement realisierbar. Die Prinzipvariation eines physischen Elements löst durch die geänderte Anzahl der WFP und LSS prinzipiell neue Funktionen im Systemelement aus. Gleichermaßen sind auch identische, in Ausprägung variierte oder prinzipiell neue Funktionen auf höheren Ebenen des Gesamtsystems realisierbar. Eine PV resultiert aus Eigenschaftssicht ebenso in neuen Eigenschaften bzw. löst Veränderungen der Ausprägung von Eigenschaften auf höheren Ebenen aus. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Über den Variationsoperator im Modell der PGE lassen sich die Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation von Systemelementen aus dem Referenzsystem bisher nur in Bezug zu der physischen Gestalt (bzw. WFP & LSS) beschreiben. Zur verallgemeinerten Beschreibung der Variation von verschiedenen Typen von RSE (wie bspw. Funktionen, Eigenschaften, Baukasten, Strategie, usw.) ist eine eindeutige, generische Begrifflichkeit sinnvoll, die für verschiedene Abstraktionsebenen im Sprachgebrauch eingängig ist. Die Studie zeigt deutlich, dass alle Sichten und möglichen Elementtypen eines Systems stark miteinander interagieren. Darüber hinaus belegt die Studie, dass eine Schärfung des Funktionsverständnisses sowie ein Leitfaden zur strukturierten Formulierung notwendig sind, um die Variationsarten von „gestaltlosen“ Funktionen zu erfassen. Eine weitere Erkenntnis ist die Differenzierung zwischen Funktionen des Gesamtsystems, die in der lösungsoffenen, logischen Systemarchitektur verortet werden können, und technischen Funktionen, die sich auf konkrete physische Elemente bzw. deren WFP und LSS beziehen. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

4.4.5 Zwischenfazit: Handlungsfelder

Im Rahmen von Experteninterviews im Zuge eines Anbieter-übergreifenden Workshops sowie zweier Fallstudien in automobilier Produktentwicklungspraxis wurden über die adressierten Forschungsfragen 1.1, 1.2 und 1.3 (vgl. Abschnitt 3.1.3) Handlungsfelder zur Ausarbeitung eines konsistenten Funktionsverständnisses und -abbildung im Modell der PGE identifiziert:

- Differenzierung der unterschiedlichen Systemsichten (Eigenschaften/Funktionen/Physische Elemente) bzw. Typen von Referenzsystem-Elementen (RSE) beim Spezifizieren zur Hebung der Potenziale einer stärkeren Kunden- und Anwenderorientierung in der Frühen Phase
- Generierung eines tiefgreifenden Verständnisses der unterschiedlichen Zugänglichkeiten von RSE und Förderung des Einsatzes von Aktivitäten zur Erweiterung der Wissensbasis im Bezug zum Referenzsystem
- Verknüpfung des Spezifizierens aus Funktionssicht mit anderen Systemsichten und Strukturierung der Systemebenen anhand eines generischen Produktmodells
- Generalisierung der Variationsarten im Modell der PGE mit Bezug zur physischen Gestalt in eine generische Beschreibung des Variationsoperators im Systemkontext zur Beschreibung von u.a. den Phänomenen der Variation von Funktionen
- Abgrenzung der Definitionen von Funktionen des Gesamtproduktes und technischer Funktionen einzelner, physischer Elemente
- Gewährleistung einer strukturierten Überleitung von Funktionen des Gesamtproduktes in technische Funktionen im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses – von der initial generierten Funktionsidee bis zur Stilllegung der Funktion
- Strukturelle Leitlinien zur Formulierung und Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes insb. in der Frühen Phase zur Unterstützung des Produktentwickelnden in seinen Aktivitäten des Spezifizierens aus Funktionssicht und der Variation von Funktionen auf Grundlage des Referenzsystems

Zum Abschluss der Deskriptiven Studie I werden im folgenden Fazit die Anforderungen an die Präskriptive Studie aus den drei durchgeführten, empirischen Studien in der DS-I zusammengefasst.

4.5 Fazit: Anforderungen an die Präskriptive Studie

In diesem letzten Abschnitt der Deskriptiven Studie I werden die Ergebnisse und Erkenntnisse sowie identifizierten Handlungsfelder (vgl. Abschnitte 4.2.4, 4.3.4 und 4.4.5) aus den drei empirischen Studien (vgl. Abbildung 4.28) in Form von Anforderungen an die Präskriptive Studie verdichtet.



Abbildung 4.28: Die drei empirischen Studien in der Deskriptiven Studie I (DS-I)

In der ersten empirischen Studie der DS-I (vgl. Abschnitt 4.2) wurden zunächst im Rahmen einer 3-jährigen teilnehmenden Beobachtung sowie einer tiefgreifenden Inhaltsanalyse von Prozessen und Methoden in der automobilen Produktentwicklung *Handlungsfelder der funktionalen Produktspezifikation* identifiziert. In Abschnitt 4.3 konnten über sowohl Fragebogen-gestützte Umfragen in industrieller Produktentwicklung sowie im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung als auch eine Delphi-Studie mit anknüpfenden Experteninterviews auf einem Expertenforum *Handlungsfelder notwendiger Unterstützung und Lösungsansätze zum Spezifizieren aus Funktionssicht* ermittelt werden. Abschluss der empirischen Untersuchungen bildeten Experteninterviews im Zuge eines Anbieter-übergreifenden Workshops sowie zwei Fallstudien in automobiler Produktentwicklungspraxis (vgl. Abschnitt 4.4), die in *Handlungsfeldern in Bezug zum Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase* mündeten. Aus den identifizierten Handlungsfeldern wurden Anforderungen synthetisiert, die entsprechend den Forschungshypothesen, auf die sie sich beziehen, strukturiert wurden. Die Übersicht der Anforderungen bereitet damit die Umsetzung bzw. Synthese der ausgewählten und bewerteten Lösungen in der Präskriptiven Studie vor (vgl. Abbildung 4.29).

Die synthetisierten Anforderungen an eine prozessuale und methodische Unterstützung des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Funktionen des Gesamtproduktes sind in Abbildung 4.29 zusammengefasst.



Abbildung 4.29: Übersicht der zusammengefassten Anforderungen an die Unterstützungsentwicklung anhand der drei Forschungshypothesen (FH)

In Bezug auf die *erste Forschungshypothese* (vgl. Abschnitt 3.1.2) zeigten die empirischen Untersuchungen, dass das Spezifizieren aus Funktionssicht in der Produktspezifikation der Frühen Phase eine Differenzierung unterschiedlicher Systemsichten und Typen von Referenzsystem-Elementen (RSE) erlauben muss [A1]. Zudem ist das Ver-

ständnis unterschiedlicher Zugänglichkeiten von RSE zu schärfen, um dem Produktentwickelnden Aktivitäten zur Erweiterung der Wissensbasis in Bezug zum Referenzsystem zur Verfügung zu stellen [A2]. Anknüpfend daran muss ein generischer Variationsoperator im Systemkontext entwickelt werden, der in der Anwendung eine eindeutige, generische Abbildung der Phänomene von u.a. Funktionen unterstützt [A3]. Das Spezifizieren aus Funktionssicht sollte zudem Systemsichten und -ebenen bestehender Produktmodelle Genüge tun [A4]. Des Weiteren sind Funktionen des Gesamtproduktes und technische Funktionen einzelner, physischer Elemente so abzugrenzen, dass trotz alledem eine Überleitung im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses weiterhin möglich ist [A5]. Letztlich fordert dies eine homogenisierte Formulierung und Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes aus Stakeholder-Sicht in der Frühen Phase [A6].

Vor dem Hintergrund der *zweiten Forschungshypothese* (vgl. Abschnitt 3.1.2) verlangt ein generisches, Modell-gestütztes Strukturierungsframework zwingend die Verknüpfung mit Ziel-, Handlung- und Objektsystem sowie des Referenzsystems. Einerseits können somit Informations- und Wissensfragmente, Aktivitäten, Ressourcen und Artefakte in den Betrachtungen inkludiert werden [A7], andererseits ermöglicht die Nutzung des Referenzsystems die zielgerichtete Übertragung von Systemelementen über den Variationsoperator in eine neue Produktgeneration [18]. Eine Eingliederung der zentralen Entwicklungsaktivitäten zur Verbindung von ZHO-Modell, Referenzsystem sowie Systemsichten und -ebenen [A10] ist wesentlich, um das Spezifizieren komplexer Produkte zu ermöglichen [A9].

In Anbetracht der *dritten Forschungshypothese* (vgl. Abschnitt 3.1.2) führten die Analyseergebnisse zu der Erkenntnis, dass die prozessuale und methodische Unterstützung beim Spezifizieren aus Funktionssicht die Phasen der Generierung und Priorisierung von Funktionsideen fördern [A13] sowie die Spezifikation von Funktionen des Gesamtproduktes systematisieren [A14] muss. Flexibel anwendbare und adaptive Entwicklungsunterstützung [A12] erlaubt gepaart mit strukturierten Abstraktionsgraden und Nomenklatur [A11] das Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren aus Funktionssicht durch den Produktentwickelnden. Die Systematik muss dabei ebenso frühzeitig funktionale Weiterentwicklungen in Generationen [A15] vorausdenken und die Spezifikation von Funktionen des Gesamtproduktes frühzeitig mit Realisierungsphase und ggf. der Beendigung des Funktionslebenszyklus [A16] verknüpfen. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

5 Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE

In diesem Kapitel wird in Anlehnung an die Design Research Methodology (DRM, vgl. Abschnitt 3.2.1) eine umfassende *Präskriptive Studie (PS)* umgesetzt. Als Grundlage wird in Abschnitt 5.1 zunächst das Verständnis und die Abbildung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS vorgestellt. Daran anknüpfend erörtert Abschnitt 5.2 das generische Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte. Ein Referenzprozess und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE wird in Abschnitt 5.3 erläutert. Die Präskriptive Studie schließt mit einem Fazit (vgl. Abschnitt 5.4) in Form einer Unterstützungsevaluation der entwickelten Systematik (Blessing & Chakrabarti, 2009).

5.1 Verständnis und Abbildung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE

Zunächst werden die Referenzsystem-Elemente (RSE) und das Mengenverständnis von Elementen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS erläutert. Anknüpfend daran wird der generische Variationsoperator im Systemkontext vorgestellt und das Verständnis von Systemansichten und -ebenen im Modell der PGE diskutiert. Diese Abschnitte bilden die Grundlage für das entwickelte Verständnis von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE. In der Gesamtheit soll damit in diesem Abschnitt folgende Forschungsfrage behandelt werden:

FF1.4 Wie lässt sich eine konsistente Auffassung von Verständnis, Abbildung und Modellierung von Funktionen im Modell der PGE entwickeln?

In einem systemtheoretischen Ansatz kategorisieren Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014) die Abstraktionsgrade der Produktmodellierung nach ihrem Individualisierungs- und Instanziierungsgrad. Abbildung 5.1 veranschaulicht das sich daraus ergebende Framework (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) und setzt es in Bezug zu diesem Abschnitt.

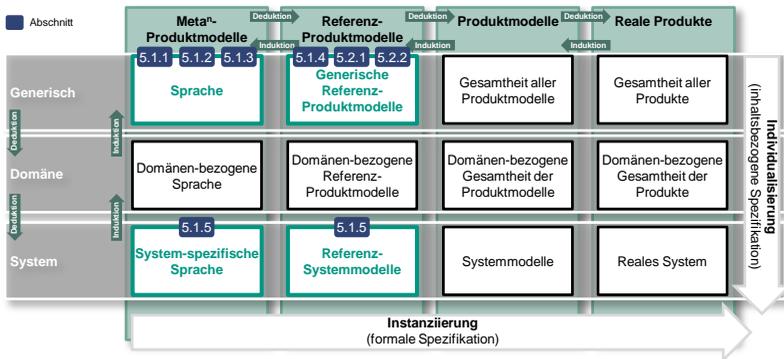


Abbildung 5.1: Framework der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung nach Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014, S. 7) in Bezug zu Abschnitt 5.1 und 5.2

Zunächst wird in den Abschnitten 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 im Sinne des Frameworks eine *Sprache* entwickelt, die als generisches Metaⁿ-Produktmodell unterschiedliche Systemelemente im Modell der PGE modelliert und dadurch Domänen-übergreifend eingesetzt werden kann. Die generischen Systemsichten und -ebenen im Modell der PGE in Abschnitt 5.1.4 erzeugen ein grundlegendes, *generisches Referenz-Produktmodell*⁶⁰. Das Referenz-Produktmodell entstand aus Erfahrungen abgeschlossener Projekte und wird für zukünftige Projekte zugänglich gemacht, um dabei die Anwendbarkeit der Sprache zu erhöhen. Dieses Modell wird in Abschnitt 5.2 erweitert (vgl. Abbildung 5.1). In Abschnitt 5.1.5 wird die Sprache basierend auf dem Verständnis von Referenzsystem-Elementen (RSE), Elementmengen und dem generischen Variationsoperator im Modell der PGE auf den Elementtypen „Funktion“ zu einer *System-spezifischen Sprache* deduziert. Zudem werden *Referenz-Systemmodelle* des Elementtyps „Funktion“ vorgestellt.

Die in Abschnitt 5.1 dargestellten Modelle und Methoden sind im Rahmen der Publikationen Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021), Albers, Hirschter, Fahl et al. (2021), Albers, Rapp, Fahl et al. (2020), Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) und Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vgl.

⁶⁰ Anmerkung: In Abschnitt 5.2 wird das grundlegende, generische Referenz-Produktmodell (aus Abschnitt 5.1.4) durch Verknüpfung des ZHO-Modells und den zugehörigen, zentralen Entwicklungsaktivitäten sowie durch Berücksichtigung des Referenzsystems im Modell der PGE erweitert (vgl. Abbildung 5.1).

2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden zudem teilweise in vom Autor bzw. Tobias Hirschter Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Endl (2019)⁶¹, Staiger (2020)⁶¹, Haag (2020)⁶¹ und Wöhrle (2020)⁶² am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers und Kamp (2019)⁶¹ am Lehrstuhl für Mechanik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt.

5.1.1 Referenzsystem-Elemente (RSE) im Modell der PGE

Ausgangsbasis für die folgende Betrachtung stellt das *Referenzsystem* und deren *Referenzsystem-Elemente* (RSE) im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS dar (vgl. Abschnitt 2.2.3). Der Bedarf zur weiteren Differenzierung der Typen von Elementen im Referenzsystem wurde in Abschnitt 4.3.3 herausgearbeitet (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020). Über den *Variationsoperator im Modell der PGE* lassen sich die Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation von RSE beschreiben. Der Begriff Gestaltvariation stellt insb. den Bezug zu der physischen Gestalt eines Produktes bzw. dessen Subsystemen her. Insbesondere die *Variationen physischer Elemente* bzw. deren *Wirkflächenpaare* (WFP), *Leitstützstrukturen* (LSS) und *Connectoren* (C) lässt sich darüber feststellen und planen. Die Studie in Abschnitt 4.4.4 analysierte die *Phänomene der Variation von Funktionen und Eigenschaften* und konnte so einen Zusammenhang mit der Variation der physischen Gestalt nachweisen (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022). Referenzsystem-Elemente können jede Art von Entwicklungsartefakten bisheriger Entwicklungen sein. Im Folgenden werden daher verschiedene, mögliche Aspekte von **Elementtypen des Referenzsystems**, deren Information durch einen unabhängigen Produktentwickelnden in Bezug zu einem System festgestellt oder sogar rekonstruiert werden können, durch einen Ansatz zur Klassifizierung bzw. Modellierung erläutert. In Analogie zu der Variation von Funktionen und Eigenschaften lassen sich die Variationen der verschiedenen Elementtypen nur bedingt mit der definierten Gestaltvariation im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 2.2.2) beschreiben. In Abschnitt 5.1.3 wird daher ein generischer Variationsoperator im Modell der PGE eingeführt, mit dem sich die Variation der Elementtypen generisch beschreiben lässt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Das *systemische Verständnis* in Bezug auf das Referenzsystem ermöglicht es dem Betrachter, die Subsysteme eines komplexen Systems (bspw. die Bremse eines Fahrzeugs) als ein Systemelement aufzufassen. Im Systems Engineering werden daher *Sichten* und *Ebenen* unterschieden, um die Entwicklung eines komplexen Systems zu

⁶¹ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

⁶² Unveröffentlichte, von Tobias Hirschter Co-betreute Masterarbeit.

erleichtern. Der beispielhafte Auszug von möglichen Elementtypen des Subsystems „Bremse“ in Abbildung D.1 im Anhang D.1.1 stellt die unterschiedlichen Sichten und jeweils darin erzeugten Artefakte dar. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021)

5.1.2 Mengenverständnis von Elementen im Modell der PGE

Anknüpfend an die Detaillierung möglicher *Elementtypen im Referenzsystem* im Modell der PGE am Beispiel der *Sichten* auf die Entwicklung des Subsystems „Bremse“ und die unmittelbaren Wechselwirkungen im Entwicklungsprozess, wird nachfolgend das **Mengenverständnis im Modell der PGE** erörtert. Die Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.1.1) konstatiert die *Emergenz von Systemen*, d.h., ein System ist mehr als die Summe seiner Elemente. Ausgehend davon werden im Mengenverständnis im Modell der PGE die existenten *Wechselwirkungen* zwischen Elementen ebenso als eigene Systemelemente verstanden. Am vorangehenden Beispiel der Bremsenentwicklung wird verdeutlicht, dass die Wechselwirkung bspw. zwischen dem Material der physischen Gestalt (z.B. Grauguss oder Keramik) und der damit verbundenen Robustheit (bspw. bei Steinschlag) selbst als Element abgebildet werden kann. Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 erläutert, werden nur die Elemente des Referenzsystems R_n als *Referenzsystem-Elemente* (RSE) bezeichnet. Einzig RSE können mittels des Variationsoperators in die Produktgeneration G_n abgebildet werden, wobei ebenso bewusst ausgeschlossene Elemente im Referenzsystem modelliert sind und bleiben. Das heißt am Beispiel der „Bremse“, dass der Einsatz einer Keramikscheibenbremse z.B. auf Basis einer umfassenden Untersuchung aufgrund der hohen Empfindlichkeit bei Steinschlägen nicht zielführend ist und daher eine Graugusscheibenbremse in G_n verwendet wird. Die Berücksichtigung des explizit für Produktgeneration G_n ausgeschlossenen Elements (Keramikscheibenbremse) im Referenzsystem R_n ist wesentlich, um Entscheidungen transparent darzulegen und ggf. zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess erneut zu bewerten oder in Entwicklungsgenerationen zu validieren. Die über das Referenzsystem R_n hinaus dargestellten Elemente können als „*potentielle*“ RSE verstanden werden, die durch Aktivitäten wie bspw. Marktforschung, Zielsystem-Rekonstruktion, Kompetenzaufbau, etc. ins Referenzsystem gelangen und berücksichtigt werden können. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

In der schematischen Abbildung D.2 im Anhang D.1.2 wird jegliche Art von Systemelementen (eben auch Wechselwirkungen) beispielhaft den unterschiedlichen Mengen dem Verständnis nach zugeordnet und erläutert. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021)

5.1.3 Generischer Variationsoperator im Systemkontext im Modell der PGE

In den Studien zur Identifikation von Auslösern der Variation physischer Elemente (vgl. Abschnitt 4.4.3) und zur Analyse von Phänomenen der Variation von Funktionen und Eigenschaften (vgl. Abschnitt 4.4.4) wurde nachgewiesen, dass sich jede Art von Elementtyp (vgl. Abschnitt 5.1.1) gleichermaßen aus einem Referenzsystem R_n durch Neu- und Übernahmeentwicklung auf die neue Produktgeneration G_n abbilden lässt. Die *Variationen physischer Elemente* im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS haben gleichzeitig wesentliche Auswirkungen auf die *Funktions-* und *Eigenschaftssicht* eines Systems. Die Variation der Wirkflächenpaare (WFP), Leitstützstrukturen (LSS) und Connectoren (C) beeinflussen den Übernahme- und Neuentwicklungsanteil weiterer Elementtypen (hier insbesondere Funktionen und Eigenschaften) maßgeblich. In der Konsequenz legen die empirischen Beobachtungen nahe, die Variationsarten im Modell der PGE im Systemkontext zu erweitern und einen **generischen Variationsoperator** zu definieren (Albers, Rapp, Fahl et al., 2020).

Im Beschreibungsmodell liegt der Schwerpunkt aktuell auf der Definition der Übernahme- (ÜV), Gestalt- (GV) und Prinzipvariation (PV) der expliziten, physischen Sicht bzw. der körperlichen Gestalt (Beschaffenheit) eines Systems (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Die Analyse alternativer Referenzsystem-Elemente (RSE) des Wankstabilisierungssystems in Abschnitt 4.4.4 zeigt, dass sich in Analogie zur Gestaltvariation insbesondere die Ausprägung der Wirkung einer Funktion bzw. die Ausprägung (der Merkmale) einer Eigenschaft verändern. Aus diesem Grund schlagen Albers, Rapp, Fahl et al. (2020) vor, den Geltungsbereich der gegenwärtigen Definition der Variationsarten im Modell der PGE zu erweitern und für eine breitere Anwendung, bspw. die Beschreibung der Entwicklung von Eigenschaften und Funktionen, verfügbar zu machen. Einem weiterentwickelten Verständnis der Variationen im Modell der PGE kommt neben einer umfassenden Applikation ein allgemeinerer Modellcharakter zum Ausdruck. Da es sich bei der Gestaltvariation (GV) und ähnlichen, beobachteten Phänomenen immer um die Veränderung der Ausprägungen von betrachteten Systemelementen handelt, wird das Modell der PGE um den verallgemeinerten Begriff der **Ausprägungsvariation (AV)** generisch erweitert. Die Ausprägungsvariation kann in der physischen Sicht weiterhin als Konkretisierung in Form der Gestaltvariation verstanden und verwendet werden. In diesem Zuge werden ebenso die Übernahme- (ÜV) und Prinzipvariation (PV) im Systemkontext generalisiert. Die Beispiele der *Produktionssystementwicklung* und der Entwicklung von *Systemen gekoppelter Simulationsmodelle* zeigen ebenfalls Phänomene, die dem Verständnis der generischen Variationsarten (ÜV, AV, PV) im Modell der PGE im systemtheoretischen Verständnis übertragbar sind und damit die generische Ausprägungsvariation im Modell der PGE bestätigen (Albers, Rapp, Fahl et al., 2020).

Auf Basis der allgemeinen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.1.1) lassen sich die generischen Variationsarten im Systemkontext im Modell der PGE nach dem folgenden Schema beschreiben und in Visualisierungen graphisch differenzieren. In Abbildung 5.2 werden die System-bestimmenden Subsystem-Elemente, Wechselwirkungen und Connectoren sowie deren Variationen eingeführt (Albers, Rapp, Fahl et al., 2020).

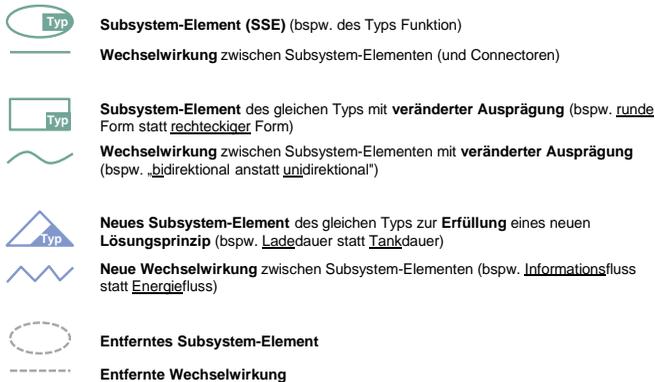


Abbildung 5.2: Systemtheoretisches Schema zur graphischen Differenzierung der Variations-bestimmenden Elemente und Wechselwirkungen im Modell der PGE nach Albers, Rapp, Fahl et al. (2020, S. 2238), Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021, S. 872) und Hirschter (vgl. 2023)

Die drei Variationsarten des generischen Variationsoperators nach Albers, Rapp, Fahl et al. (2020) können so definiert und graphisch veranschaulicht werden. Im Folgenden wird repräsentativ die neue Ausprägungsvariation (AV) eines Systemelements im Modell der PGE erläutert. Für analoge Beschreibung von Übernahme- (ÜV) und Prinzipvariation (PV) eines Systemelements wird an dieser Stelle auf Anhang D.1.3 bzw. die Publikation Albers, Rapp, Fahl et al. (2020) verwiesen.

Definition 5: Ausprägungsvariation (AV) eines Systemelements im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Rapp, Fahl et al. (2020); Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021), vgl. Abbildung 5.3)

Die **Ausprägungsvariation (AV)** ist ein *Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung zur Neuentwicklung eines Systemelements einer neuen Systemgeneration*, bei der das *zu Grunde liegende Lösungsprinzip* von einem *Referenzsystem-Element (RSE)* aus dem *Referenzsystem mitsamt aller inhärenter Elemente und Verknüpfungen im Inneren* auf eine neue Systemgeneration *übertragen* jedoch *mindestens partiell in seiner Ausprägung variiert* wird.

Wird ein Subsystem in seiner Ausprägung variiert, so wird das zu Grunde liegende Lösungsprinzip des RSE mitsamt aller System-bestimmenden Subsystem-Elemente (inkl. deren inhärenten Wechselwirkungen) in die neue Systemgeneration übertragen. Einzelne der Subsystem-Elemente werden dabei jedoch – unter Beibehaltung des Lösungsprinzips – bspw. zur Steigerung der Wettbewerbs- oder Leistungsfähigkeit und/oder der Qualität der Systemerfüllung in ihrer Ausprägung variiert. Am Beispiel der Ausprägungsvariation der „Bremse“ kann so die Geometrie (Merkmal Durchmesser der Brems Scheibe) aus physischer Sicht variiert werden, was wiederum eine Ausprägungsvariation der Eigenschaft „Bremsverhalten“ (z.B. Verkürzung Bremsweg bei standardisierten Bedingungen um 5 [m]) zur Folge haben kann.

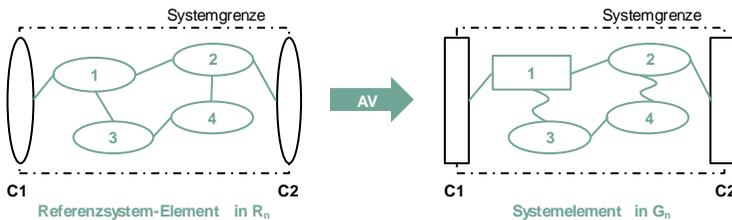


Abbildung 5.3: Ausprägungsvariation (AV) eines Referenzsystem-Elements (RSE) im Modell der PGE in Anlehnung an Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vgl. 2023)

Die *Übertragbarkeit des generischen Variationsoperators* wurde bereits initial für die Elementtypen *Validierung/Testfall*, *Produktionssystem*, *Eigenschaft/Merkmal*, *Funktion* und *Gestalt* nachgewiesen (Albers, Rapp, Fahl et al., 2020). Die spezifische Anwendung ist jedoch ausstehend und erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit für *Funktionen im Modell der PGE* in Abschnitt 5.1.5.2. In Hirschter (vgl. 2023) erfolgt die spezifische Anwendung des generischen Variationsoperators zudem für *Eigenschaften* und *Merkmale*. Die Entwicklung einer neuen Systemgeneration ausgehend vom Referenzsystem kann durch die dargestellten, generischen Variationsarten der Übernahme- (ÜV), Ausprägungs- (AV) und Prinzipvariation (PV) vollumfänglich beschrieben werden. Im Sinne einer *mathematischen Abbildungsfunktion* können die Variationsarten – zusammengefasst in einem *Variationsoperator* – jedes Referenzsystem-Element auf ein Systemelement der neuen Systemgeneration abbilden. Die Berechnung der Übernahme- und Neuentwicklungsanteile kann weiterhin über die in Abschnitt 2.2.2 eingeführte Formeln berechnet werden.

Die Erkenntnisse in diesem Abschnitt legen nahe, von einem **Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach ALBERS** zu sprechen (Albers, Rapp, Fahl et al., 2020). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch zur besseren Verständlichkeit im Folgenden weiterhin vom *Modell der PGE* gesprochen.

5.1.4 Systemsichten und -ebenen im Modell der PGE

Wie bereits in den drei vorangehenden Abschnitten (5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3) angedeutet, werden im Systems Engineering Sichten und Ebenen eines Systems unterschieden, um die Entwicklung eines komplexen Systems zu erleichtern (vgl. Abschnitt 2.1.1.1). Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt ein *grundlegendes, generisches Referenz-Produktmodell* eingeführt, das die **Systemsichten und -ebenen im Modell der PGE** strukturiert. Ziel der Anwendung eines Produktmodells ist es, das *Spezifizieren einer Produktgeneration* entlang des technischen Problemlösungsprozesses von einer eher *lösungsoffenen* bis hin zur *lösungsspezifischen* Beschreibung (*Konkretisieren*) zu unterstützen (Albers, Heitger, Haug et al., 2018). Zusätzlich soll das Produktmodell dazu dienen, spezifische Informationen aus Elementen des Referenzsystems zu analysieren und damit das *Abstrahieren* entlang des Problemlösungsprozesses zu fördern. Der Produktentwickelnde soll somit unterstützt werden, Systemelemente aus unterschiedlichen Sichten und auf verschiedenen Ebenen zu unterscheiden.

Das *grundlegende, generische Referenz-Produktmodell* nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) gliedert sich in die *Eigenschafts-, Funktions- und physische Sicht* auf ein System sowie eine *Systemebene* (i.S.v. „System-of-Interest“ bzw. Gesamtsystem) und eine variable Anzahl an „*darüberliegenden*“ *Supersystem-Ebenen* sowie „*darunterliegenden*“ *Subsystem-Ebenen* (vgl. Abbildung 5.4). In einer Vielzahl von Entwicklungsprojekten in der Automobilindustrie, im Sondermaschinenbau und in der Haushalts-elektronik erwiesen sich diese drei Sichten auf ein System besonders in frühen Entwicklungsphasen für den Erfolg des Entwicklungsprojektes als entscheidend. Darüber hinaus können weitere Ansätze, wie z.B. die Beschreibung von *Anwendungsfällen* oder *Anforderungslisten*, integriert werden (vgl. u.a. Albers, Heitger, Haug et al. (2018), Reinemann, Hirschter, Mandel et al. (2018), Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018), Reinemann (2021)). Die Modellierung von Kunden-, Anwender- und Anbieter-nutzen in Form von Produktprofilen zur Validierung einer Produktgeneration lassen sich mit den drei genannten Sichten auf ein Produkt besonders effizient und effektiv beschreiben.

Die **Eigenschaftssicht auf ein System** (vgl. Abschnitt 2.1.1.4 und Hirschter (vgl. 2023)) ermöglicht eine Beschreibung des Verhaltens aus u.a. Kunden-, Anwender- und/oder Anbietersicht in einem definierten Kontext (z.B. Fahrdynamik eines Fahrzeugs). Die Ausprägungen der Eigenschaften sind quantitativ und/oder qualitativ feststellbare Größen, die nicht direkt durch den Produktentwickelnden beeinflusst werden können. Eine Eigenschaftsausprägung wird fraktal durch mindestens ein Merkmal desselben technischen Systems und dessen Ausprägung bestimmt. Der Produktentwickelnde kann über Eigenschaften das gewünschte, lösungsoffene *Soll-(Produkt-)Verhalten* („Was“ soll das System leisten?) spezifizieren. Zusätzlich dazu kann diese

Sicht zur Charakterisierung des resultierenden, lösungsspezifischen *Ist-(Produkt-)Verhaltens* verwendet werden, das sich aus der Realisierung über Elemente der Funktions- und/oder physischen Sicht ergibt. (Hirschter, vsl. 2023)

In der **Funktionssicht auf ein System** wird das gewünschte oder resultierende Verhalten des Systems zur Erfüllung eines *Zwecks* (Aufgabe, Aktion oder Aktivität) ohne Berücksichtigung der verwendeten, interagierenden, physikalischen Lösungselemente spezifiziert (vgl. Abschnitt 2.1.1.5). Die funktionale Sicht auf ein System beschreibt nach Ropohl (2009) in der Systemtheorie die *Interaktion des Systems* mit seiner definierten Umgebung durch *Ein- und Ausgangsgrößen* sowie den *möglichen Zuständen*. Im folgenden Abschnitt 5.1.5 dieser Forschungsarbeit wird das *Funktionsverständnis im Modell der PGE* detailliert.

Die **physische Sicht auf ein System** beschreibt die *physischen Elemente* (elektronischen und mechanischen Bestandteile) eines datenverarbeitenden bzw. mechatronischen Systems (vgl. Abschnitt 2.1.1.3), bestehend aus den zwei Komplementen Hardware (materiell) und Software (immateriell, bspw. Programme und Daten) (vgl. u.a. VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Diese Sicht wird verwendet, um die technische Lösung („Wie“ soll das gewünschte Verhalten und der Zweck des Systems realisiert werden?) über mechatronische Umfänge zu spezifizieren.

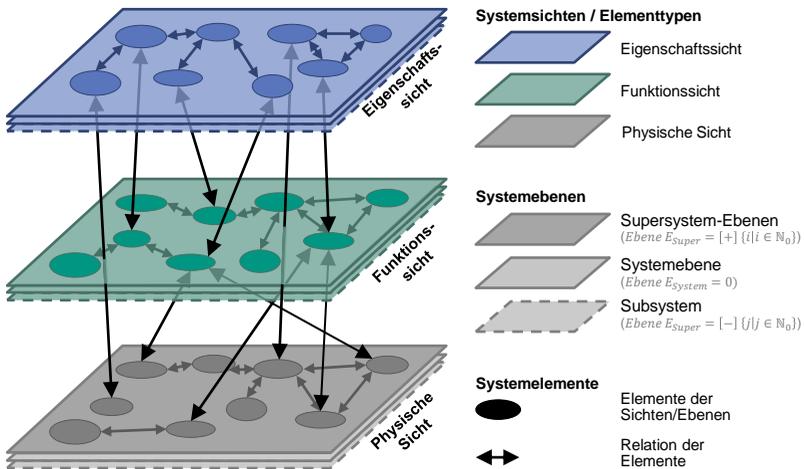


Abbildung 5.4: Grundlegendes Referenz-Produktmodell im Modell der PGE nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 360)

Die drei *Systemsichten* (Eigenschaften, Funktionen und physische Elemente) stehen in ständiger Interaktion miteinander, weshalb die jeweiligen Beziehungen der Elemente über die Sichten hinweg *spezifiziert* werden. Dabei kann der Produktentwickelnde abwärts (hinsichtlich der substantziellen Genauigkeit) in Form einer Aktivität *konkretisieren* oder aufwärts durch *abstrahieren* die Produktgeneration *spezifizieren* (Henn, 1999). Das Ergebnis des Spezifizierens ist die *Bestimmung des Spezifikums* (Eigentümlichkeit) einer Sache. Es ist nicht möglich, nur in einer Sicht entlang der zugehörigen Systemebenen zu *spezifizieren*, da diese durch die Spezifizierung über die anderen Sichten bestimmt wird. Die Spezifizierung von „*abstrakt nach konkret*“ (Berücksichtigung der Effektivität) kann in der praktischen Anwendung bei gleichzeitiger Berücksichtigung von z.B. Plattform- oder Modulstrategien (Effizienz) nicht bestätigt werden, weshalb das Modell keine Rangfolge der Sichten vorgibt (Henn, 1999). Die Aktivitäten des Konkretisierens und des Abstrahierens beziehen sich auf das Sichten- und Ebenen-übergreifende Spezifizieren eines Systems, um den Lösungsraum entweder *einzuschränken* oder zu *erweitern*. *Konkretisieren* beschreibt als „*abwärtsgerichtetes*“ Spezifizieren eine schrittweise Verfeinerung bzw. Erhöhung der *inhaltlichen und/oder prozessualen Spezifität* und erzielt damit das *Spezifikum* eines Systemelements. *Abstrahieren* beschreibt als „*aufwärtsgerichtetes*“ Spezifizieren eine Reduktion bzw. Verallgemeinerung einer inhaltlichen und/oder prozessualen Spezifität und erzielt damit das *Generikum* eines Systemelements. Innerhalb einer Systemsicht kann der Produktentwickelnde die Systemelemente in der Eigenschafts-, Funktions- bzw. physischen Struktur über die Ebenen *zerlegen* oder *zusammenführen* (Feldhusen & Grote, 2013). Die Aktivitäten des *Zerlegens* und des *Zusammenführens* beziehen sich auf das Ebenen-übergreifende Konkretisieren bzw. Abstrahieren innerhalb einer Systemsicht, um bspw. ein System in seine Subsysteme zu zerlegen oder mehrere Systeme in einem Supersystem zusammenzuführen. Das Zerlegen und Zusammenführen in einer Systemsicht setzen ein ausreichend erfolgreiches, Sichten-übergreifendes Konkretisieren und Abstrahieren voraus. Zerlegen und Zusammenführen manifestieren in der Produktgenerations-übergreifenden Anwendung *wiederkehrende (logische) Referenz-Strukturen* (bspw. Eigenschafts- oder Funktionsstrukturen). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020; Hirschter, vsl. 2023)

Zur einheitlichen Hierarchisierung werden die Systemebenen von *Supersystem(e)*, *System* und *Subsystem(e)* gemäß dem *Hierarchischen Konzept* nach Ropohl (2009) im Referenz-Produktmodell betrachtet. Die Hierarchie der Elemente in jeder Systemsicht wird in der *Eigenschafts-, Funktions- bzw. physischen Struktur* festgehalten. Jede der Systemebenen im Referenz-Produktmodell kann entsprechend dem Organisations- bzw. Entwicklungskontext Anbieter- oder Produktgenerations-spezifisch festgelegt oder abgeleitet werden und ggf. als *System of System (SoS)* (vgl. Abschnitt 2.1.1.3) charakterisiert werden. Die *Systemebene* $E_{System} = 0$ ist einzigartig und spezifiziert dabei die Ebene, auf der ein Anbieter typischerweise das *Ergebnis* (bzw. *Pro-*

dukt) der Entwicklungsaufgabe an Kunden bzw. Anwender vertreibt (i.S.v. Gesamtsystem bzw. „System-of-Interest“ in verschiedene Betrachtungsweisen). Das Gesamtsystem kann in eine variable Anzahl an *Subsystem-Ebenen* (vgl. Formel 9) granular heruntergebrochen werden (bspw. bis auf Wirkflächenpaare (WFP), vgl. Albers, Behrendt, Schroeter et al. (2013)). Gleichermaßen kann das System mit weiteren Systemen auf gleicher Ebene in beliebig vielen *Supersystem-Ebenen* (vgl. Formel 8) integriert werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Die jeweilige Ebene der Super- und Subsysteme lässt sich ausdrücken über:

Supersystem-Ebenen: Ebene $E_{Super} = [+]\{i|i \in \mathbb{N}_0\}$ 8

bzw.

Subsystem-Ebenen: Ebene $E_{Sub} = [-]\{j|j \in \mathbb{N}_0\}$ 9

Es ist die Aufgabe des Produktentwickelnden, *logische Referenzstrukturen der Systemebenen* zu übernehmen bzw. zu variieren, oder ein neues Produkt (i.S.v. einer G_1 im Modell der PGE) sinnvoll neu in Systemebenen zu strukturieren. Das Ergebnis einer Entwicklungsaufgabe bzw. Produkt kann koinzident ein Subsystem eines anderen Produktes (bspw. der gleichen Domäne) sein (Bursac, 2016). Das Getriebe ist das Produkt eines Anbieters (hier: Automobilzulieferer) und gleichzeitig ein Subsystem eines Fahrzeugs eines OEM der Domäne Automobilindustrie (Bursac, 2016). Aus Sicht des automobilen OEM bildet das Fahrzeug folglich ein *monolithisches System of Subsystems* (vgl. Albers, Mandel, Yan et al. (2018)), ein vom Kontext abhängiges System des zugehörigen Supersystems. Dennoch können bspw. Fahrzeuge, Smartphone-Apps und die Verkehrsinfrastrukturen ein Supersystem bilden, das nahtlos zusammenarbeitet, um gemeinsam Kunden- und Anwenderbedürfnisse zufrieden zu stellen. Hier bilden alle einzelnen (autarken) Systeme zusammen das *System of Systems* (SoS) der nahtlosen Mobilität (Albers, Grunwald, Marthaler et al., 2018). Die dargestellte Supersystem-Ebene kann in diesem Beispiel folglich als SoS charakterisiert werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020; Hirschter, vsl. 2023)

In Abhängigkeit des Betrachters (bspw. Domäne, Organisation oder Produktentwickelnde) kann sich die hierarchische Gliederung in Systemebene sowie Super- und Subsystem-Ebene(n) unterscheiden. Innerhalb einer Domäne kann es zielführend sein, eine *globale Sicht* für eine Branche, Wertschöpfungskette, etc. zu standardisieren. Ein Beispiel hierfür ist die *Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge* (vgl. DIN EN 15380:2006/2013/2014), in der eine einheitliche Hierarchisierung der Systemebenen innerhalb der Domäne verabschiedet wurde. Vorteile dieser Vereinheitlichung

zeigen sich hierbei in effizienteren Vergaben von Subsystem-Entwicklungen durch Dienstleister, Domänen-bezogene Standardisierung von Tests/Validierung und/oder Freigaben. Darüber hinaus kann eine differenzierte Betrachtung innerhalb der Organisationsstrukturen eines Anbieters stattfinden. In diesem Fall kann eine Hierarchie der Systemebenen Organisations-global bzw. Anbieter-spezifisch festgelegt werden. Problemlösungsteams in Fachbereichen des Anbieters oder einzelne Produktentwickelnde können jedoch ihre Ebene des „System-of-Interest“ spezifisch in Relation setzen und bspw. eine absolute Skala relativ dazu umrechnen. Analog dazu kann sich ein Zulieferer, der nur ein Subsystem für den Anbieter entwickelt, oder ein weiterer Anbieter, der den Teil eines Supersystems bereitstellt, an den festgelegten Systemebenen über eine relative Skala orientieren. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020; Hirschter, vsl. 2023)

Zusammenfassend unterstützt das grundlegende, generische Referenz-Produktmodell sowohl die lösungsoffene (z.B. Differenzierungsziele) als auch lösungsspezifische (z.B. Variation von WFP, LSS und C) Beschreibung einer Produktgeneration sowie das Konkretisieren als auch Abstrahieren mittels der Systemansichten auf Eigenschaften, Funktionen und physischer Elemente über Systemebenen hinweg.

5.1.5 Funktionen im Modell der PGE

In diesem Abschnitt werden zunächst die komplementären Verständnisse unterschiedlicher Funktionen in der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung* differenziert. Anschließend wird der generische Variationsoperator im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS auf das entwickelte Funktionsverständnis angewendet und ein Leitfaden zur strukturierten Formulierung von Funktionen im Modell der PGE vorgestellt. Die Modellierung von Produktfunktionen in der Frühen Phase im Modell der PGE schließt diesen Abschnitt ab.

5.1.5.1 Funktionsverständnis in der KaSPro

Das heterogene Funktionsverständnis in der Literatur wurde in Abschnitt 2.1.1.5 im Rahmen der Klärung des Forschungsgegenstandes erörtert und zudem das Verständnis von Funktionen in der Frühen Phase durch eine systematische Literaturanalyse (vgl. Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020)) ergründet. Durch den Vergleich alternativer Referenzsystem-Elemente (RSE) des Wankstabilisierungssystems in Abschnitt 4.4.4 wurden ferner Schlussfolgerungen zum Funktionsverständnis anhand der Phänomene der Variation von Funktionen in einer empirischen Studie gezogen. In Anlehnung an das Verständnis nach der VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11) und Pahl, Beitz, Feldhusen et al. (2007) werden **Funktionen in der KaSPro** generisch wie folgt definiert (vgl. Definition 6 und Abbildung 5.5).

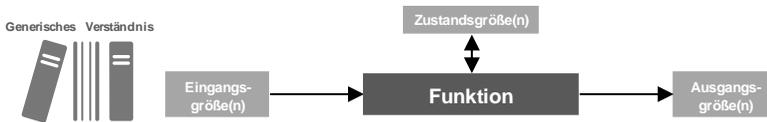


Abbildung 5.5: Generisches Funktionsverständnis in der KaSPRO nach Definition 6

Definition 6: Funktion in der KaSPRO – Karlsruher Schule für Produktentwicklung

Eine **Funktion** in der Produktentwicklung ist ein *Elementtyp* eines technischen Systems, anhand der sich eine *Wirkbeziehung* zwischen einer Menge von (initiierenden) *Eingangsgrößen* (*engl.* inputs) und (resultierenden) *Ausgangsgrößen* (*engl.* outputs) sowie den (inhärenten) *Zustandsgrößen* (*engl.* states) aus einer u.a. Kunden-, Anwender-, Anbieter- und/oder Produktentwickelnden-Sicht in einem *definierten Kontext* beschreiben lässt. Die *Ausprägung einer Funktion* ergibt sich aus der *hierarchischen Gliederung* in *Subfunktion(en)* und/oder *strukturalen Gliederung* in *Haupt- und Nebenfunktion(en)*. Eine *Funktionsausprägung* wird *fraktal* durch mindestens eine Sub- oder Hauptfunktion desselben technischen Systems und dessen Ausprägung bestimmt.

Eine **Funktion** (vgl. Definition 6 und Abbildung 5.5) wird in der Produktentwicklung analog Abschnitt 5.1.1 als ein *Elementtyp* eines technischen Systems (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) verstanden. Das Funktionsverständnis gilt dabei für technische Systeme i.S.v. *Mensch-gemachten Artefakten* und ist übergreifend anwendbar. Eine *Wirkbeziehung* beschreibt in Anlehnung an Zingel (2013) den kausalen Zusammenhang von *Ursache* und *Auswirkung*, die innerhalb eines technischen Systems gleichzeitig Ursachen mit Auslösung weiterer Funktionen sein können. An der *Systemgrenze* von Funktionen sind *Wirkungen* über eine Menge von Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen mess- bzw. feststellbar. Eine *Größe* bezeichnet dabei eine quantitative und qualitative Eigenschaft oder deren Merkmal(e) einer physikalischen oder situativen Erscheinung (Dudenredaktion, n.d.a).

In der Modellbildung werden *Eingangsgrößen* meist als Input bezeichnet, die als initiierende Ursache oder Auslöser von Funktionen betrachtet werden. Entsprechend werden *Ausgangsgrößen* als Output bezeichnet, sie stehen für die Auswirkung oder das Resultat einer Funktion. Hinzu kommen die inhärenten *Zustandsgrößen* einer Funktion (*engl.* states), die im Sinne einer makroskopischen Größe den Zustand der Funktion

beschreiben, aber bei Betrachtung in variablen Ausprägungen aufgefasst werden (Zingel, 2013). Der aktuelle Zustand einer Funktion kann über inhärenten Zustandsgrößen beschrieben werden, die jedoch unabhängig davon sind, auf welchem Weg die Funktion in diesen Zustand gelangt ist. Bleiben alle Zustandsgrößen einer Funktion zeitlich konstant, befindet sie sich im Gleichgewicht bzw. einem sogenannten stationären Zustand. Die Wirkbeziehung anhand der sich eine Funktion beschreiben lässt, setzt sich folglich aus einer bestimmten Anzahl (bzw. Menge) an initiiierenden Eingangsgrößen und resultierenden Ausgangsgrößen sowie inhärenten Zustandsgrößen zusammen.

Eine Funktion kann aus verschiedenen *Sichtweisen* (u.a. Kunde/Anwender/Anbieter und/oder Produktentwickelnde) beschrieben werden. Zur analytischen und synthetisierenden Betrachtung der Funktion ist der *Kontext* des Systems relevant. Unter dem Systemkontext werden dabei der Betrachter des Systems (u.a. Kunde/Anwender/Anbieter und/oder Produktentwickelnde), das *Systemumfeld* (beeinflussende oder beeinflusste Funktionen außerhalb der Systemgrenze) sowie *Umweltbedingungen* (z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.) verstanden. Die *Ausprägung einer Funktion* lässt sich in *Subfunktion(en)*⁶³ gliedern und/oder in *Haupt- bzw. Nebenfunktion(en)*⁶⁴ strukturieren, die in ihrem hierarchisch und/oder strukturalen Zusammenwirken die gesamt-haftige Funktion als Beitrag zum Zweck des System erfüllen (Ponn & Lindemann, 2011). Eine Funktionsausprägung kann durch den Produktentwickelnden entweder als „*Vorhaben*“ festgelegt (*gewünschte/beabsichtigte Funktion*) werden oder ergibt sich emergent aus den Fraktalen weiterer Funktionen (*unerwünschte/unbeabsichtigte Funktion*). Die identische Betrachtungsweise von Funktion und ihrer Ausprägung ist im Sinne der *Fraktalität* (Matthiesen, 2002) bis auf die grundlegendste Ebene möglich und kann immer wieder gleich erfolgen (Matthiesen, Grauberger, Sturm et al., 2018).

Auf Basis des generischen Funktionsverständnisses in der KaSPRO – Karlsruher Schule für Produktentwicklung kann eine **Produktfunktion im Modell der PGE** (vgl. Definition 7 und Abbildung 5.6) folgendermaßen definiert werden (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020).

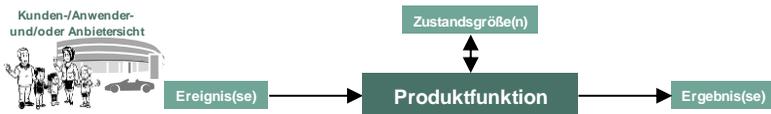


Abbildung 5.6: Produktfunktion im Modell der PGE nach Definition 7 (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

⁶³ gemäß *hierarchischem Konzept* nach Ropohl (2009).

⁶⁴ gemäß *strukturelem Konzept* nach Ropohl (2009) und in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2803-1:2019-01.

Definition 7: Produktfunktion im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

Eine **Produktfunktion** im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ist eine *Funktion* eines technischen Systems, anhand der sich eine *lösungs-offene Wirkbeziehung des Gesamtproduktes* zwischen einer Menge von *initiiierenden Ereignissen* und *resultierenden Ergebnissen* sowie den (inhärenten) *Zuständen* aus u.a. Kunden-, Anwender- und/oder Anbietersicht in einem *definierten Kontext* beschreiben lässt.

Eine **Produktfunktion** (vgl. Definition 7 und Abbildung 5.6) ist eine *Funktion* (vgl. Definition 6), anhand der sich eine *lösungs-offene Wirkbeziehung des Gesamtproduktes*⁶⁵ beschreiben lässt. Eine Produktfunktion i.S.v. einer lösungs-offenen Wirkbeziehung kann somit sowohl dem technischen System (bspw. „*Fahrzeuggeschwindigkeit regeln*“) als auch Service (z.B. „*Fahrzeug instand halten*“) und/oder Geschäftsmodell (bspw. „*Fahrzeug vermieten*“) zugeordnet sein. Eine *lösungs-offene Wirkbeziehung* beschreibt den *Kausalzusammenhang* zwischen einer bestimmten Anzahl an *initiiierenden Ereignissen* (Ursache, vgl. Warkentin, Herbst & Gausemeier (2009)) und *resultierenden Ergebnissen* (Auswirkung), jedoch unabhängig der technischen Lösung. Die lösungs-offene Wirkbeziehung betrifft damit die Wechselbeziehung von zueinander in Verbindung stehenden Ereignissen und Ergebnissen sowie inhärente *Zustandsgrößen*. Ein *Ereignis* ist eine *beobachtbare Situation* (Summe momentaner Umstände), die sich durch Dynamik oder Veränderung kennzeichnet und somit einer Änderung des Handlungsumfelds des Betrachters entspricht (in Anlehnung an Lombard (1986)). Eine Produktfunktion kann durch u.a. den Kunden, Anwender, Anbieter und/oder die Umwelt bzw. das Produkt selbst über eine bestimmte Anzahl an Ereignissen (Eingangsgrößen) *initiiert* oder *beeinflusst* werden. Ein *Ergebnis* ist ein Ereignis, das ein Resultat eines Systems oder Systemelements (hier: Funktion) darstellt. Die Menge an Ergebnissen (Ausgangsgrößen) einer Produktfunktion realisiert das *Produktverhalten*. Die *inhärenten Zustände* einer Produktfunktion können im Kontext der Abfolge einzelner Ereignisse (i.S.v. Use-Case, User-Journey, etc.) verstanden werden, die jedoch unabhängig davon sind, auf welchem Weg die Produktfunktion in den aktuellen Zustand aus Sicht des Betrachters (u.a. Kunde/Anwender und/oder Anbieter) gelangt ist.

Die *Kundensicht* fokussiert sich auf den Zweck des zu lösenden Problems oder den angestrebten Kundennutzen und konkretisiert, wie der Kunde einer Zielgruppe und/oder eines Marktsegments von der (potentiellen) Produktfunktion profitieren würde (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Die *Anwendersicht* beleuchtet, wie der Anwender einer Zielgruppe aus der (potentiellen) Produktfunktion Nutzen ziehen

⁶⁵ vgl. Abschnitt 2.1.1.3 zum Verständnis des *Produktbegriffs* in der KaSPro.

würde und fokussiert sich dabei auf den Zweck des zu lösenden Anwendungsproblems oder den angestrebten Anwendernutzen (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Die *Anbietersicht* fokussiert sich auf den Zweck des zu lösenden Problems oder den angestrebten Anbieternutzen und konkretisiert, wie der Anbieter von der Entwicklung der (potentiellen) Produktfunktion (i.S.v. strategischem Nutzen, Ergänzung von Produktportfolio/Geschäftsmodellen, Nutzung von Kernkompetenzen und/oder Ressourcen, etc.) profitieren würde (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Die *Ausprägung einer Produktfunktion* kann analog zu einer Funktion durch den Produktentwickelnden entweder als „Vorhaben“ festgelegt (*gewünschte/beabsichtigte Produktfunktion*) werden oder ergibt sich emergent aus den Fraktalen weiterer (Produkt-)Funktionen (*unerwünschte/unbeabsichtigte Produktfunktion*).

Dieser komplexe Zusammenhang der Interaktion zwischen Kunden bzw. Anwender und Produkt wird in Abschnitt 5.1.5.4 anhand des *Modells einer (Produkt-)Funktion* noch einmal aufgegriffen und mit Hilfe eines automobilen Beispiels zweckgebunden, pragmatisch und verkürzend im Sinne der Modelltheorie erörtert.

Auf Basis des generischen Funktionsverständnisses in der KaSPro kann ebenso in Anlehnung an Arbeiten von Zingel (2013), Thau (2013) und Alink (2010) das spezifische Verständnis der **technischen Funktion** (vgl. Definition 13 und Abbildung D.5) abgeleitet und definiert werden. Die Beschreibung und Erläuterungen dazu finden sich in Anhang D.1.4.

Im Grundsatz lässt sich auf Basis der Erkenntnisse aus der Deskriptiven Studie I (insbesondere Abschnitt 4.4.4) die **Differenzierung zwischen Produktfunktionen**, die in der *lösungsoffenen, logischen Systemarchitektur* verortet und über Wirkdiagramme abgebildet werden können, **und technischen Funktionen**, die sich in der *lösungsspezifischen, physischen Systemarchitektur* auf konkrete physische Elemente bzw. deren Wirkflächenpaare (WFP) und Leitstützstrukturen (LSS) gemäß des C&C²-Ansatzes beziehen, festhalten.

Abschließend wird als Grundlage für den folgenden Referenzprozess zum Spezifizieren von Produktfunktionen der Begriff des **funktionalen Produktkonzepts** im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (vgl. Definition 8) definiert (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019).

Definition 8: Funktionales Produktkonzept im Modell der PGE

Ein **funktionales Produktkonzept** im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ist ein *Produktkonzept*, anhand dessen sich ein *lösungsöffener Vorschlag* zur Erfüllung der *Anforderungen* und *Ziele* des *Gesamtproduktes* aus *Funktionssicht* in der Frühen Phase im Modell der der PGE über *Produktfunktionen* einer Produktgeneration beschreiben lässt. Das funktionale Produktkonzept definiert die *initialen Übernahme- und Neuentwicklungsanteile* von Produktfunktionen unter Berücksichtigung von u.a. *Kunden-, Anwender- und/oder Anbieternutzen* (im Kontext des *Produktportfolios*).

Ein *Produktkonzept* ist ein *Konzept* (Ponn & Lindemann, 2011) eines *technischen Systems*, das einen *Vorschlag* zur Erfüllung der *Anforderungen* und *Ziele* des *Gesamtproduktes* im Modell der PGE (vgl. Albers, Rapp, Birk et al. (2017)) zur Produktspezifikation beschreibt. Das Produktkonzept definiert die *initialen Übernahme- und Neuentwicklungsanteile* von *Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen* unter Berücksichtigung der *Randbedingungen* (z.B. Anbieter-/Produktportfoliostrategie, Nutzung vorhandener Ressourcen wie Produktionssysteme, etc.) (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019). Nach Abschluss der Produktspezifikation werden die aufbereiteten und strukturierten *Informationen bzw. Ergebnisse der Wissensakquise* (Schmalenbach, 2013) und *Artefakte* (z.B. in Form von Pflichtenheften) in die *Realisierungsphase der Produktgeneration* bzw. an die *Serienentwicklung* übergeben (in Anlehnung an Walch (2017)). In der Frühen Phase im Modell der PGE wird das **funktionale Produktkonzept** (vgl. Definition 8) genutzt, um einen lösungsöffenen Vorschlag zur Erfüllung von Anforderungen und Zielen einer Produktgeneration aus der *Funktionssicht* über die wechselwirkende Menge der Produktfunktionen zu beschreiben (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019).

Zur Ermöglichung der Beschreibung von initialer Definition von *Übernahme- und Neuentwicklungsanteilen von Produktfunktionen* wird der generische Variationsoperator im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.1.3) im folgenden Abschnitt 5.1.5.2 auf den Elementtyp „*Funktion*“ angewendet. Darüber hinaus werden zur allumfassenden Berücksichtigung des Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens die Abstraktionsgrade des Produktportfolios im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.3.1, Fahl, Hirschter, Kamp et al. (2019)) strukturiert und erläutert, um einerseits die Rückverfolgbarkeit (*engl. traceability*), aber auch Vergleichbarkeit zu unterstützen.

5.1.5.2 Anwendung des generischen Variationsoperators auf Funktionen

Anschließend an das Funktionsverständnis und die Abgrenzung der Begriffe im vorangehenden Abschnitt lässt sich der **generische Variationsoperator im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS** (vgl. Abschnitt 5.1.3) darauf

anwenden. Die eingeführten Elemente sowie deren Variation im Systemkontext auf Basis des Schemas in Abbildung 5.7 wird hierfür in Bezug zu Funktionen interpretiert. In der folgenden Abbildung sind die zur generischen Beschreibung und graphischen Darstellung der Variationsarten einer Funktion im Modell der PGE aufgeführt.

Fkt_x	Betrachtete Funktion Fkt_x als System-Element in Referenzsystem R_n bzw. Produktgeneration G_n
f_y	Ausprägung der Funktion Fkt_x i.S.v. Subfunktion(en) f_y (hierarchisches Konzept) und/oder Haupt-/Nebenfunktion(en) j (strukturelles Konzept)
C_{Input}	Eingangsgrößen-Connector (<i>engl. input</i>) zur Berücksichtigung der Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze der Eingangsgrößen (bspw. Güte von Stoff-/Energie-/Informationsfluss, Auftrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen, etc.)
C_{Output}	Ausgangsgrößen-Connector (<i>engl. output</i>) zur Berücksichtigung der Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze der Ausgangsgrößen (bspw. Güte von Stoff-/Energie-/Informationsfluss, Auftrittswahrscheinlichkeit von Ergebnissen, etc.)
C_{State}	Zustandsgrößen-Connector (<i>engl. state</i>) zur Berücksichtigung der Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze der Zustandsgrößen (bspw. Sequenz der möglichen Zustände, Use-Cases, User-Journeys, etc.)

Abbildung 5.7: Einführung der Elemente zur generischen Beschreibung der Variation von Funktionen im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 873)

Das betrachtete Systemelement des Elementtyps „Funktion“ wird in den nachfolgenden Ausführungen mit Fkt_x bezeichnet, deren Ausprägungen – i.S.v. Subfunktion(en) bzw. Haupt-/Nebenfunktion(en) mit f_y . Zur generischen Beschreibung der drei Variationsarten – Übernahme- (ÜV), Ausprägungs- (AV) und Prinzipvariation (PV) – werden drei Connectoren C_{Input} , C_{Output} und C_{State} in Betracht gezogen. Im *Eingangsgrößen-Connector* C_{Input} werden die Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze der Eingangsgrößen berücksichtigt, um die *Rückverfolgbarkeit* und *Vergleichbarkeit der Auswirkung* einer Funktion transparent zu machen. In Bezug auf eine technische Funktion beinhaltet der Eingangsgrößen-Connector bspw. Informationen über die *Güte des Stoff-/Energie- und/oder Energieflusses*. Bezogen auf eine Produktfunktion finden sich in C_{Input} zum Beispiel die *spezi-fische Auftrittswahrscheinlichkeit von initiiierenden Ereignissen* der Produktfunktion. Analog zum Eingangsgrößen-Connector berücksichtigt der *Ausgangsgrößen-Connector* C_{Output} die Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze der Ausgangsgrößen. Im *Zustandsgrößen-Connector* C_{State} werden die Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung an der Systemgrenze der Zustandsgrößen berücksichtigt, um bspw. die *Sequenz⁶⁶ der möglichen Zustände*, einen abstrahierten *Use-Case* oder eine *User-Journey* zu beschreiben. Die Veränderungen innerhalb der drei Connectoren haben dabei keinen Einfluss

⁶⁶ Eine *Sequenz* beschreibt nach Thau (2013, S. 82) „eine determinierte Abfolge von mindestens zwei Zuständen“, die neu definiert werden muss, „wenn sich die Abfolge der Zustände ändert, sich Zustände in einem funktionsrelevanten Umfang ändern oder neue Zustände hinzukommen bzw. wegfallen“.

auf die Variation der Funktion, sondern die Variation lässt sich anhand der Veränderung der Funktions-bestimmenden Subfunktion(en) bzw. Haupt-/Nebenfunktion(en) ausmachen. (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021)

Abbildung 5.8 visualisiert das Verständnis der **Übernahmevariation (ÜV) einer Funktion im Modell der PGE** auf Basis des Referenzsystems R_n in eine Produktgeneration G_n . Die Eingangsgrößen (*engl.* inputs) und Ausgangsgrößen (*engl.* outputs) der Funktion Fkt_x sind dabei mit dem zugehörigen Eingangsgrößen-Connector C_{Input} bzw. Ausgangsgrößen-Connector C_{Output} verbunden. Die Funktion Fkt_x ist zudem direkt in Bezug auf die Zustandsgrößen (*engl.* states) mit ihrem Zustandsgrößen-Connector C_{State} verknüpft. Im Zuge der Übernahmevariation einer Funktion können sich nur die Connectoren in ihrer Ausprägung (bspw. Güte eines Stoff-/Energie-/Informationsflusses oder Auftrittswahrscheinlichkeit eines diskreten Ereignisses) verändern. Im Testfall⁶⁷ können so bspw. unterschiedlich ausgeprägte Auswirkung(en) vom Betrachter festgestellt werden, die Funktionalität bzw. die Ausprägung der Funktion selbst wird dadurch jedoch nicht variiert. Ändert sich folglich bspw. die Auftrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses „Wildtier springt vor Fahrzeug auf die Straße“ im Eingangsgrößen-Connector C_{Input} , ändert dies nichts an der Tatsache (bzw. Funktionalität), dass das Fahrzeug im Fall der Fälle beim Eintreten des diskreten Ereignisses dennoch eine Notbremsung automatisiert ausführt. Da die Wirkbeziehung des Systemelements „Funktion“ auch im Inneren (hinsichtlich ihrer Ausprägung der Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktion(en) f_y) unverändert bleibt und somit das identische Lösungsprinzip des zu Grunde liegenden Referenzsystem-Elements aus R_n übernommen wird, spricht man von einer Übernahmevariation der Funktion. (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021)

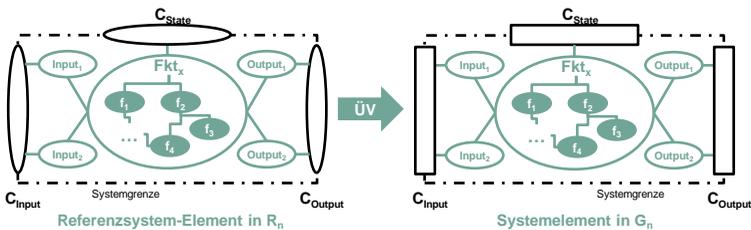


Abbildung 5.8: Generische Darstellung der Übernahmevariation (ÜV) einer Funktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 874)

⁶⁷ Ein Testfall beschreibt nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 554) „ein repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen“ und „definiert den Input-Verlauf eines Systems und die Start- und Randbedingungen sowie das erwartete Verhalten des Systems“.

Die **Ausprägungsvariation (AV) einer Funktion im Modell der PGE** auf Basis des Referenzsystems R_n in eine Produktgeneration G_n wird in Abbildung 5.9 dargestellt. Die Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen der Funktion Fkt_x sind dabei analog der Übernahmevariation mit ihren entsprechenden Connectoren verbunden und der Zustandsgrößen-Connector steht in direkter Verbindung zur Funktion. Verändert sich die Ausprägung der Funktion unabhängig einer Veränderung in den Connectoren, so spricht man von der Ausprägungsvariation dieser Funktion. Die Ausprägungsvariation einer Funktion Fkt_x ist immer auf eine *mindestens partielle Variation der inhärenten Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktionen f_y* oder deren Wechselwirkungen im Inneren der Funktion Fkt_x zurückzuführen. Wird bspw. die zu Grunde liegende Wirkbeziehung der Funktion „*Fahrzeuggeschwindigkeit Abstands-abhängig regeln*“ aus dem Referenzsystem R_n übertragen und in ihren inhärenten Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktionen im Inneren so variiert, dass in der neuen Produktgeneration G_n die Funktion „*Fahrzeuggeschwindigkeit Topologie-abhängig regeln*“ realisiert werden kann, so handelt es sich um eine Neuentwicklung durch Ausprägungsvariation. Die *gewünschte oder beabsichtigte Ausprägungsvariation einer Funktion* durch den Produktentwickelnden begründet sich meist in einer gewünschten oder beabsichtigten Steigerung der Leistungsfähigkeit und/oder der Qualität der Funktionserfüllung. (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021)

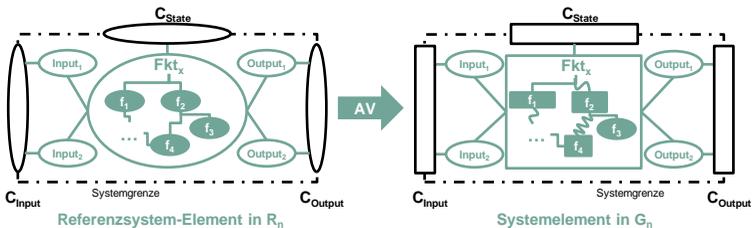


Abbildung 5.9: Generische Darstellung der Ausprägungsvariation (AV) einer Funktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 874)

Abbildung 5.10 visualisiert das Verständnis der **Prinzipvariation (PV) einer Funktion im Modell der PGE** auf Basis des Referenzsystems R_n in eine Produktgeneration G_n . Die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Funktion Fkt_x sind dabei analog der Übernahme- und Ausprägungsvariation mit ihren entsprechenden Connectoren verbunden und der Zustandsgrößen-Connector steht in direkter Verbindung zur Funktion. Im Zuge der Prinzipvariation einer Funktion Fkt_x wird die zu Grunde liegende Wirkbeziehung des Referenzsystem-Elements durch *Hinzufügen* und/oder *Entfernen inhärenter Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktionen f_y* oder deren Wechselwirkungen im Inneren der Funktion Fkt_x in die Produktgeneration G_n übertragen. Überträgt man bspw. die Wirkbeziehung der Funktion „*Fahrzeugantrieb bereitstellen*“ durch Hinzufügen und/oder Entfernen inhärenter Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktionen und variiert diese im Inneren

so, dass in der neuen Produktgeneration G_n die Funktion „Fahrzeugabtrieb steuern“ realisiert werden kann, so handelt es sich um eine Neuentwicklung durch Prinzipvariation. Dadurch wird eine gegenüber dem Referenzsystem-Element neue Wirkbeziehung realisiert. Eine Prinzipvariation (PV) einer Funktion geht analog dem generischen Verständnis in Abschnitt 5.1.3 immer mit einer Ausprägungsvariation (AV) einher – man spricht auch von einer Neuentwicklung eines Systems, beginnend mit der durch den Produktentwickelnden gewünschten oder beabsichtigten Prinzipvariation einer Funktion. (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021)

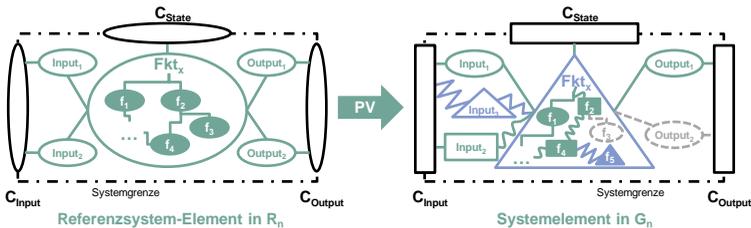


Abbildung 5.10: Generische Darstellung der Prinzipvariation (PV) einer Funktion im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 875)

Im folgenden Abschnitt wird ein Leitfaden zur strukturierten Formulierung von Funktionen im Modell der PGE vorgeschlagen, über den einerseits die Differenzierung der Variationsarten ÜV, AV und PV einer Funktion und andererseits die Verortung auf verschiedenen Systemebenen (vgl. Abschnitt 5.1.4) der Funktionssicht ermöglicht wird.

5.1.5.3 Leitfaden zur Formulierung von Funktionen im Modell der PGE

Basierend auf der systematischen Literaturanalyse in Abschnitt 2.1.1.5 bzw. Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) und der Studie zu den Phänomenen der Variation von Funktionen (vgl. Abschnitt 4.4.4) wird nachfolgend ein **Leitfaden zur Formulierung von Funktionen im Modell der PGE** erläutert. Das entwickelte Konzept baut dabei wesentlich auf das Verständnis von Alink (2010) zur Formulierung von (technischen) Funktionen für das Lösen von Gestaltungsproblemen in der Konstruktionsmethodik auf und vereinigt dies mit dem explizierten Verständnis von Produktfunktionen im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.1.5.1).

Grundsätzlich sollten Funktionen in erster Linie so nach ihrer Bedeutung formuliert werden, dass diese wiedergibt, was der Betrachter ausdrücken möchte (Alink, 2010). Die Formulierung einer Funktion darf in Bezug zur Alternativen Lösungssuche (vgl. Abschnitt 2.1.3.1) keinesfalls nur im *realen* Bereich bleiben, sondern muss an der Grenze zwischen *ikonischem* und *symbolischem* Abstraktionsgrad liegen (vgl. Abbildung 2.5 und VDI-Richtlinie 2803 (VDI-Richtlinie 2803-1:2019-01)). Im Modell der PGE

kann eine Funktion (in Anlehnung an Pahl, Beitz, Feldhusen et al. (2007)) generisch über eine elementare *Kombination* aus *Substantiv und Verb* formuliert werden (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Das *Substantiv* beschreibt in Bezug auf die Funktion basierend auf Ehrlenspiel (2009) den *Ort bzw. Raum* der Umsetzung von der Ursache in Auswirkung, das *Verb* die zugehörige *Veränderung oder Variation ebenda*. Die Formulierung kann durch *ergänzende Substantive, Präpositionen und Adverbien* präzisiert werden, um der gewünschten oder beabsichtigten Bedeutung gerecht zu werden (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020).

Das *Substantiv* kann nach Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) verwendet werden, um die Systemelemente und/oder Systemebene (bspw. „*Scheibenbremse*“ i.S.v. Systemelement oder „*Gesamtfahrzeug*“ i.S.v. Systemebene) abzubilden, auf die sich die Wirkbeziehung bezieht (vgl. Abbildung 5.11). Am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeuggeschwindigkeit festsetzen*“ (ugs. „*Geschwindigkeitsregeltempomat*“), gibt die Systemebene „*Fahrzeug*“ an, an welchem Ort bzw. in welchem Raum ein Ereignis oder das Ergebnis der Produktfunktion wirkt. Ebenso kann die Vernetzung verschiedener Systeme bzw. die *Interaktion mit Partnersystemen* (Alink, 2010) angegeben werden. Analog kann die *Interaktion in einem System-of-Systems* (Kurrle, 2017) durch die Formulierung wiedergegeben werden. Dabei können die Substantive, die die beteiligten Systeme beschreiben, mit Hilfe von Präpositionen verknüpft werden (bspw. „*Fahrzeug mittels Smartphone-App entriegeln*“ oder für technische Funktionen nach Alink (2010, S. 166): „*Antriebskraft mittels Hebelwirkung vergrößern*“).

Das *Verb* sollte *aktiv formuliert* werden und möglichst keinen Interpretationsspielraum zulassen. Die anhand der Wirkbeziehung (Ursache und Auswirkung) beschriebene Funktion kann demnach mit Hilfe eines Verbs in der Formulierung das *Wirkprinzip* erfassen. Die bewusste Auswahl eines geeigneten *Aktionsverbs* ermöglicht es folglich, die *Variationsart der Funktion im Modell der PGE* abzubilden (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Wird eine Funktion (bspw. „*Energie bereitstellen*“) aus dem Referenzsystem R_n über die **Prinzipvariation (PV)** auf eine neue Produktgeneration G_n übertragen (bspw. „*Energie zurückgewinnen*“), so kann die *PV über andersartige Verben spezifiziert* werden. Dies ist möglich, sofern die Verben prinzipiell unterschiedliche Aktivitäten, Aktionen oder Aufgaben (Walden, Roedler, Forsberg et al., 2017) charakterisieren und damit keine Synonyme darstellen. Zur spezifischeren Beschreibung der *Ausprägung der Verben* können zudem *Adverbien* in der Formulierung einer Funktion genutzt werden. In diesem Sinne kann die Variation des Adverbs zur Beschreibung einer **Ausprägungsvariation (AV)** einer Funktion im Modell der PGE dienen (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). In diesem Fall wird beispielsweise die Funktion „*Fahrzeugaerodynamik passiv regeln*“ aus dem Referenzsystem R_n in der neuen Produktgeneration G_n zu „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ in ihrer Ausprägung variiert. Bei einer **Übernahmevariation (ÜV)** einer Funktion im Modell der PGE wird weder

das betroffene, spezifizierte Substantiv noch das Verb oder dessen Ausprägung variiert. Aus diesem Grund bleibt die *Formulierung der ÜV identisch*.

Zusammenfassend hängt der richtige Abstraktionsgrad als auch die ideale Formulierung einerseits von dem *Systemelement* oder der *Systemebene* und andererseits von den *Variationsarten im Modell der PGE* ab (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Zur Differenzierung von Produktfunktion und technischer Funktion sollte versucht werden, in der Formulierung dem *lösungsoffenen* bzw. *lösungsspezifischen* Charakter der Wirkbeziehung Rechnung zu tragen. Die angeführten Beispiele zeigen, dass die Formulierung einer Funktion sehr stark von dem zu lösenden Problem (aus u.a. Kunden-, Anwender-, Anbieter- und/oder Produktentwickler-Sicht) und dem jeweiligen Problemlösungsteam abhängt. Verschiedene Personen können dabei zu unterschiedlichen Formulierungen kommen, insofern gibt es in der Regel nicht eine einzig „richtige“ Formulierung (VDI-Richtlinie 2803-1:2019-01). Letztlich muss die Formulierung aus Sicht des Problemlösungsteam geeignet sein, um damit nach alternativen Lösungen zu suchen und daher die Brücke zu den initialen Übernahme- und Neuentwicklungsanteilen der physischen Elemente in der Frühen Phase im Modell der PGE zu schlagen (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020).

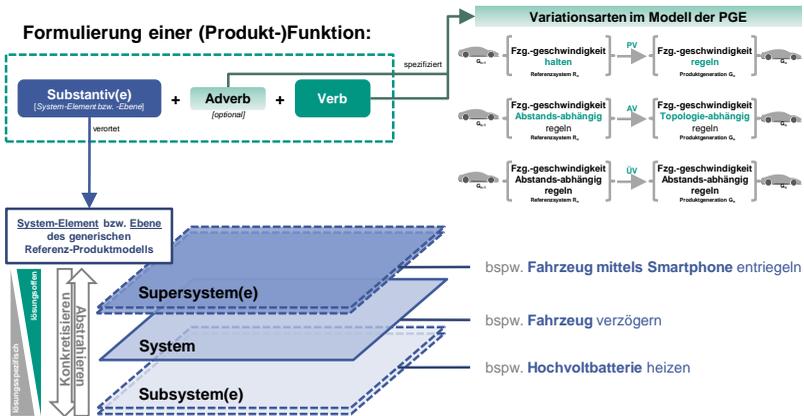


Abbildung 5.11: Leitfaden zur Formulierung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE nach Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020, S. 6)

Die strukturierte Formulierung einer (Produkt-)Funktion im Modell der PGE kann somit sowohl das Verständnis der Variationsarten als auch der Systemebenen abbilden und unterstützen (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). In dieser Weise hilft der Leitfaden dem Produktentwickelnden bei einer differenzierten Betrachtung von Funktionen und stärkt das holistische Funktionsverständnis im Modell der PGE.

zwischen initiiierenden *Ereignissen* und resultierenden *Ergebnissen* dargestellt, wohingegen sich die lösungsspezifische Wirkbeziehung von technischen Funktionen (vgl. Definition 13) in Form von Stoff-, Energie- und/oder Informationsflüssen manifestiert.

Ein *Ereignis*, das eine Produktfunktion *initiiert* oder *beeinflusst*, ist bspw. die beobachtbare Situation, dass ein Wildtier vor ein Fahrzeug auf die Straße springt. Dieses Ereignis setzt sich damit aus der Summe momentaner Umstände, die dazu führen, zusammen. Das Ereignis „*Wildtier springt vor Fahrzeug auf die Straße*“ ist durch Dynamik und Veränderung gekennzeichnet, was bewirkt, dass sich das Handlungsumfeld des Betrachters (hier Anwender bzw. Fahrer des Fahrzeugs) verändert. Über die Initiierung oder Beeinflussung einer Produktfunktion durch die Umwelt (bspw. Wildtier) hinaus, kann ebenso u.a. der Kunde, Anwender oder Anbieter sowie das Produkt selbst (bspw. über künstliche Intelligenz, vgl. u.a. Dumitrescu, Drewel & Falkowski (2020)) Produktfunktionen initiieren oder beeinflussen. Der Kunde oder Anwender kann so zum Beispiel über Interaktion mit Bedienschnittstellen eines Fahrzeugs direkten Einfluss auf Produktfunktionen nehmen (vgl. DIN EN ISO 9241-210:2020-03). In Zukunft werden Anbieter zudem vermehrt Produktfunktionen aus der Ferne (*engl. remote*) bedienen und bspw. Aktualisierungen von Produktfunktionen (*engl. Update*) „*over-the-air*“ auslösen (Weissler, 2018). Die Ergebnisse (bspw. „*Fahrzeug führt Notbremsung vor Zusammenstoß mit Wildtieren aus*“), die eine Produktfunktion hervorruft, können ebenso als resultierende, beobachtbare Situationen (Ereignis) verstanden werden und realisieren das Produktverhalten.

Kunde und Anwender können das Produktverhalten anhand der Ausprägung von (Produkt-)Eigenschaften (bspw. „*Aktive Fahrzeugsicherheit*“) im Sinne eines Erlebnisses wahrnehmen. An dieser Stelle besteht die Möglichkeit, dem Kunden oder Anwender das im Produktverhalten realisierte Ergebnis mittels einer Mensch-Maschine-Schnittstelle visuell, auditiv, taktil (oder sogar olfaktorisch bzw. gustatorisch) über die Sinnesorgane zu signalisieren (bspw. angezeigte Warnhinweise, Warntöne oder Lenkrad-Vibrationen). Die Wahrnehmung der Eigenschaften kann folglich individuell interpretiert werden und stellt eine bewusst gewordene Erkenntnis (ggf. Erfahrung) der erlebten Situation dar, die Kunde und Anwender intersubjektiv kommunizieren können (in Anlehnung an Tsvasman (2006)). Ein wahrgenommenes Erlebnis kann somit Begeisterung, Zufriedenheit oder Unzufriedenheit hervorrufen (Kano, Seraku, Takahashi et al., 1984). Die Wahrnehmung der (Produkt-)Eigenschaften über die Sinnesorgane (Schmitt, 2014) wird daher durch die *individuelle Psychologie*⁶⁸ und *Physiologie*⁶⁹ von

⁶⁸ Die *Psychologie* bezeichnet nach Dudenredaktion (n.d.c) die „*bewussten und unbewussten [...] Vorgänge vom Erleben und Verhalten des Menschen*“.

⁶⁹ Die *Physiologie* bezeichnet nach Dudenredaktion (n.d.b) die [insbesondere biophysikalischen] Lebensvorgänge bzw. „*funktionellen Vorgänge im Organismus*“.

Kunde bzw. Anwender bestimmt (bspw. unterschiedliche, individuelle auditive Wahrnehmung von Warntönen im Fahrzeug). Erleben zwei Anwender (bzw. Fahrer) eines Fahrzeugs hypothetisch exakt die gleiche Beziehung zwischen oben genanntem, beispielhaftem Ereignis und Ergebnis der Produktfunktion „*Fahrzeug automatisch notbremsen*“, so kann sich deren Wahrnehmung dennoch drastisch unterscheiden. Gleiches gilt für die intersubjektive Kommunikation oder Diskussion der geschilderten Situation (ausgelöst durch „*Wildtier springt vor Fahrzeug auf die Straße*“). In diesem Zusammenhang lässt sich wiederum die Wechselbeziehung zwischen dem Verlauf bestimmter Manöver und der Auftrittswahrscheinlichkeit gewisser Phänomene zueinander erkennen (vgl. (Sub-)Systemklassierung und -wechselwirkung im Kontext der Noise Vibration Harshness Validierung von Fahrzeugen in Abschnitt 2.3.3.3 nach Geier, Stier, Düser et al. (2009)).

Auf Grundlage der Wahrnehmung formen Individuen unterbewusst und/oder bewusst (zukünftige) *Erwartungen* an die Ausprägung spezifischer (Produkt-)Eigenschaften. Die ausgebildeten, individuellen Erwartungen an (Produkt-)Eigenschaften und letztlich das Verhalten des Produkts wiederum determinieren das individuelle Verhalten. Das *individuelle Verhalten* von Kunde oder Anwender wird zudem durch die Umweltbedingung (bspw. „*Fahrbahnoberfläche ist erkennbar nass*“) oder den Kontext des Produktes selbst (bspw. erste Ausfahrt mit neuerworbenen, hochpreisigen Luxusfahrzeug) beeinflusst. Das Verhalten von Kunde oder Anwender führt in der *Interaktion* mit dem Produkt (bspw. über Bedienschnittstellen wie Fensterheber, Touchscreen oder Gestenerkennung) zur Initiierung oder Beeinflussung durch die von Kunde bzw. Anwender ausgelösten Ereignisse. Das Spektrum aus Wahrnehmung, Erwartung und Verhalten kann nach DIN EN ISO 9241-210:2020-03 als *User-Experience* bezeichnet werden.

Die *inhärenten Zustände* einer Produktfunktion können im Kontext der Abfolge einzelner Ereignisse (i.S.v. Use-Case, User-Journey, etc.) verstanden werden, die jedoch unabhängig davon sind, auf welchem Weg die Produktfunktion in den aktuellen Zustand aus Sicht des Betrachters (u.a. Kunde/Anwender und/oder Anbieter) gelangt ist. Im erläuterten Beispiel der „*Wildtier-Notbremsung*“ kann dieser aktuelle Zustand beispielsweise im Kontext der User-Journey „*sonntags Brötchen beim Bäcker besorgen*“ als Teil der Abfolge von Zuständen bei der Fahrt durch den Wald auftreten. Der Zustand „*Wildtier-Notbremsung*“ ist im Kontext der Produktfunktion unabhängig anderer voriger oder nachfolgender Zustände zu betrachten. Es ist irrelevant, auf welchem Weg der Zustand aus Sicht des Betrachters (Kunde oder Anwender) eingetreten ist. Die inhärenten Zustände einer Produktfunktion können diese demnach *initiieren*, *pau-sieren* oder *beenden* (vgl. Abbildung 5.12, Abschnitt 2.3.3.3 bzw. Geier, Stier, Düser et al. (2009)).

Die *Ausprägung einer Produktfunktion* kann analog zu einer Funktion durch den Produktentwickelnden entweder als „*Vorhaben*“ festgelegt (gewünschte/beabsichtigte

Produktfunktion) werden oder ergibt sich emergent aus den Fraktalen weiterer (Produkt-)Funktionen (unerwünschte/unbeabsichtigte Produktfunktion). Aus diesem Grund können Produktfunktionen auf unterschiedlichen Systemebenen im generischen Referenz-Produktmodell im Modell der PGE wirken. In diesem Zusammenhang berücksichtigt das Modell folglich ebenso Ereignisse, die niemals eine Produktfunktion auslösen sollten. Diese *unerwünschten/unbeabsichtigten Ereignisse* müssen durch den Produktentwickelnden berücksichtigt werden, um möglichen *unerwünschten/unbeabsichtigten Produktfunktionen* (bzw. Fehl-Produktfunktionen) zu vermeiden, um einer Unzufriedenheit von Kunde oder Anwender vorzubeugen. Ein Beispiel hierfür ist die umweltbedingte Verschmutzung eines Radarsensors, der die Produktfunktion *"Fahrzeug automatisch notbremsen"* fälschlicherweise auslösen könnte. Gleichermaßen werden Ergebnisse modelliert, die vom Kunden, Anwender oder Anbieter nicht erwünscht oder beabsichtigt sind (bspw. *"Fahrzeug führt Notbremsung irrtümlich für Strohballen in Gestalt eines Wildtieres aus"*). Die Vernetzung von Produktfunktionen (Kunde-, Anwender-, Anbietersicht) und technischen Funktionen (Produktentwickelnden-Sicht) erfolgt anhand der Verknüpfung von Wirkdiagrammen (vgl. Abschnitt 4.4.4) und der C&C²-Analyse (vgl. Abschnitt 2.1.3.4). Dies wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt, sondern auf Abschnitt 5.3.4.3 verwiesen.

Produktfunktionen bzw. die Zusammenhänge im Modell einer Produktfunktion können in einer Vielzahl von geeigneten Software-Werkzeugen (bspw. Microsoft PowerBI) modelliert werden, besonders eignet sich dafür Model-Based-Systems-Engineering (z.B. No Magic Cameo Systems Modeler, vgl. Abschnitt 2.1.4.1). In Abschnitt 5.3.4.3 wird die Modellierung von Produktfunktionen im Kontext des Referenzprozesses zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE erörtert. Darüber hinaus findet sich ein Anwendungsbeispiel in der Evaluation (Deskriptive Studie II) – siehe Abschnitt 6.2.4. (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

5.1.6 Zwischenfazit

Das entwickelte Verständnis und Abbildung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE beantwortet die Forschungsfrage 1.4 (vgl. Abschnitt 3.1.3) und setzt die Anforderungen 1 bis 6 (vgl. Abbildung 4.29) an die Präskriptive Studie um. Die Ergebnisse daraus – in Bezug zu den Abstraktionsgraden der Produktmodellierung (vgl. Abbildung 5.1) – sind zunächst einmal sowohl eine Sprache i.S.v. Typen von Referenzsystem-Elementen (RSE), Mengenverständnis und generischem Variationsoperator im Modell der PGE als auch ein grundlegendes, generisches Referenz-Produktmodell. Darüber hinaus wurde über Individualisierung eine System-spezifische Sprache über das Funktionsverständnis und abgeleitete Variationsarten von Funktionen sowie ein System-Spezifisches Modell (Produktfunktions-Modell) deduziert.

5.2 Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration

In diesem Abschnitt wird das grundlegende Referenz-Produktmodell (vgl. Abschnitt 5.1.4) durch Verknüpfung mit Ziel-, Handlungs- und Objektsystem, Referenzsystem sowie den zentralen Entwicklungsaktivitäten im erweiterten ZHO-Modell ergänzt. Dieser Abschnitt soll folglich folgende Forschungsfrage beantworten:

FF2.3 Wie lassen sich diese Informationen und Zusammenhänge in einem generischen Referenz-Produktmodell abbilden und Aktivitäten daraus ableiten?

Die Abstraktionsgrade der Produktmodellierung nach Albers, Matthiesen, Bursac et al. (2014) werden in einem systemtheoretischen Ansatz nach ihrem Individualisierungs- und Instanziierungsgrad kategorisiert. Abbildung 5.1 in Abschnitt 5.1 veranschaulicht das sich daraus ergebende Framework (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). In Abschnitt 5.2.1 werden sowohl Ziel-, Handlungs- und Objektsystem als auch das Referenzsystem mit dem *generischen Referenz-Produktmodell* (vgl. Abschnitt 5.1.4) verknüpft (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020), das über Instanziierung als Vorlage für die Modellierung spezifischer Produktinstanzen dienen kann. Die Erkenntnisse dazu stammen aus vergangenen Produktentwicklungsprozessen. Ziel ist es, die Übertragbarkeit auf jeden neuen Entwicklungsprozess sicherzustellen. Das generische Referenz-Produktmodell soll zum Spezifizieren komplexer Produkte dienen und ist daher in seinem Individualisierungsgrad nicht auf eine einzige Domäne beschränkt. Abschließend werden die zentralen Entwicklungsaktivitäten des erweiterten ZHO-Modells im Kontext des generischen Referenz-Produktmodells erörtert (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Die in Abschnitt 5.2 dargestellten Modelle und Methoden sind im Rahmen der Publikation Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vgl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden zudem teilweise in vom Autor bzw. Tobias Hirschter Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Endl (2019)⁷⁰ und Wöhrle (2020)⁷¹ am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers durchgeführt.

⁷⁰ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

⁷¹ Unveröffentlichte, von Tobias Hirschter Co-betreute Masterarbeit.

5.2.1 Verknüpfung von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem sowie Referenzsystem im generischen Referenz-Produktmodell

Als erster Schritt zur Weiterentwicklung des grundlegenden Referenz-Produktmodells aus Abschnitt 5.1.4 wird der von Albers, Ebel & Lohmeyer (2012) eingeführte **erweiterte Systemtripel-Ansatz** (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) mit den vorgestellten Systemsichten und -ebenen im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.1.4) verknüpft (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020). Innerhalb des Ziel-, Handlungs- und Objektsystems können demnach die verschiedenen Sichten und Ebenen betrachtet werden, um Informationsfragmente, Aktivitäten und andere Artefakte systematisch miteinander zu verbinden. Das *Zielsystem* umfasst alle relevanten Ziele, ihre Wechselwirkungen und Randbedingungen sowie deren Herkunft (Albers, Meyer-Schwickerath & Siebe, 2013). Ziele stellen u.a. Zieleigenschaften und -bedingungen des zu entwickelnden Produkts dar und beschreiben das Produkt vor allem lösungsoffen, wengleich lösungsspezifische Elemente bereits vorgegeben sein können (Albers & Braun, 2011a). Während des gesamten Entwicklungsprozesses wird das Zielsystem kontinuierlich erweitert und konkretisiert (Gausemeier, Lindemann, Reinhart et al., 2000). Das *Objektsystem* umfasst dagegen Ergebnisse der Produktentwicklung, wie bspw. Prototypen, Simulationsmodelle oder Skizzen. Nach der Fertigstellung enthält das Objektsystem ebenso das *beabsichtigte Produkt*. Das *Handlungssystem* als dazwischenliegendes, sozio-technisches System erstellt und verbindet sowohl Ziel- als auch Objektsystem. Darüber hinaus enthält das Handlungssystem alle Aktivitäten und Ressourcen, die zur Produktentstehung notwendig bzw. im Gebrauch sind.

Im nächsten Schritt wird das neue, generische Referenz-Produktmodell um das **Referenzsystem R_n** (vgl. Abschnitt 2.2.3) erweitert, das als Grundlage für die Entwicklung einer betrachteten Produktgeneration G_n dient (vgl. Abbildung 5.13, Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020)).

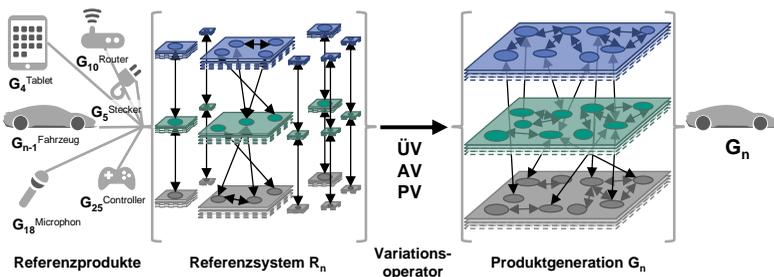


Abbildung 5.13: Verknüpfung des Verständnisses des Referenzsystems im Modell der PGE mit dem generischen Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2021, S. 872)

Die Übertragung von Elementen von R_n auf G_n erfolgt über die zuvor diskutierte Übernahme- und Neuentwicklung einer Produktgeneration über den *generischen Variationoperator* bestehend aus Übernahme- (ÜV), Ausprägungs- (AV) und Prinzipvariation (PV) (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Abbildung 5.14 veranschaulicht die prinzipiellen Zusammenhänge von Referenzsystem R_n und Produktgeneration G_n im Kontext des erweiterten ZHO-Modells. Das Referenzsystem folgt der gleichen Struktur des Systemtripels wie die neue Produktgeneration, da seine Inhalte gleichermaßen als Ziele, Objekte oder Handlungen charakterisiert werden können (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020).

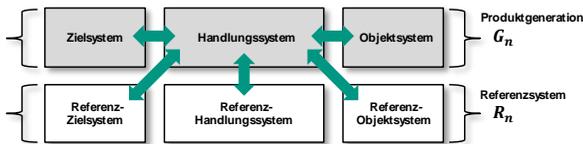


Abbildung 5.14: Zusammenhänge zwischen der Produktgeneration G_n und dem Referenzsystem R_n im Systemtripel (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 9)

In einem exemplarischen, automobilien Kontext werden neben der Definition von Zielsystem-Elementen ebenso bspw. Information über Verkaufspreis oder Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge von konkurrierenden Anbietern analysiert oder teilweise in einer Art „Referenz-Zielsystem“ rekonstruiert. Gleichermäßen stammt bspw. eine bestimmte Art Scheibenbremse eines Fahrzeugs in dessen Objektsystem aus dem Referenzsystem (aus vorigen Produktgenerationen i.S.v. „Referenz-Objektsystem“). Das Handlungssystem innerhalb von G_n ist von besonderer Bedeutung hinsichtlich der Wechselbeziehungen mit dem Referenzsystem. Einerseits enthält das Handlungssystem die notwendigen Ressourcen, Methoden und das Wissen, um Elemente aus dem Referenzsystem auszuwählen und zu variieren, und die darin enthaltenen Kompetenzen dienen der Bewertung der Variation zwischen R_n und G_n (vgl. Abbildung 5.14). Andererseits stammen die Inhalte des Handlungssystems aus der Variation von Elementen innerhalb des Referenzsystems und basieren auf diesen. Das Referenzsystem enthält dabei ebenso bspw. die organisatorische Projektstruktur eines konkurrierenden Anbieters oder das Entwicklungsteam der vorherigen Generation (i.S.v. „Referenz-Handlungssystem“). Da Referenz-Zielsystem, -Objektsystem und -Handlungssystem formal rekonstruiert werden können, sind sie aus diesem Grund kein Gegenstand von Veränderungen über den Entwicklungsprozess der Produktgeneration G_n mehr. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

5.2.2 Zentrale Entwicklungsaktivitäten des erweiterten ZHO-Modells im generischen Referenz-Produktmodell

Aus der Verknüpfung der Systemsichten und -ebenen, des erweiterten Systemtripels und des Referenzsystems lässt sich das neue, generische Referenz-Produktmodell nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) ableiten (vgl. Abbildung 5.15). Im Folgenden werden die **zentralen Entwicklungsaktivitäten des erweiterten ZHO-Modells** beschrieben, die zur Verbindung der verschiedenen Segmente des neuen Modells miteinander interagieren. Da zumeist unterschiedliche Domänen und Disziplinen an der Produktentwicklung beteiligt sind, müssen die mentalen Modelle der Produktentwickelnden unter Umständen möglichst angeglichen werden. Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Systemsichten (*Eigenschafts-, Funktions- und physische Sicht*) und deren Systemebenen (*Supersystem(e), System und Subsystem(e)*) im generischen Referenz-Produktmodell unterstützt ein einheitliches *Sprach- bzw. Systemverständnis* (vgl. Abbildung 5.1). Bei sehr konkreten Fragestellungen auf Subsystem-Ebenen ist es notwendig, die verschiedenen Systemsichten und -ebenen integriert zu betrachten, um ihren Beitrag zum Nutzen der Stakeholder im Gesamtkontext zu berücksichtigen. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

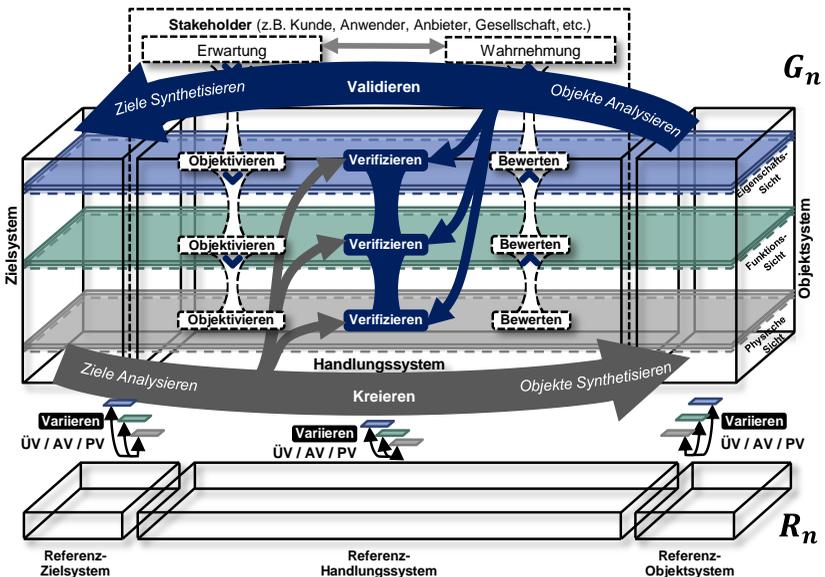


Abbildung 5.15: Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration im Modell der PGE (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020, S. 10)

Die detaillierte Erörterung von *Objektanalyse*, *Zielsynthese*, *Zielanalyse* und *Objektsynthese* sowie deren Bezug zur *Validierung* und *Kreation* im generischen Referenz-Produktmodell finden sich in Anhang D.2 sowie der Publikation Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020). Darüber hinaus wird der Zusammenhang der zentralen Entwicklungsaktivitäten anhand der Entwicklung einer Produktfunktion der Fahrzeugaerodynamik im Rahmen der Evaluation in Abschnitt 6.2.3 ausgeführt.

5.2.3 Zwischenfazit

Die Beantwortung der Forschungsfrage 2.3 (vgl. Abschnitt 3.1.3) setzt die Anforderungen 7 bis 10 (vgl. Abbildung 4.29) an die Präskriptive Studie um. In diesem Abschnitt wurde im Sinne der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung (vgl. Abbildung 5.1) ein generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte synthetisiert.

5.3 Referenzprozess und methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen der automobilen Produktentwicklung

Mit dem Ziel, den Produktentwickelnden beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen der automobilen Produktentwicklung prozessual und methodisch zu unterstützen, wird in diesem Abschnitt zunächst auf die Abstraktionsgrade und Nomenklatur des Produktportfolios im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS eingegangen. Anschließend werden die vier Phasen des Referenzprozesses und die zugehörige methodische Unterstützung vorgestellt. Zum Abschluss wird der Referenzprozess im iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell modelliert. In diesem Abschnitt soll daher die folgende Forschungsfrage behandelt werden:

FF3.5 Wie lässt sich ein Vorgehen zum Spezifizieren aus Funktionssicht im Modell der PGE abbilden und methodisch für den Produktentwickelnden unterstützen?

Die Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung kategorisieren Albers & Muschik (2010) in einem systemtheoretischen Ansatz nach ihrem Individualisierungs- und Instanziierungsgrad. Abbildung 5.16 veranschaulicht das sich daraus ergebende Framework (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) und setzt es in Bezug zu diesem Abschnitt.

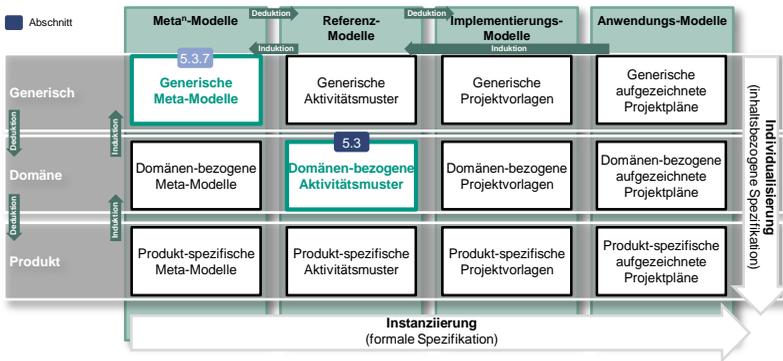


Abbildung 5.16: Framework der Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung Albers & Muschik (2010, S. 6) in Bezug zu Abschnitt 5.3

Das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) eignet sich als Meta-Modell, um die Informationen aus der Entwicklung vorheriger Produktgenerationen in einen Referenzprozess zu deduzieren. In den Abschnitten 5.3.2 bis 5.3.6 wird der Referenzprozess und die methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen der automobilen Produktentwicklung detailliert, d.h. in diesem Fall wird ein *Domänen-bezogenes Aktivitätsmuster* beschrieben. In Abschnitt 5.3.7 wird der entwickelte Referenzprozess durch Induktion im *Meta-Modell* des iPeM modelliert.

Die in Abschnitt 5.3 dargestellten Modelle und Methoden sind im Rahmen der Publikationen Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020), Fahl, Hirschter & Albers (2021), Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) und Fahl, Hirschter, Kamp et al. (2019) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vsl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden zudem teilweise in vom Autor Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Endl (2019)⁷² und Staiger (2020)⁷² am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers und Kamp (2019)⁷² am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt.

⁷² Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

5.3.1 Abstraktionsgrade und Nomenklatur des Produktportfolios im Modell der PGE

Die teilnehmende Beobachtung in der automobilen Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 4.2) hat gezeigt, dass verschiedene Abstraktionsgrade von Produkten (oder Funktionen) innerhalb der Organisationsstrukturen eines Anbieters unterschiedlichen Nutzen für verschiedene Produktentwickelnde oder Problemlösungsteams generieren (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019). Insbesondere zum Abschluss der Produktspezifikation in der Frühen Phase, müssen die erzeugten Artefakte der bewerteten, technischen Lösung akkurat und im Kontext ihres jeweiligen Abstraktionsgrads in die Realisierungsphase transferiert werden (Walch, 2017). Daher werden im Folgenden zunächst die drei **Abstraktionsgrade** von *Produktportfolio*, *Produktlinie* und *Produktvariante* entsprechend Abbildung 5.17 (vgl. Fahl, Hirschter, Kamp et al. (2019)) als Ergänzung zum Verständnis der Produktgeneration im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 2.2) definiert. Dies soll als Grundlage und Basis für ein einheitliches Verständnis in Bezug auf den Referenzprozess fungieren und wird im zweiten Teil dieses Abschnitts um die zugehörige **Nomenklatur des Produktportfolios** nach Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020) im Modell der PGE ergänzt.

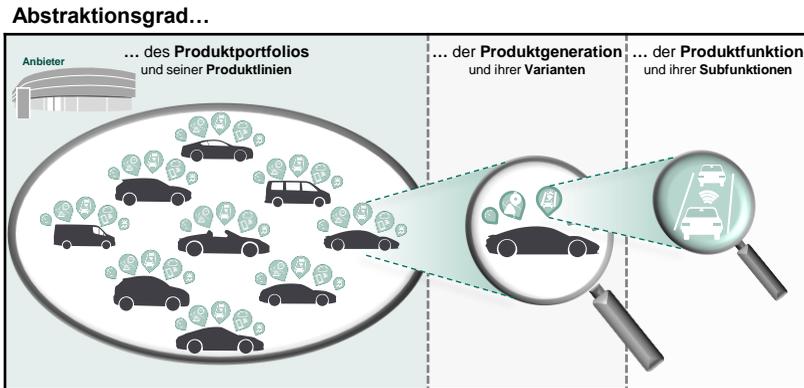


Abbildung 5.17: Verständnis des Produktportfolios im Modell der PGE am Beispiel der Abstraktionsgrade von Funktionen (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019, S. 6)

Definition 9: Produktportfolio im Modell der PGE (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019, S. 5)

Ein **Produktportfolio** eines *Anbieters* ist ein *Portfolio*, das die Menge, der am Markt eingeführten und in der Entwicklung befindlichen *Varianten der Produktgenerationen* aller *Produktlinien* eines *Anbieters* beschreibt. Ein Produktportfolio wird einerseits durch seine *Breite* (bspw. Anzahl unterschiedlicher Produktlinien), andererseits durch seine *Tiefe* (bspw. Anzahl Varianten der Produktgenerationen) definiert.

Das **Produktportfolio** (vgl. Definition 9) eines *Anbieters* setzt sich aus der Menge aller am Markt eingeführten (*Marktsicht*) und in der Entwicklung befindlichen (*Entwicklungssicht*) Produktgenerationen (bspw. siebte Generation des Porsche 911 (Typ 991), zweite Generation des Porsche Panamera (Typ 971), usw.) zusammen. Dazu zählen ebenso alle *Varianten dieser Produktgenerationen*. Anbieter müssen ihr Produktportfolio kontinuierlich unter strategischen Gesichtspunkten überprüfen. Insbesondere das Urteil darüber, welche Produktlinien in Zukunft in welcher *Breite* und *Tiefe* auf dem Markt angeboten werden sollen, ist entscheidend (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019). Da die Produktentwicklungszyklen, insbesondere in der Automobilentwicklung, sehr lang sind, basieren viele dieser Entscheidungen auf Prognosen, Szenarien oder Hypothesen.

Definition 10: Produktlinie im Modell der PGE (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019, S. 5)

Eine **Produktlinie** ist eine *Gruppe technischer Produkte* des *Produktportfolios*, die jeweils eine zusammenhängende Menge von *konsekutiven Produktgenerationen* beschreibt. Produktgenerationen innerhalb einer Produktlinie können sich auf den *gleichen Produkttyp* beziehen, an den *gleichen Kunden-/Anwendertypus* gerichtet sein bzw. über *ähnliche Absatzkanäle* vertrieben werden oder sich alle *innerhalb einer bestimmten Preisspanne* bewegen.

Die **Produktlinie** (vgl. Definition 10) – als *Teil des Produktportfolios* – umfasst jeweils alle *zusammenhängenden und aufeinanderfolgenden Produktgenerationen* (bspw. Porsche 911 Urmodell, G-Modell, Typ 964, ..., bis zum aktuellen Typ 992). Im Rahmen der Entwicklung von *Produktprofilen* werden neue Fahrzeuggenerationen z.B. auf der Basis eines *Eigenschaftsprofils* (vgl. Abschnitt 2.2.5) definiert und von anderen Produktlinien, aber auch von dem Wettbewerb, differenziert beschrieben. Der Anbieter vergleicht diese Produktprofile aller Produktlinien kontinuierlich. Die Produktprofile der Produktgenerationen verschiedener Produktlinien können und sollten sich überschneiden, müssen aber für den Kunden bzw. Anwender voneinander abgegrenzt werden,

um eine *interne Kannibalisierung* der Produkte zu vermeiden. Das bedeutet, dass viele Produkte eines Unternehmens bspw. Funktionen (z.B. Fahrerassistenz-, Fahrdynamik- oder Sicherheits-Produktfunktionen) gemeinsam haben, was einerseits den Wiedererkennungswert oder Alleinstellungsmerkmal eines Anbieters am Markt erhöht, andererseits Synergien in der Produktentwicklung fördert und damit letztlich Entwicklungsaufwand und -kosten spart. Auf der Ebene des Produktportfolios bzw. der Produktlinien besteht somit ein Spagat zwischen Differenzierung in Verbindung mit unterschiedlichen Ausprägungen des Kunden/Anwender- und Anbieternutzens sowie Umsetzung eines funktionalen Wiedererkennungswertes (z.B. einheitliches funktionales Fahrerlebnis). Aufgrund der großen Auswirkungen von Entscheidungen ist der betrachtete, strategische Zeithorizont sehr groß – in einigen Fällen bis zu 10-15 Jahren. Darüber hinaus finden sich bspw. in der automobilen Produktentwicklung unter Umständen mehrere Produktgenerationen $G_n, G_{n+1}, G_{n+2}, \dots$ gleichzeitig in der Entwicklung. Die Erörterung und Definition des Abstraktionsgrades einer *Produktvariante* im Modell der PGE findet sich in Anhang D.3.1 und basiert auf Peglow, Powelske, Birk et al. (2017) sowie Peglow (2021).

In einem nächsten Schritt werden – basierend auf den eingeführten Definitionen – die fragmentierten Darstellungen der Menge an relevanten Begriffen sowie deren Beziehungen in einer **Nomenklatur** formal geordnet, um die Bezüge im Modell der PGE genauer spezifizieren zu können. Das vorausgehende Abstraktionsverständnis von *Produktportfolio* (und den einzelnen *Produktlinien*) sowie *Produktgeneration* (und den einzelnen *Produktvarianten*) wird übertragen, um verschiedene Produkt- bzw. Entwicklungsgenerationen voneinander unterscheiden zu können. Die Nomenklatur im PGE-Modell kann nach Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020) wie folgt beschrieben werden (vgl. Formel 10):

Produktgeneration $G_i^{k,u,a,p,v}$

10

für Generationen $i \in \mathbb{N}$

und die optionalen Strings k, u, a, p, v :

Kunden $k \in \{k_1, \dots, k_h\}$,

Anwender $u \in \{u_1, \dots, u_l\}$,

Anbieter $a \in \{a_1, \dots, a_m\}$,

Produktlinien $p \in \{p_1, \dots, p_q\}$,

und **Produktvarianten** $v \in \{v_1, \dots, v_r\}$

wobei $h, l, m, q, r \in \mathbb{N}$.

Besondere Produktgenerationen:

$G_1^{k,u,a,p,v}$: Erste Produktgeneration G eines neuen Produktes für Kunden k bzw. Anwender u des Anbieters a der Produktlinie p mit ihren Varianten v (am Markt). Die erste Produktgeneration G_1 hat keinen direkten Vorgänger.

$G_n^{k,u,a,p,v}$: Produktgeneration G für Kunden k bzw. Anwender u des Anbieters a der Produktlinie p mit ihren Varianten v in der Entwicklung, die als nächstes in den Markt eingeführt wird (heutiger Zeitpunkt).

$G_{n-1}^{k,u,a,p,v}$: Aktuelle Produktgeneration G für Kunden k bzw. Anwender u des Anbieters a der Produktlinie p mit ihren Varianten v im Markt

$G_{n+1}^{k,u,a,p,v}$: Produktgeneration G für Kunden k bzw. Anwender u des Anbieters a der Produktlinie p mit ihren Varianten v in der Entwicklung, die als übernächstes in den Markt eingeführt wird (heutiger Zeitpunkt).

Analog dazu kann die Nomenklatur folgendermaßen auf das *Referenzsystem* (vgl. Formel 11) und *Entwicklungsgenerationen* (vgl. Formel 12) transferiert werden:

Referenzsystem $R_{i,\dots}^{k,u,a,p,v}$ 11

Entwicklungsgenerationen $R_{i,j,\dots}^{k,u,a,p,v}$ 12

jeweils für Generationen $i, j, \dots \in \mathbb{N}$

und die optionalen Strings k, u, a, p, v :

Kunden $k \in \{k_1, \dots, k_n\}$,

Anwender $u \in \{u_1, \dots, u_l\}$,

Anbieter $a \in \{a_1, \dots, a_m\}$,

Produktlinien $p \in \{p_1, \dots, p_q\}$,

und Produktvarianten $v \in \{v_1, \dots, v_r\}$

wobei $h, l, m, q, r \in \mathbb{N}$.

Die optionalen Parameter für Kunden k und Anwender u werden in den folgenden Kapiteln dieser Forschungsarbeit zur Reduzierung der Komplexität und zur Erhöhung der Verständlichkeit bzw. Lesbarkeit nicht weiter aufgeführt. Eine Beschreibung einer Produktgeneration durch alle Parameter ist aber dennoch möglich. Abbildung 5.18 zeigt anhand des Beispiels eines Automobilherstellers (OEM) diese „vereinfachte“ Nomenklatur im Modell der PGE, die für diese Forschungsarbeit relevant ist. In diesem

Beispiel werden folglich die einzelnen Kunden und einzelnen Anwender (der Produktvarianten) der Produktgenerationen nicht weiter differenziert. In der Abbildung sind zwei Produktlinien p_1 und p_2 eines Anbieters dargestellt, die wiederum kohärente Produktgenerationen darstellen. Nachfolgend sind zudem die Entwicklungsgenerationen der Produktlinie p_1 schematisch dargestellt.

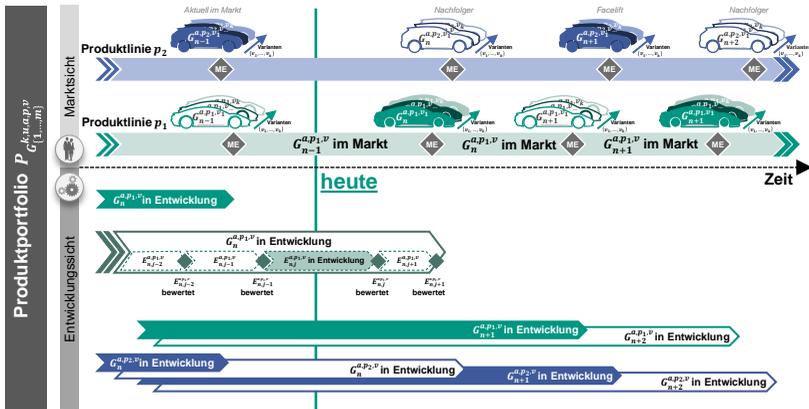


Abbildung 5.18: Nomenklatur im Modell der PGE am Beispiel eines Automobilherstellers (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 671)

5.3.2 Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen

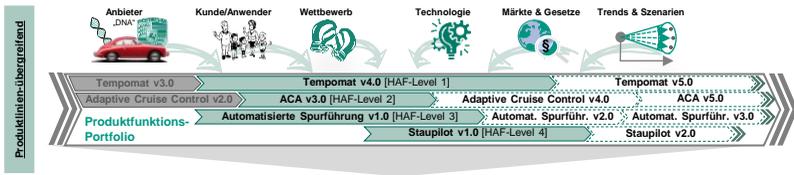
Im Hinblick auf den übergreifenden Einsatz im Produktportfolio bzw. in mehreren Produktlinien eines Anbieters müssen die im vorangehenden Abschnitt vorgestellten Abstraktionsgrade des Produktportfolios beim funktionalen Spezifizieren, differenziert werden (vgl. Abbildung 5.17). Das Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren einer Produktfunktion muss folglich die Anforderungen mehrere Produktlinien sowie deren Produktgenerationen und ggf. Produktvarianten berücksichtigen, gegeneinander abwägen und konsolidieren. Hierbei kann demzufolge zwischen einem *Produktlinien-übergreifenden*, *Produktgenerations-*, *Produktvarianten-*⁷³ und *Produktfunktions-spezifischen Spezifizieren* unterschieden werden, die im Folgenden kurz erläutert werden.

⁷³ Anmerkung: Das *Produktvarianten-spezifische Spezifizieren* (einer Produktfunktion) wird zur Vereinfachung im Folgenden nicht weiter betrachtet, da es gemäß den Aktivitäten der Produktgenerations-spezifischen Spezifikation nur zusätzlich zwischen den einzelnen Varianten einer Produktgeneration differenziert.

5.3.2.1 Produktlinien-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen

Das **Produktlinien-übergreifende Spezifizieren von Produktfunktionen** im Modell der PGE dient der *Markteinführung*, *Weiterentwicklung* oder *Stilllegung* einer Produktfunktion *in mehreren Produktlinien eines Anbieters* (vgl. Abbildung 5.19).

Weiterführende Erläuterungen zu u.a. Auslösern im Rahmen des *Produktlinien-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen* finden sich in Anhang D.3.2 sowie der Publikation Fahl, Hirschter & Albers (2021).



Drei relevante Fälle:



Abbildung 5.19: Fallunterscheidung beim Produktlinien-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 673; Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 6)⁷⁴

Auf Ebene der Produktlinien sollen durch übergreifende Definition eines Produktfunktions-Portfolios Synergien von bspw. Technologie, physischen Elementen (Hardware/Software), E/E-Architektur und Backend (i.S.v. Systems-of-Systems) verwirklicht werden. Dazu ist ein von spezifischen Produktgenerationen entkoppelter, übergreifender „*Funktionsentwicklungsprozess*“ notwendig. Die funktionale Spezifikation in der Frühen Phase verfolgt dabei einen inkrementellen und kontinuierlichen Ansatz. In der Phase der Generierung und der Findung von Ideen für Produktfunktionen müssen die Anforderungen auf hoher Abstraktionsebene (bspw. über Produkteigenschaften) kontinuierlich mit bspw. Vertrieb oder Anbieterstrategie konsolidiert und im Projektmanagement abgestimmt werden. Im Zuge der *funktionalen Portfoliobildung* können so

⁷⁴ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Funktionsideen priorisiert werden. Es folgt die Detaillierung konkreter Anwendungsfälle (Use-Cases) aus Kunden- und/oder Anwendersicht, die Ermittlung möglicher Lösungsansätze aus Techniksicht bzw. Spezifikation funktionaler Wirkketten und schrittweise Realisierung der Produktfunktion. In mehreren Produktgenerationsentwicklungen können dabei inkrementelle Lieferumfänge über Entwicklungsgenerationen realisiert werden, um so eine bereits spezifizierte Produktfunktion kontinuierlich bis zur Markteinführung und darüber hinaus zu validieren. Weiterhin können Produktfunktionen, die bereits am Markt eingeführt wurden, durch *gezielte Variation in Generationen weiterentwickelt* werden, um so durch Variation der funktionalen Ausprägung neue Produkteigenschaften (i.S.v. Ausprägungs- und Prinzipvariation von Eigenschaften) für Kunde bzw. Anwender zu realisieren. Zum Schluss kann eine Produktfunktion oder eine oder mehrere spezifische Generationen einer Produktfunktion vom Anbieter ebenso vom Markt genommen bzw. *stillgelegt* werden. Der *Funktionslebenszyklus* wird damit beendet. Diese drei relevanten Fälle sind in Abbildung 5.19 dargestellt. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

5.3.2.2 Produktgenerations-spezifisches Spezifizieren des funktionalen Produktkonzeptes einer Produktgeneration

Das **Produktgenerations-spezifische, funktionale Spezifizieren** mündet in dem *funktionalen Produktkonzept* (vgl. Definition 8 in Abschnitt 5.1.5.1) einer Produktgeneration (vgl. Abbildung 5.20, Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020)).

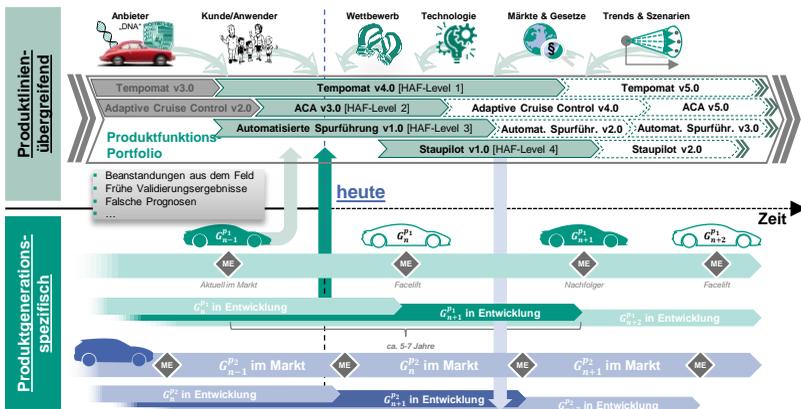


Abbildung 5.20: Auslöser des Spezifizierens von Produktfunktionen und Produktgenerations-spezifisches Spezifizieren von funktionalen Produktkonzepten (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 673)⁷⁵

⁷⁵ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Auf Basis des *Produktfunktions-Portfolios* können in der Frühen Phase einer Produktgeneration G_n die Produktfunktionen im Abgleich zum Produktprofil abgeleitet werden, die in einer spezifischen Produktgeneration umgesetzt werden sollen. Die Spezifikation funktionaler Produktkonzepte ist Bestandteil der *Produktspezifikation* und beschreibt einen lösungsoffenen Vorschlag zur Erfüllung von Anforderungen und Zielen einer Produktgeneration aus der Funktionssicht über die wechselwirkende Menge der Produktfunktionen (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019). Die spezifische Produktgenerationsentwicklung muss dabei in der Frühen Phase kontinuierlich die Verbindung von *Produktlinien-übergreifender Funktionsentwicklung* und den eigenen, *Produktgenerations-spezifischen Anforderungen* an Produktfunktionen sicherstellen. In der Praxis müssen dafür Beauftragung und Abnahme von Lieferumfängen gemäß vereinbartem Lasten- und Pflichtenheft (vgl. Abschnitt 4.2.3) sowie der Realisierung bzw. *funktionalen Planung über Entwicklungsgenerationen* (Albers, Haug, Heitger et al., 2019) gesteuert werden. Das Herunterbrechen von Anforderungen zur Erfüllung der geforderten Produkteigenschaften sowie Sicherstellung der Berücksichtigung, Umsetzung und Verfügbarkeit funktionsrealisierender, physischer Elemente sowie E/E-Architektur und ggf. Elemente des System-of-Systems (bspw. Backend-Server für App-Umfänge, o.ä.) ist wesentlich (Albers, Heitger, Haug et al., 2018). Zudem kann im Projekt- und Auftragsmanagement eine Steuerung der funktionalen Produktgenerationsumfänge bzgl. interner oder externer Entwicklung erforderlich sein (vgl. Albers, Rapp, Birk et al. (2017)). In der Gesamtheit tragen die Spezifikation der funktionalen Produktkonzepte im Abgleich zum Produktfunktions-Portfolio zur *Optimierung der Variationen physischer Elemente* (Steigerung Anbieternutzen) bei und fördern die *kontinuierliche Validierung*. Ferner können frühe Validierungsergebnisse oder Beanstandungen aus dem Feld ein Auslöser für das Produktlinien-übergreifende Spezifizieren *neuer* oder *weiterentwickelter Produktfunktionen* sein (vgl. Abbildung 5.20).

5.3.2.3 Produktfunktions-spezifisches Spezifizieren

Das **Produktfunktions-spezifische Spezifizieren** hat eine explizite Produktfunktion zum Gegenstand, die vom Produktentwickelnden spezifiziert wird. Zu diesem Zweck wird die Produktfunktion in verschiedenen Dimensionen konkretisiert (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019). Ergänzende Beschreibungen u.a. der relevanten Bestandteile finden sich in Anhang D.3.3 sowie der Publikation Fahl, Hirschter & Albers (2021).

5.3.2.4 Übersicht der vier Phasen des Referenzprozesses

In Anlehnung an die Phasen des Produktlebenszyklus und der Produktentstehung der VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11) differenziert das *Produktlinien-übergreifende Spezifizieren von Produktfunktionen* die vier Phasen *Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n)* (Phase 1), *Spezifikation Produktfunktion* (Phase 2), *Realisierung Produktfunktion* (Phase 3) und *Stilllegung Produktfunktion* (Phase 4) (vgl. Abbildung 5.21). Das Vorgehen in den vier Phasen lässt sich jeweils als spezifische

Auslegung eines allgemeinen Problemlösungsprozesses begreifen und folgt daher in seiner grundlegenden Logik den Aktivitäten der SPALTEN-Problemlösungsmethodik (vgl. Abschnitt 2.1.3.1). (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

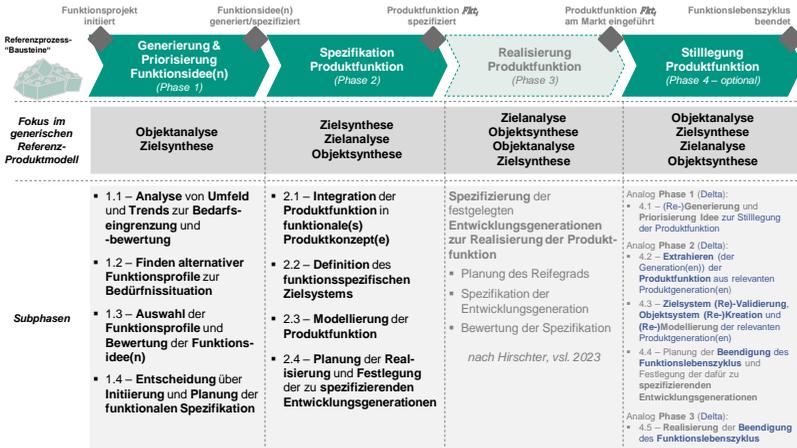


Abbildung 5.21: Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE (Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 7)

In den folgenden Abschnitten werden die vier Phasen des Referenzprozesses zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen in Generationen übergreifend beschrieben und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden erläutert. Die Detaillierung der Prozessschritte sowie Erläuterung der Methoden erfolgt aufgrund des Umfangs in Anhang D.3.4, D.3.5 sowie D.3.6. Der Referenzprozess kann bei der Anwendung in der Entwicklungspraxis als Ganzes oder nur in Teilen durchlaufen werden. Wiederholungen einzelner Phasen oder Subphasen sowie Iterationen sind explizit möglich.

5.3.3 Phase 1: Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n)

Die erste Phase im Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS wird durch die *Initiierung eines Funktionsprojektes* ausgelöst. Ein Anbieter entscheidet sich folglich aktiv dazu Ideen für neue Produktfunktionen generieren (und priorisieren) zu wollen. In der ersten Phase werden die vier Subphasen *Analyse von Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung (1.1)*, *Finden alternativer*

Funktionsprofile zur Bedürfnissituation (1.2), Auswahl der Funktionsprofile und Bewertung der Funktionsidee(n) (1.3) sowie Entscheidung über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation (1.4) durchlaufen (vgl. Abbildung 5.22). Im Zuge jeder der Subphasen werden die zugeordneten Aktivitäten der SPALTEN-Problemlösungsmethodik durchschritten. Zuletzt erfolgt jeweils ein Informationscheck und die Zusammensetzung des Problemlösungsteams wird ggf. für die nächste Subphase angepasst.



Abbildung 5.22: Phase 1: Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n)

Der Fokus im generischen Referenz-Produktmodell (vgl. Abschnitt 5.2) liegt in der ersten Phase auf der *Objektanalyse* sowie der *Zielsynthese*. Die Stakeholder-Wahrnehmung soll bewertet, Stakeholder-Erwartungen objektiviert und damit durch die Aktivität des Verifizierens die Wissensbasis im Handlungssystem erweitert werden. Auf Grundlage der Wissensbasis können Zielsystem-Elemente unter Berücksichtigung analysierter Objektsystem-Elemente und dem Referenzsystem anschließend synthetisiert werden. Das Endergebnis der ersten Phase sind generierte und priorisierte Funktionsidee(n). Die ausführliche Beschreibung dieser Phase findet sich in Anhang D.3.4.

5.3.3.1 Subphase 1.1: Analyse von Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung

Ausgelöst durch die Initiierung eines Funktionsprojektes verfolgt die erste Subphase 1.1 das Ziel, den Bedarf an neuen Produktfunktionen zu analysieren, einzugrenzen und zu bewerten (vgl. Abbildung 5.23). Dies geschieht unter der Berücksichtigung von Anbieterprämissen, Marktumfeld und auf Grundlage von Vorausschau bzw. Szenarien in Bezug zu Kunde und Anwender (oder weiteren Stakeholdern). In dieser Subphase werden nach Zusammenstellung des Problemlösungsteams demzufolge relevante Informationen zur aktuellen Situation gesammelt, strukturiert und dokumentiert (Situati-

onsanalyse). Zu diesem Zweck werden heutig und zukünftig relevante Produkteigenschaften analysiert und optional die Stakeholder-Wahrnehmung bestehender Generationen von Produktfunktionen zu evaluieren. Anknüpfend kann ein Explizieren der Stakeholder-Erwartungen erfolgen. Auf Grundlage der gesammelten Informationen werden anschließend die charakteristischen Problemzusammenhänge erkannt und eingeschränkt (Problemeingrenzung). Dazu werden die Anbieter- und Marktprämissen eingegrenzt und das Produktfunktions-Portfolio auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft. Wichtig bei der Problemeingrenzung ist, eine Vorfizierung auf bekannte Lösungsansätze zu vermeiden.



Abbildung 5.23: Subphase 1.1: Analyse von Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung

Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden mit einem Informationscheck (IC) sowie einer Überprüfung des Problemlösungsteams besiegelt. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Projekte managen*, *Wissen managen*, *Validieren und Verifizieren* und *Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Markteinführung analysieren*, *Nutzung analysieren* und *Abbau analysieren* sowohl im *Strategie-* als auch übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die detaillierte Zuordnung der Aktivitäten zu den (Sub-)Phasen erfolgt in Abschnitt 5.3.7, die ausführliche Beschreibung findet sich aufgrund des Detailgrades in Anhang D.3.4.

5.3.3.2 Subphase 1.2: Finden alternativer Funktionsprofile zur Bedürfnissituation

Im Anschluss an die Identifikation und Konkretisierung der Bedürfnissituation beabsichtigt die zweite Subphase 1.2 eine *Generierung alternativer Funktionsprofile* zur Befriedigung der Erwartungen und Bedürfnisse der relevanten Stakeholder von insbesondere Kunde und Anwender (vgl. Abbildung 5.24). Anknüpfend an die Zusammensetzung des Problemlösungsteams werden in diesem Schritt Lösungsvarianten über das Finden von Profilen für das eingegrenzte Problem bzw. Bedürfnis über Kreativitätsmethoden generiert (Alternative Lösungssuche). Aus diesem Grund werden zu-

nächst Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen in alternativen Funktionsprofilen konkretisiert. Daran anschließend wird lösungsoffen nach beeinflussten (Produkt-)Eigenschaften und lösungsspezifisch nach technologischen Prämissen bzw. physischen Lösungsalternativen von Prinzip und (physischer) Gestalt gesucht.

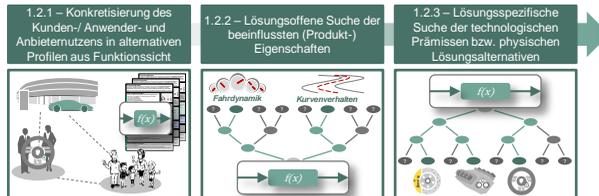


Abbildung 5.24: Subphase 1.2: Finden alternativer Funktionsprofile zur Bedürfnissituation

Eine Konsolidierung der Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase erfolgt über einen Informationscheck (IC). Zu guter Letzt wird die Zusammenstellung des Problemlösungsteams für die nächsten Aktivitäten verifiziert. In dieser Subphase liegt der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung auf den Basisaktivitäten *Wissen managen* und *Änderungen managen* sowie der Kernaktivität *Profile finden* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die Aktivitäten werden den (Sub-)Phasen in Abschnitt 5.3.7 detailliert zugeordnet und die Detaillierung findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang D.3.4.

5.3.3.3 Subphase 1.3: Auswahl der Funktionsprofile und Bewertung der Funktionsidee(n)

Die gefundenen, *alternativen Funktionsprofile* sollen in dieser Subphase 1.3 über vier Teilschritte *systematisch reduziert* und *eingegrenzt* werden, um daraus entstehende *Funktionsidee(n)* *bewerten* und *auswählen* zu können (vgl. Abbildung 5.25).

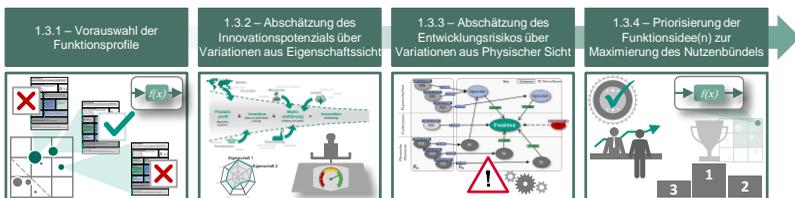


Abbildung 5.25: Subphase 1.3: Auswahl der Funktionsprofile und Bewertung der Funktionsidee(n)

Zu diesem Zweck erfolgt nach Zusammenstellung des Problemlösungsteams über den Vergleich der Lösungsalternativen mittels definierter Kriterien eine Lösungsauswahl und Tragweitenanalyse der Risiken und Chancen einer Umsetzung der Funktionsidee(n). In einem ersten Schritt werden die generierten Funktionsprofile mittels der Kriterien Marktpotenzial und Entwicklungsaufwand/-komplexität vorausgewählt. Daran anschließend erfolgt die Abschätzung des Innovationspotenzials, in erster Linie basierend auf den Variationen aus Eigenschaftssicht. Im Anschluss wird das Entwicklungsrisiko, vorrangig über die Variationen aus physischer Sicht, mathematisch berechnet und abgeschätzt. Abschließend erfolgt die Priorisierung der Funktionsidee(n) vor dem Hintergrund einer Maximierung des Nutzenbündels und unter Berücksichtigung aller oben genannter Kriterien sowie der zeitlichen Kritikalität der funktionalen Variation.

Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden mit einem Informationscheck (IC) sowie Überprüfung des Problemlösungsteams besiegelt. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Validieren und Verifizieren, Wissen managen und Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Profile finden, Ideen finden und Prinzip und Gestalt modellieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die detaillierte Zuordnung der Aktivitäten zu den (Sub-)Phasen erfolgt in Abschnitt 5.3.7, die ausführliche Beschreibung findet sich aufgrund des Detailgrades in Anhang D.3.4.

5.3.3.4 Subphase 1.4: Entscheidung über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation

In Anschluss an die Bewertung und Auswahl von Funktionsidee(n) bezweckt die Subphase 1.4 die *Aufbereitung der Arbeitsergebnisse und Artefakte* aus den drei vorangehenden Subphasen, um eine *Entscheidung zur weiteren funktionalen Spezifikation der zukünftigen Produktfunktion* herbeizuführen (vgl. Abbildung 5.26). Das weitere Vorgehen der funktionalen Spezifikation wird mit dem zusammengestellten Problemlösungsteam gemäß der SPALTEN-Aktivität *„Entscheiden und Umsetzen“* über Maßnahmenpläne unter Berücksichtigung der identifizierten Risiken und Chancen (vgl. Tragweitenanalyse in Subphase 1.3) geplant. Eine Konsolidierung der Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase erfolgt über einen Informationscheck (IC). In einem letzten, aber umso wichtigeren, Schritt wird der bisherige Problemlösungsprozess der ersten Phase kritisch reflektiert und nachbereitet, um durch Erkenntnisse für zukünftige Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n) im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) zu lernen.

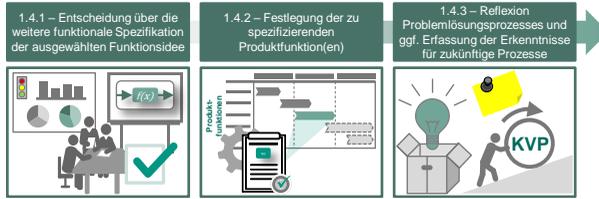


Abbildung 5.26: Subphase 1.4: Entscheidung über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation

In dieser Subphase liegt der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung auf den Basisaktivitäten *Projekte managen* und *Wissen managen* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die Aktivitäten werden den (Sub-)Phasen in Abschnitt 5.3.7 detailliert zugeordnet und die Detaillierung findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang D.3.4. Das Ende der Subphase 1.4 beendet im selben Augenblick ebenso die erste Phase des Referenzprozesses zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE.

Zusammenfassend wurden in der gesamten ersten Phase des Referenzprozesses zunächst Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung analysiert, anschließend alternative Funktionsprofile dazu gefunden, diese ausgewählt und zugehörige Funktionsideen bewertet. In der letzten Subphase wurde final über die Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation entschieden, sodass die generierten sowie priorisierten Funktionsideen als Ergebnis an die nächste, zweite Phase, übergeben werden können.

5.3.4 Phase 2: Spezifikation Produktfunktion

Die zweite Phase des Referenzprozesses zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS kann durch zwei unterschiedliche Umstände ausgelöst werden. Einerseits kann das Ergebnis der ersten Phase in Form einer generierten und priorisierten Funktionsidee über eine positive Entscheidung zur funktionalen Spezifikation in der letzten Subphase 1.4 den Anlass geben. Andererseits kann eine bereits am Markt eingeführte Produktfunktion Fkt_{i-1} über die zweite Phase in eine konsekutive Generation Fkt_i ebendieser Produktfunktion weiterentwickelt werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden an erforderlicher Stelle eine Differenzierung im Vorgehen zwischen der ersten Generation einer Produktfunktion (Fkt_1) und späteren Generationen ($i \in \mathbb{N}_{>1}$) von Produktfunktionen ($Fkt_{>1}$) vorgenommen.

In der zweiten Phase werden die vier Subphasen *Integration der Produktfunktion in funktionale(s) Produktkonzept(e)* (2.1), *Definition des funktions-spezifischen Zielsystems* (2.2), *Modellierung der Produktfunktion* (2.3) und *Planung der Realisierung und Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen* (2.4) durchschritten (vgl. Abbildung 5.27). Wie dargestellt, werden im Verlauf jeder der Subphasen die zugeordneten *Aktivitäten der SPALTEN-Problemlösungsmethodik* durchlaufen, abschließend geschieht jeweils ein *Informationscheck* und die *Zusammensetzung des Problemlösungsteams* wird ggf. für die nächste Subphase adaptiert.

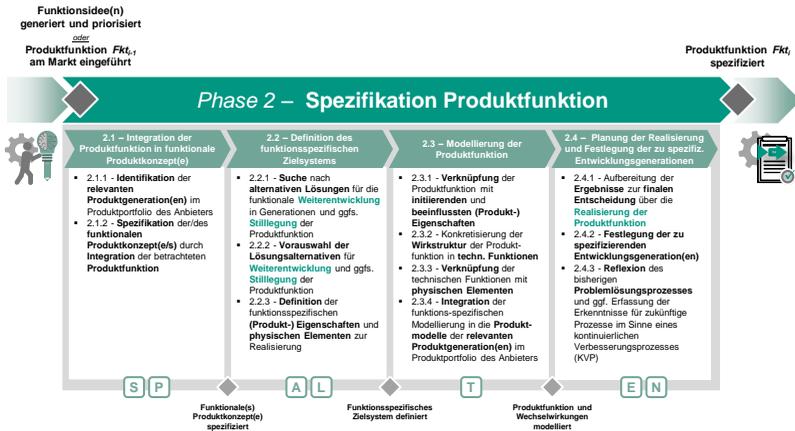


Abbildung 5.27: Phase 2: Spezifikation Produktfunktion

In der zweiten Phase des Referenzprozesses liegt der Fokus im generischen Referenz-Produktmodell sowohl auf der *Zielsynthese* und *Zielanalyse* als auch der *Objektsynthese*. Mit der Wissensbasis im Handlungssystem wird das Zielsystem validiert. Die Stakeholder-Erwartungen werden objektiviert, Stakeholder Wahrnehmung bewertet und der Lösungsraum im Handlungssystem durch die Aktivität des Verifizierens eingeschränkt. Innerhalb des eingeschränkten Lösungsraum werden anschließend Elemente im Objektsystem über den Variationsoperator auf Basis des Referenzsystems und unter Berücksichtigung analysierter Zielsystem-Elemente kreiert. Infolgedessen ist das Endergebnis der zweiten Phase die spezifizierte Produktfunktion Fkt_i . Die Detaillierung dieser Phase findet sich in Anhang D.3.5.

5.3.4.1 Subphase 2.1: Integration der Produktfunktion in funktionale(s) Produktkonzept(e)

Ausgangspunkt dieser ersten Subphase 2.1 bildet immer eine *bereits generierte und priorisierte Funktionsidee* oder die *angestrebte Weiterentwicklung einer Produktfunktion*. Anknüpfend daran gilt es, die für die Produktfunktionen relevanten Produktgenerationen zu identifizieren und auf Basis derer Produktprofile (bspw. in Form von Eigenschaftsprofilen) einzugrenzen (vgl. Abbildung 5.28). Im Anschluss daran kann die Produktfunktion in das *Produktgenerations-spezifische Spezifizieren* (vgl. Abschnitt 5.3.2.2) integriert und somit bei der *Spezifikation funktionaler Produktkonzepte* berücksichtigt werden. Nach Zusammenstellung des Problemlösungsteams werden in dieser Subphase zunächst die relevanten Informationen der aktuellen Situation im Produktportfolio-Zyklusplan gesammelt und strukturiert (Situationsanalyse). Zur Eingrenzung der relevanten Produktgenerationen werden die Eigenschaftsprofile betrachtet, um die Spezifikation der funktionalen Produktkonzepte durch Integration der Produktfunktion einzugrenzen (Problemeingrenzung).

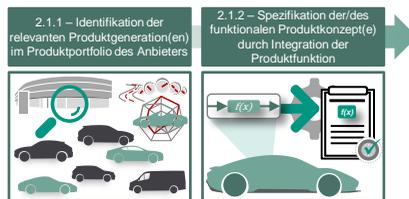


Abbildung 5.28: Subphase 2.1: Integration der Produktfunktion in funktionale(s) Produktkonzept(e)

Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden mit einem Informationscheck (IC) sowie Überprüfung des Problemlösungsteams besiegelt. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Projekte managen*, *Wissen managen*, *Validieren und Verifizieren* und *Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Profile finden*, *Markteinführung analysieren* und *Nutzung analysieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die detaillierte Zuordnung der Aktivitäten zu den (Sub-)Phasen erfolgt in Abschnitt 5.3.7 und die Detaillierung findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang D.3.5.

5.3.4.2 Subphase 2.2: Definition des funktionsspezifischen Zielsystems

Anschließend an das Produktgenerations-spezifische Spezifizieren der funktionalen Produktkonzepte, beabsichtigt die Subphase 2.2 das *Spezifizieren der Produktfunktion selbst* (vgl. Abschnitt 5.3.2.3), d.h. das Zielsystem der Produktfunktion wird definiert.

nirt. Darüber hinaus werden Lösungsalternativen für eine *Weiterentwicklung* in Generationen sowie eine mögliche *Stilllegung* generiert und an diesem Punkt im Referenzprozess vorausgewählt (vgl. Abbildung 5.29). In dieser Subphase werden nach dem erfolgreichen Zusammensetzen des Problemlösungsteams zunächst Lösungsvarianten für die Weiterentwicklung sowie Stilllegung einer Produktfunktion über Kreativitätsmethoden generiert und hinreichend konkretisiert (Alternative Lösungssuche). Diese zuvor generierten alternativen Lösungen werden anschließend miteinander verglichen und mittels definierter Kriterien vorausgewählt (Lösungsauswahl). Dies wird durch eine Auswahl und Definition der funktionspezifischen (Produkt-)Eigenschaften und physischen Elemente zur Realisierung der Produktfunktion komplettiert.

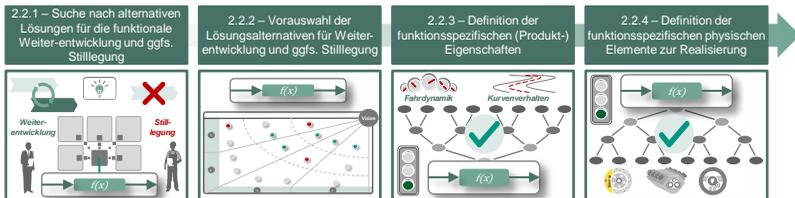


Abbildung 5.29: Subphase 2.2: Definition des funktionspezifischen Zielsystems

Eine Konsolidierung der Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung erfolgt in dieser Subphase abschließend über einen Informationscheck (IC). Zu guter Letzt wird die Zusammenstellung des Problemlösungsteams für die nächsten Aktivitäten verifiziert. In dieser Subphase liegt der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung auf den Basisaktivitäten *Wissen managen*, *Validieren und Verifizieren* und *Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Profile finden*, *Ideen finden*, *Nutzung analysieren* und *Abbau analysieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die Aktivitäten werden den (Sub-)Phasen in Abschnitt 5.3.7 detailliert zugeordnet, die ausführliche Beschreibung findet sich aufgrund des Detailgrades in Anhang D.3.5.

5.3.4.3 Subphase 2.3: Modellierung der Produktfunktion

Die Subphase 2.3 verfolgt das Ziel, die vorausgehenden, erarbeiteten Zusammenhänge der Produktfunktion aus Eigenschafts- und physischer Sicht zunächst Produktfunktions-spezifisch zu modellieren, um damit die Integration in Produktmodelle der relevanten Produktgenerationen im Produktportfolio des Anbieters zu ermöglichen (vgl. Abbildung 5.30). Aus diesem Grund erfolgt in der Subphase eine Tragweitenanalyse, die für die ausgewählte Lösung der Produktfunktion Chancen und Risiken der Umsetzung in den relevanten Produktgenerationen auf Basis der Modellierung untersucht. Auf Grundlage der Modellierung können a priori Maßnahmen definiert werden, die das Risiko der Implementierung der Produktfunktion minimieren oder im Risikofall

entsprechende Handlungsroutinen zur Verfügung stellen. Analog können Chancen und Synergien zu weiteren Produktfunktionen bei der Integration in die entsprechenden Produktmodelle der Produktgenerationen identifiziert und realisiert werden.

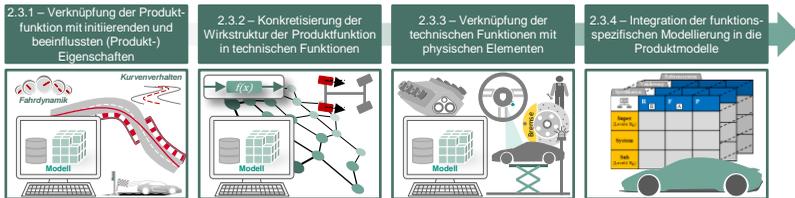


Abbildung 5.30: Subphase 2.3: Modellierung der Produktfunktion

Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden mit einem Informationscheck (IC) sowie Überprüfung des Problemlösungsteams abgeschlossen. Der Fokus der Aktivitäten der Produktenstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Wissen managen*, *Validieren* und *Verifizieren*, *Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Prinzip und Gestalt modellieren* sowohl übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die detaillierte Zuordnung der Aktivitäten zu den (Sub-)Phasen erfolgt in Abschnitt 5.3.7 und die Detaillierung findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang D.3.5.

5.3.4.4 Subphase 2.4: Planung der Realisierung und Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen

Folgend auf die Modellierung der Produktfunktion und deren Wechselwirkungen in den relevanten Produktgenerationen konzentriert sich die Subphase 2.4 auf die Aufbereitung der Arbeitsergebnisse und Artefakte aus den drei vorangehenden Subphasen, um eine *Entscheidung zur Realisierung der Produktfunktion* herbeizuführen. Über das zunächst zusammengestellte Problemlösungsteam wird das weitere Vorgehen der Realisierung der Produktfunktion über Entwicklungsgenerationen gemäß der SPALTEN-Aktivität „*Entscheiden und Umsetzen*“ über Maßnahmenpläne unter Berücksichtigung der identifizierten Risiken und Chancen (vgl. Tragweitenanalyse in Subphase 2.3) geplant. Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden über einen Informationscheck (IC) konsolidiert. In einem letzten, aber umso wichtigeren, Schritt wird der bisherige Problemlösungsprozess der zweiten Phase kritisch reflektiert und nachbereitet, um durch Erkenntnisse für zukünftige Spezifikation von Produktfunktionen im Sinne eines *kontinuierlichen Verbesserungsprozesses* (KVP) zu lernen.

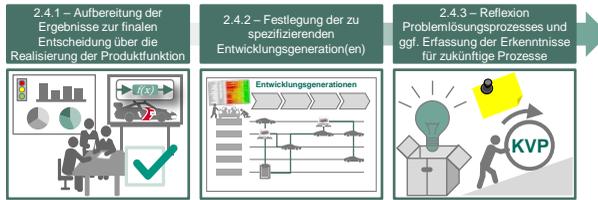


Abbildung 5.31: Subphase 2.4: Planung der Realisierung und Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen

In Subphase 2.4 liegt der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung auf den Basisaktivitäten *Projekte managen*, *Wissen managen* und *Änderungen managen* sowie der Kernaktivität *Markteinführung analysieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM. Die Aktivitäten werden den (Sub-)Phasen in Abschnitt 5.3.7 detailliert zugeordnet, die ausführliche Beschreibung findet sich aufgrund des Detailgrades in Anhang D.3.5.

Das Ende der Subphase 2.4 beendet gleichzeitig ebenso die zweite Phase des Referenzprozesses zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE.

In der Summe wurde in der zweiten Phase auf Basis einer generierten oder spezifizierten Funktionsidee oder der vorausgehenden Generation einer Produktfunktion in einem ersten Schritt das funktionale Produktkonzept durch Integration der Produktfunktion spezifiziert, dann das funktionspezifische Zielsystem definiert und die Produktfunktion modelliert. Zum Abschluss wurde in der letzten Subphase final über die Realisierung der Produktfunktion entschieden. An dieses Ergebnis kann die nächste Phase anknüpfen, mit dem Ziel, die Markteinführung der Produktfunktion umzusetzen.

5.3.5 Phase 3: Realisierung Produktfunktion

Die dritte Phase im Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS wird detailliert durch Hirschter (vgl. 2023) beschrieben. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt nur ein kurzer Überblick der Aktivitäten in der Phase ausgeführt.

Auslöser der dritten Phase ist eine *vollendete Spezifikation einer Produktfunktion* (vgl. Phase 2), die über Entwicklungsgenerationen validiert und anschließend in ein oder mehreren Produktgenerationen am Markt eingeführt werden soll. Für jede der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen aus der vorangehenden Subphase 2.4 wer-

den die drei Subphasen *Planung des Reifegrads* (3.1), *Spezifikation der Entwicklungsgeneration* (3.2) und *Bewertung der Spezifikation* (3.3) durchlaufen (vgl. Abbildung 5.32). Im Zuge jeder der drei Phasen werden Aktivitäten der *SPALTEN-Problemlösungsmethodik* durchschritten. Zum Abschluss erfolgt jeweils ein *Informationcheck* und die *Zusammensetzung des Problemlösungsteams* wird ggf. für die nächste Subphase angepasst.

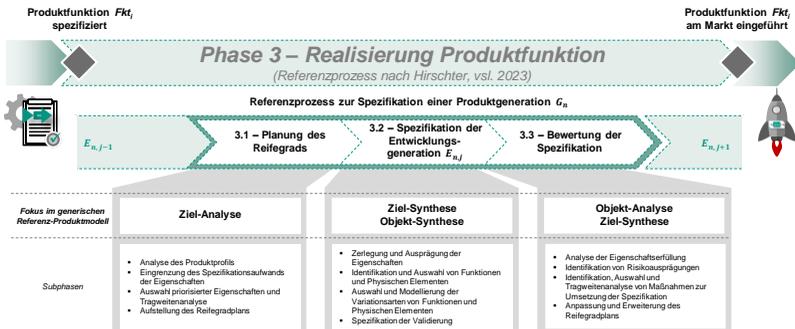


Abbildung 5.32: Phase 3: Realisierung Produktfunktion (Hirschter, vsl. 2023)

Der Fokus im generischen Referenz-Produktmodell (vgl. Abschnitt 5.2) liegt in Subphase 3.1 auf der *Zielanalyse*, in Subphase 3.2 auf *Zielsynthese* und *Objektsynthese* sowie in der letzten Subphase 3.3 auf *Objektanalyse* und *Zielsynthese* (Hirschter, vsl. 2023). Zusammenfassend wurden in der dritten Phase des Referenzprozesses jeweils für die Produktfunktion zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen der Reifegrad geplant, die Entwicklungsgeneration spezifiziert und die Spezifikation bewertet. In der Bewertung der Spezifikation der letzten zu spezifizierenden Entwicklungsgeneration wurde final über die Reife der Eigenschaftserfüllung der Produktfunktion entschieden, sodass die Produktfunktion mit Abschluss der dritten Phase in einer oder mehreren Produktgenerationen am Markt eingeführt wurde.

5.3.6 Phase 4: Stilllegung Produktfunktion

Die vierte Phase im Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS verfolgt die *Beendigung des Lebenszyklus einer Produktfunktion*. Aus diesem Grund stellt den Auslöser der Phase der Stilllegungsbedarf einer bereits am Markt eingeführten Produktfunktion dar. Die vierte Phase setzt sich aus einer Kombination ausgewählter Aktivitäten in Phase 1, 2 und 3 zusammen. Gegliedert wird die vierte Phase in fünf Subphasen: *(Re-)Generierung und Priorisierung Idee zur Stilllegung der*

Produktfunktion (4.1), Extrahieren (der Generation(en)) der Produktfunktion aus relevanten Produktgeneration(en) (4.2), Zielsystem (Re-)Validierung, Objektsystem (Re-)Kreation und (Re-) Modellierung der relevanten Produktgeneration(en) (4.3), Planung der Beendigung des Funktionslebenszyklus und Festlegung der dafür zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen (4.4) und Realisierung der Beendigung des Funktionslebenszyklus (4.5). Im Zuge jeder der Subphasen werden – wie dargestellt in Abbildung 5.33 – die zugeordneten Aktivitäten der SPALTEN-Problemlösungsmethodik durchschritten. Zum Abschluss erfolgt jeweils ein Informationscheck und die Zusammensetzung des PLT wird ggf. für die nächste Subphase angepasst.

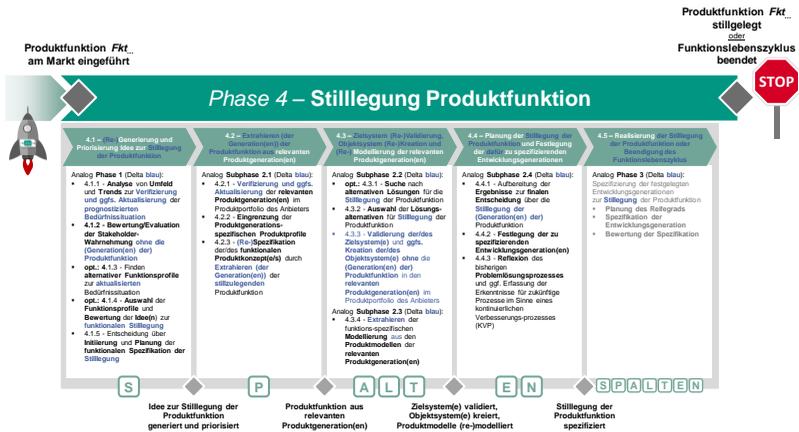


Abbildung 5.33: Phase 4: Stilllegung Produktfunktion

Der ganzheitliche Ansatz zur Stilllegung einer Produktfunktion und damit einhergehende Kombination der Aktivitäten aus den drei vorangehenden Phasen bewirkt, dass im generischen Referenz-Produktmodell sowohl Objektanalyse, Zielsynthese, Zielanalyse als auch Objektsynthese betrieben werden. Das Endergebnis der Phase hat eine oder mehrere Generationen einer Produktfunktion stillgelegt oder den gesamten Funktionslebenszyklus einer Produktfunktion beendet. Die ausführliche Beschreibung dieser Phase findet sich in Anhang D.3.6.

5.3.7 Modellierung im iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Den Abschluss der Ausführungen über den Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen in der automobilen Produktentwicklung bildet die Modellierung im iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

(vgl. Abschnitt 2.1.3.4). Dazu werden die einzelnen Phasen des Referenzprozesses im Phasenmodell des iPeM verortet und gleichzeitig den Aktivitäten der Produktentstehung zugeordnet. Der Fokus der nachfolgenden Darstellungen in dieser Forschungsarbeit liegt auf Phase 1 und 2. Die detaillierte Zuordnung der Basis- und Kernaktivitäten der Produktentstehung erfolgte bereits in den vorangehenden Ausführungen der einzelnen Subphasen und wird an dieser Stelle nicht wiederholt.

Phase 1: Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n)

Die erste Phase des Referenzprozesses startet mit der *Initiierung des Funktionsprojektes* [I] und schließt mit *generierten und priorisierten Funktionsidee(n)* [V]. Die Aktivitäten der Produktentstehung liegen in Phase 1 sowohl im Strategie- als auch übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM (vgl. Abbildung 5.34).

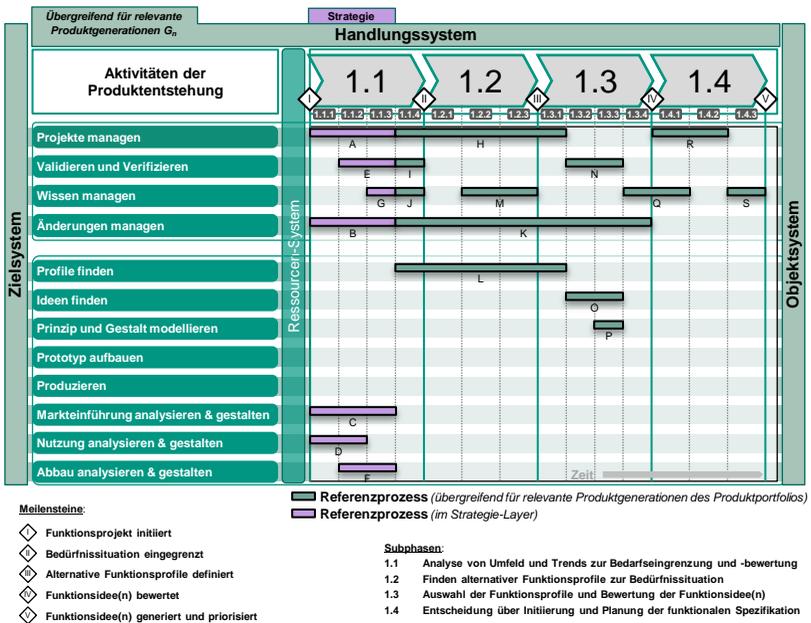


Abbildung 5.34: Modellierung der ersten Phase des Referenzprozesses im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell

Phase 2: Spezifikation Produktfunktion

Den Ausgangspunkt der *zweiten Phase* des Referenzprozesses bildet das Ergebnis der vorangehenden Phase – *generierte und priorisierte Funktionsidee(n)* [VI]. Abgeschlossen wird mit einer *spezifizierten Produktfunktion* [X]. Die Aktivitäten der Produktentstehung liegen in Phase 2 übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM (vgl. Abbildung 5.35).

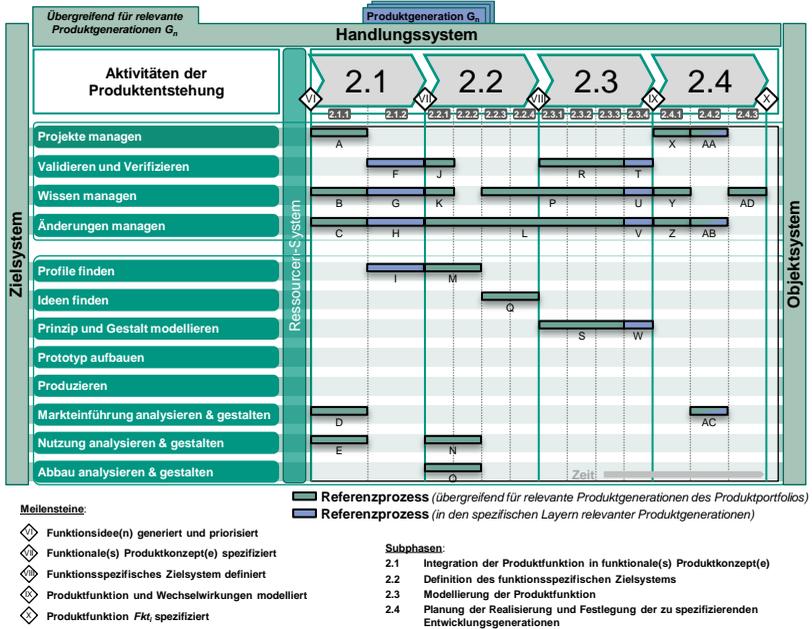


Abbildung 5.35: Modellierung der zweiten Phase des Referenzprozesses im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell

Phase 3: Realisierung Produktfunktion

Einganggröße der *dritten Phase* des Referenzprozesses ist eine spezifizierte Produktfunktion, die realisiert und in den Markt eingeführt werden soll. An dieser Stelle wird für eine detaillierte Erläuterung auf Hirschter (vgl. 2023) verwiesen.

Phase 4: Stilllegung Produktfunktion

Die vierte Phase des Referenzprozesses setzt sich aus einer Kombination der Aktivitäten aus allen drei vorangehenden Phasen zusammen, ergänzt um ein durchgängiges Managen von Änderungen und der Analyse und Gestaltung des Abbaus. Aus diesem Grund erfolgt hier keine separate Darstellung der Modellierung im iPeM.

Der Zeitraum der einzelnen Phasen korreliert mit projektbezogenen Randbedingungen wie bspw. den verfügbaren Ressourcen. In der Entwicklungspraxis laufen die beschriebenen Aktivitäten des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen mitunter parallel ab, was teilweise zeitliche Verwerfungen zwischen oder innerhalb verschiedener Phasen hervorruft.

5.3.8 Zwischenfazit

Der entwickelte Referenzprozess und die methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen in der automobilen Produktentwicklung setzt die an die Präskriptive Studie gestellten Anforderungen 11 bis 16 (vgl. Abbildung 4.29) um und beantwortet damit die Forschungsfrage 3.5 (vgl. Abschnitt 3.1.3). Bezogen auf die Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung (vgl. Abbildung 5.16) wurden folglich Domänen-bezogene Aktivitätsmuster zum Spezifizieren von Produktfunktionen in der automobilen Produktentwicklung kreiert. Über Deduktion sowohl bzgl. Instanziierungs- als auch Individualisierungsgrad wurde der Referenzprozess im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell (Metaⁿ-Modell) abgebildet.

5.4 Fazit: Unterstützungsevaluierung

Zum Abschluss der Präskriptiven Studie wird die entwickelte Systematik in einer *Unterstützungsevaluierung* gemäß der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing & Chakrabarti (2009) grundsätzlich hinsichtlich ihrer Funktionalität überprüft. Dazu wird die Einhaltung und Umsetzung der festgelegten Anforderungen aus Abschnitt 4.5 verifiziert. Dies ist zu einem gewissen Teil bereits in einer entwurfsbegleitenden Absicherung, durch kontinuierlichen Abgleich des erwarteten Ergebnisses mit den Forschungszielen, erfolgt (vgl. Abbildung 5.36).



Abbildung 5.36: Die drei Bestandteile der entwickelten Unterstützung des Produktentwickelnden in der Präskriptiven Studie (PS)

Die Unterstützungsevaluierung beinhaltet die Verifikation, ob die entwickelte Systematik die Anforderungen aus dem Fazit der Deskriptiven Studie I erfüllt (Blessing & Chakrabarti, 2009). In Tabelle 5.1 ist die Zuordnung der umgesetzten Anforderungen aus der Deskriptiven Studie I (vgl. Abbildung 4.29) zu den Ergebnissen der Präskriptiven Studie dargestellt.

Tabelle 5.1: Verknüpfung der umgesetzten Anforderungen aus der Deskriptiven Studie I in den Kapiteln und Ergebnissen der Präskriptiven Studie

Kapitel	Ergebnisse	Umgesetzte Anforderungen
5.1	In Bezug zum <i>Framework der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Sprache über Elementtypen von Referenzsystem-Elementen (RSE), Mengenverständnis und generischen Variationsoperator im Modell der PGE • Grundlegendes, generisches Referenz-Produktmodell im Modell der PGE • System-spezifische Sprache über Funktionsverständnis und der abgeleiteten Variationsarten von Funktionen im Modell der PGE • System-spezifisches Modell von Produktfunktionen im Modell der PGE 	1 bis 6
5.2	In Bezug zum <i>Framework der Abstraktionsgrade der Produktmodellierung</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte im Modell der PGE 	7 bis 10
5.3	In Bezug zum <i>Framework der Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Domänen-spezifischer Referenzprozess und methodische Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen der Automobilentwicklung im Modell der PGE • Modellierung des Referenzprozesses im Meta-Modell des iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell 	11 bis 16

Die *Unterstützungsevaluierung* konnte somit einerseits die Vollständigkeit der umgesetzten Anforderungen 1 bis 16 (vgl. Abbildung 4.29) verifizieren und hat andererseits sichergestellt, dass alle Elemente der entwickelten Systematik zueinander konsistent sind (vgl. Abbildung 5.36 und Tabelle 5.1). Die tatsächliche Unterstützung des Produktentwickelnden kann daher in einer Deskriptiven Studie II (DS-II) evaluiert werden. In der folgenden DS-II werden demzufolge eine *Anwendbarkeits-* sowie eine *initiale Erfolgsevaluierung* nach Blessing & Chakrabarti (2009) durchgeführt.

6 Evaluation der entwickelten Systematik in der Produktentwicklungspraxis

In diesem Kapitel wird in Anlehnung an die Design Research Methodology (DRM, vgl. Abschnitt 3.2.1) eine initiale *Deskriptive Studie II (DS-II)* durchgeführt, die insbesondere zum Abschluss eines Forschungsprojektes auf Basis ermittelter Konsequenzen zukünftige Handlungsbedarfe aufzeigen kann. In Abschnitt 6.1 werden zunächst die Vorgehensweise und Anwendungsprämissen der DS-II erläutert. In Abschnitt 6.2 wird das Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren von Produktfunktionen in der automobilen Sportwagenentwicklung am Beispiel von „*Fahrzeugaerodynamik aktiv/passiv regeln*“ bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG evaluiert. Die Evaluation ausgewählter Inhalte im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung erfolgt in Abschnitt 6.3. Die DS-II wird mit einer Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion komplettiert (vgl. Abschnitt 6.4).

6.1 Vorgehensweise und Anwendungsprämissen der Deskriptiven Studie II

In der Deskriptiven Studie II soll die entwickelte Systematik aus Verständnis sowie Abbildung von (Produkt-)Funktionen, generischem Referenz-Produktmodell und Referenzprozess zum Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS evaluiert werden. Ziel ist es hierbei zu untersuchen, ob die entwickelte, prozessuale und methodische Unterstützung der Produktentwickelnden beim Spezifizieren aus Funktionssicht den erwarteten Effekt in der Anwendbarkeit erfüllt und einen initialen Erfolgsbeitrag leistet (Blessing & Chakrabarti, 2009). Im Rahmen der initialen DS- II wurden daher Fallstudien in teilnehmenden Beobachtungen, Expertengesprächen sowie eine Fragebogen-gestützte Umfrage durchgeführt. Zunächst erfolgt die *Anwendbarkeitsevaluation* des Verständnisses von Produktfunktionen und des Variationsoperators aus Funktionssicht (vgl. Abschnitt 6.2.2). Darauf folgend wird das Spezifizieren einer Produktgeneration (aus Funktionssicht) im generischen Referenz-Produktmodell angewendet und ebenfalls die Anwendbarkeit des Modells beleuchtet. Ausgewählte Inhalte des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen werden folgend sowohl bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG als auch im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung bewertet (vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.3). Neben der Anwendbarkeitsevaluierung erfolgt eine *initiale Erfolgsevaluierung*. In der Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion werden abschließend Implikationen und Potenziale zur Verbesserung der Systematik angeregt (vgl. Abschnitt 6.4).

6.2 Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren einer Produktfunktion am Beispiel der automobilen Sportwagenentwicklung

In der ersten Studie soll zunächst die Anwendbarkeit der entwickelten Systematik zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen in der Sportwagenentwicklung evaluiert werden. Aus diesem Grund wurden in teilnehmenden Beobachtungen Fallstudien zu Funktionsverständnis, generischem Referenz-Produktmodell sowie der prozessualen und methodischen Unterstützung des Produktentwickelnden in der Praxis effektiert. Hierzu sollen die drei nachfolgenden Forschungsfragen (FF) aus Abschnitt 3.1.3 untersucht und beantwortet werden:

- FF1.5** Inwieweit lassen sich das Verständnis, die Abbildung und Modellierung von Funktionen in der Produktentwicklungspraxis durch den Produktentwickelnden effektiv nutzen?
- FF2.4** Wie kann eine Modell-gestützte Strukturierung zum Spezifizieren komplexer Produkte den Produktentwickelnden bei einer effektiven Produktspezifikation unterstützen?
- FF3.6** Wie effektiv kann der Produktentwickelnde einen Referenzprozess und die methodische Unterstützung in der automobilen Produktentwicklung anwenden?

Die in Abschnitt 6.2 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikationen Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020), Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) und Fahl, Hirschter & Albers (2021) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vgl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die empirischen Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden teilweise in vom Autor Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Haag (2020)⁷⁶ und Wöhrle (2020)⁷⁷ am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers durchgeführt. Aus Geheimhaltungsgründen können in dieser Forschungsarbeit keine zukünftigen Produktfunktionen, deren Funktionsidee(n) oder Zusammenhänge diskutiert werden, daher beziehen sich die folgenden Ausführungen nur auf Wirkbeziehungen bereits am Markt eingeführter Produktfunktionen.

⁷⁶ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

⁷⁷ Unveröffentlichte, von Tobias Hirschter Co-betreute Masterarbeit.

6.2.1 Übergreifendes Studiendesign und -vorgehen

Zur Evaluation der entwickelten Systematik in realen Produktentstehungsumgebungen wurden im ersten Teil der initialen DS-II drei *Fallstudien* (vgl. Anhang B.6) über *teilnehmende Beobachtungen* (vgl. Anhang B.1) und *Experteninterviews* (vgl. Anhang B.5) zur Evaluierung der Anwendbarkeit in der Sportwagenentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) durchgeführt (vgl. Abbildung 6.1).

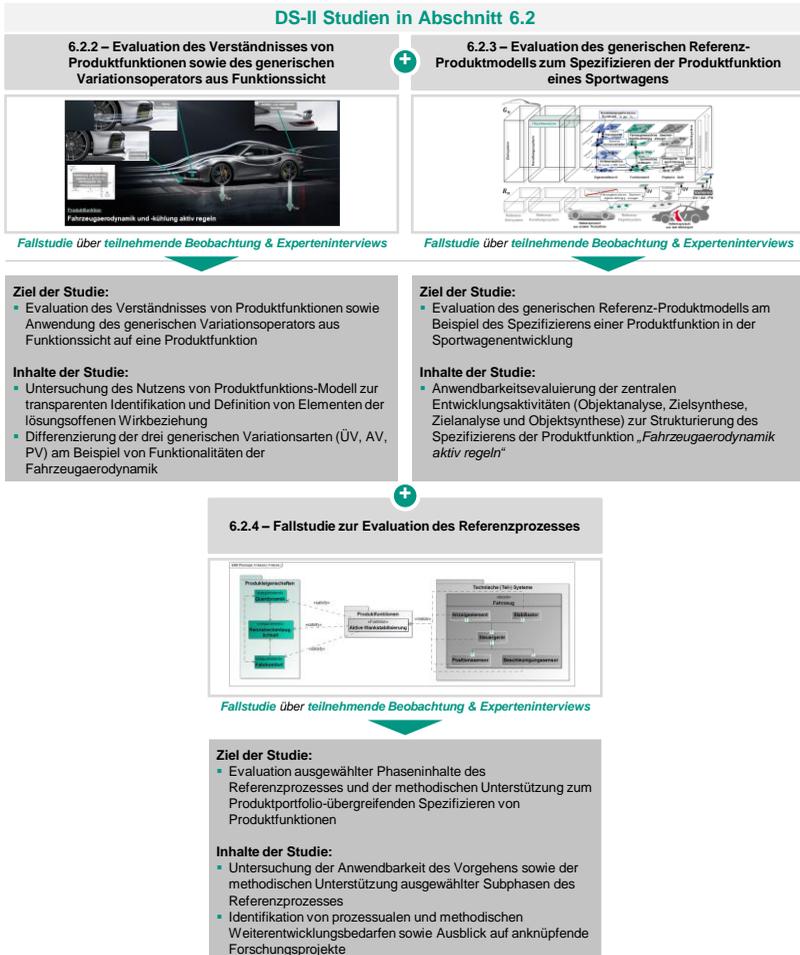


Abbildung 6.1: Übergreifendes Studiendesign in Abschnitt 6.2 der DS-II

Zu diesem Zweck wurde in den Fallstudien die Betrachtungen jeweils durchgängig am Beispiel von Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik in der Praxis durchgeführt. Diese Produktfunktionen sind technisch hochvernetzt und durch zahlreiche Eigenschaften wie bspw. Fahrdynamik, Reichweite und Design für Kunde und Anwender hochgradig und direkt erlebbar. Aus diesem Grund eignen sich die Funktionalitäten der Fahrzeugaerodynamik ganz besonders zur Evaluation in diesem Abschnitt.

Eingangs erfolgt die Evaluation des Verständnisses einer Produktfunktion sowie die Anwendbarkeit des generischen Variationsoperators aus Funktionssicht in Abschnitt 6.2.2. Basierend darauf wird das generische Referenz-Produktmodell genutzt, um die Anwendung der zentralen Entwicklungsaktivitäten der Objektanalyse, Zielsynthese, Zielanalyse und Objektsynthese anhand der *Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“* des Porsche 911 Turbo (Typ 991) zu evaluieren (vgl. Abschnitt 6.2.3). Abschließend werden ausgewählte Inhalte des Referenzprozesses (aus Phase 1 und 2) sowie der methodischen Unterstützung zum Spezifizieren aus Funktionssicht angewendet und bewertet (vgl. Abschnitt 6.2.4).

Die folgenden Fallstudien zu den Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik (bzw. Porsche Active Aerodynamics) detaillieren und quantifizieren nur bereits öffentlich zugängliche Informationen in den Publikationen Gönüldinc & Hölzel (2014), Meder, Wiegand & Pfadenhauer (2014) sowie Soja, Thomas & Kleiner (2019). Der Grund dafür liegt im Schutz von unternehmensinternen Informationen aus der Forschungsumgebung, die sich bspw. auf das zukünftige Produktportfolio, Produktgenerationen in der Entwicklung oder einzelne, geplante Produktfunktionen beziehen.

6.2.2 Evaluation des Verständnisses von Produktfunktionen sowie Anwendbarkeit des generischen Variationsoperators aus Funktionssicht

Zur Evaluation der Anwendbarkeit von einerseits des *Verständnisses von Produktfunktionen* und andererseits der Anwendbarkeit des *generischen Variationsoperators aus Funktionssicht im Modell der PGE*, wird in diesem Abschnitt zunächst eine Fallstudie zu Funktionalitäten der Fahrzeugaerodynamik von Sportwagen erläutert. Ziel ist es, den Nutzen des Produktfunktions-Modells als Unterstützung des Produktentwickelnden bei der transparenten Identifikation und Definition von Elementen der lösungsoffenen Wirkbeziehung zu untersuchen. Darüber hinaus soll die Differenzierung der drei generischen Variationsarten (Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation) am Beispiel der Entwicklung von Funktionalitäten der Fahrzeugaerodynamik gezeigt werden. Zu diesem Zweck soll die Forschungsfrage 1.5 in diesem Abschnitt beantwortet werden. Eine ausführliche *Beschreibung ausgewählter Produktfunktionen*

sowie deren Neuentwicklungs- oder Übernahmeanteils entlang der verschiedenen Generationen des Porsche 911 findet sich aufgrund des Umfangs in Anhang E.1.1.

In der aktuellen Produktgeneration, dem 911 Typ 992 wurde die Produktfunktion des Vorgängers durch eine Ausprägungsvariation aus dem Referenzsystem zu „*Fahrzeugaerodynamik und -kühlung aktiv regeln*“ weiterentwickelt. Zusätzlich zu ausfahrbaren Frontspoiler sowie dem ausfahr- und verstellbaren Spaltflügel am Heck wurden aktive, stufenlos verstellbare Kühlluftklappen über eine Prinzipvariation aus physischer Sicht der Produktfunktion hinzugefügt. Ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 70 km/h werden die Kühlluftklappen zur Optimierung des c_w -Werts so weit wie möglich geschlossen, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Oberhalb von 150 km/h öffnen sich die Kühlluftklappen zur Verbesserung der aerodynamischen Balance und Anströmung der Kühler. Die Leistungsfähigkeit (i.S.v. aerodynamischer Wirksamkeit der Gestalt) bzw. Qualität der Funktionserfüllung (bspw. schnelleres Ein- und Ausfahren) des Frontspoilers wurde aus physischer Sicht neuentwickelt. Dem Heckspoiler wurden zwei weitere Positionen spendiert, die das Produktverhalten einerseits hinsichtlich Effizienz und andererseits in Bezug auf eine höhere Heckstabilität bei nasser Fahrbahn optimieren. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 6.2 veranschaulicht. Gleichermäßen wurde die Produktfunktion in weitere Produktlinien – wie bspw. den Cayenne (Typ 536) – integriert. (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2020a; Soja, Thomas & Kleiner, 2019)

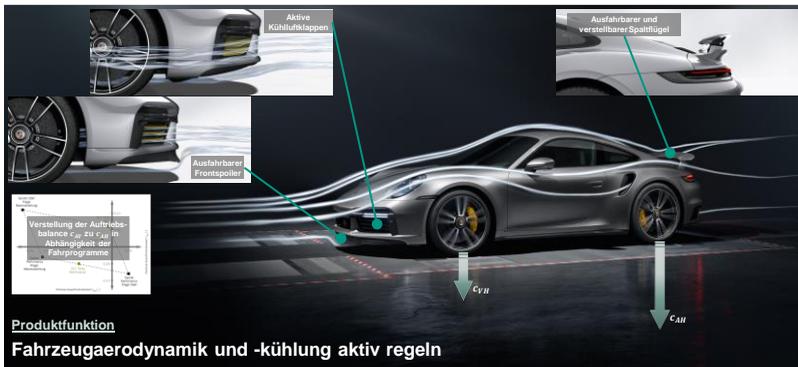


Abbildung 6.2: Veranschaulichung der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik und -kühlung aktiv regeln*“ am Beispiel des Porsche 911 Turbo (Typ 992)⁷⁸

⁷⁸ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Zur Veranschaulichung der komplexen, funktionalen Wirkstrukturen wird im Folgenden die Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ anhand des *Produktfunktions-Modells* (vgl. Abbildung 5.12 in Abschnitt 5.1.5.4) kurz erläutert. Die lösungsoffene Wirkbeziehung der Produktfunktion lässt sich durch den Kausalzusammenhang zwischen initiierten Ereignissen und resultierenden Ergebnissen beschreiben. Die Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ kann folglich durch den Kunden bzw. Anwender (hier Fahrer) direkt beeinflusst oder initiiert werden – z.B. mittels des Ereignisses „*Fahrer verstellt Fahrprogramm auf Sport+*“ bzw. „*Fahrer betätigt die Spoiler-Taste*“. In beiden Fällen führt eine Interaktion des Fahrers mit unterschiedlichen Bedienschnittstellen zu Initiierung oder Beeinflussung der Produktfunktion. Das Ausführen der Produktfunktion ruft nachfolgend verschiedene Ergebnisse hervor (bspw. „*Fahrzeugaerodynamik-Elemente werden in Performance-Position verstellt*“). In einem anderen Fall kann das Ereignis „*Fahrzeug fährt in Parkhaus ein*“ in einer Verstellung der Fahrzeugaerodynamik-Elemente in ihrer Position mit dem höchsten Bodengefreigang (i.S.v. Ergebnis) resultieren. Mittels der resultierenden Ereignisse wird somit das vom Fahrer gewünschte Produktverhalten realisiert und der Sportwagen ist bspw. einsatzbereit für die Rennstrecke oder kann die Rampen im Parkhaus bedenkenlos hochfahren.

Während des Rennstreckenbetriebs kann der Fahrer das Produktverhalten anhand der tatsächlichen Ausprägungen von (Produkt-)Eigenschaften wie Kurvenverhalten, Längs- und Querschleunigung sowie Fahrstabilität erleben und wahrnehmen. Gleichmaßen kann das Ergebnis dem Fahrer in diesem Zusammenhang mittels einer visuellen, auditiven oder taktilen Schnittstelle signalisiert werden. Im dargestellten Beispiel kann die Performance-Position der verstellbaren Fahrzeugaerodynamik-Elemente visuell im Kombiinstrument angezeigt werden. Die Wahrnehmung der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ ist individuell interpretierbar und führt unter Berücksichtigung der individuellen Psychologie und Physiologie des Fahrers im besten Fall zu Begeisterung oder Zufriedenheit. Ein Fahranfänger, der das erste Mal einen 911 auf der Rennstrecke bewegt, wird Eigenschaftsausprägung (bspw. maximale Querschleunigung) aller Wahrscheinlichkeit nach andersartig wahrnehmen als ein erfahrener Berufs-Rennfahrer. Analog dazu formen die beiden Personen unterbewusst und/oder bewusst verschiedenartige Erwartungen an zukünftige Eigenschaftsausprägung (bspw. „*Steigerung der Fahrstabilität*“ beim Fahranfänger oder „*Erhöhung Schwimmwinkelgradient zur Optimierung der Heckstabilität im linearen Querschleunigungsbereich*“ beim Rennfahrer) auf Basis ihrer individuellen Erlebnisse. Die ausgebildeten Erwartungen sind es, die wiederum das individuelle Verhalten des Fahrers in Interaktion mit der Produktfunktion beeinflussen. Die Ausprägung der Produktfunktion kann gemäß dem hierarchischen und/oder strukturalen Konzept durch den Produktentwickelnden als „*Vorhaben*“ festgelegt werden. Im Fall der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ können weitere inhärente Produktfunktionen wie bspw.

„Fahrzeuggeschwindigkeit feststellen“, „Fahrprogramm wechseln“ oder „Fahrzeugbodenfreigang einstellen“ in der Ausprägung herangezogen werden. Die Vernetzung der Produktfunktion und ihren realisierenden, technischen Funktionen aus Produktentwickelnden-Sicht erfolgt anhand von Wirkdiagrammen. Die technischen Funktionen wie bspw. „Spoilerantrieb regeln“ oder „Pneumatischen Betriebsdruck bereitstellen“ sind jeweils an konkrete, physische Elemente geknüpft und beschreiben dahingehend eine lösungsspezifische Wirkbeziehung zwischen Stoff-/Energie- und/oder Informationsflüssen. Die physischen Elemente beeinflussen durch ihre Gestalt den Luftfluss um und im Fahrzeug so, dass die Fall-abhängige Spreizung zwischen Alltagstauglichkeit und Fahrdynamik durch die Produktfunktion realisiert werden kann.

Zusammenfassend zeigt die Fallstudie, dass sich die phänomenologischen Charakteristika der Variationsarten von physischen Elementen über den entwickelten generischen Variationsoperator im Modell der PGE auf Produktfunktionen übertragen lassen. Damit sind ebenso die „funktionalen“ Übernahme- und Neuentwicklungsanteile analog der PGE-Formel berechenbar (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Beispiele der Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik zeigen, dass die gleichen Funktionalitäten in verschiedenen Produktlinien des Produktportfolios zum Einsatz kommen. Eine Übernahmevariation (ÜV) einer Produktfunktion kann jedoch bedingen, dass die Gestalt der realisierenden physischen Elemente (bspw. Heckspoiler, Spoilerantrieb, usw.) variiert werden. Daher müssen beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen die Anforderungen aller relevanten Produktlinien frühzeitig berücksichtigt werden, um Synergieeffekte zu identifizieren und unbeabsichtigten Integrationsaufwand zu vermeiden.

6.2.3 Evaluation des generischen Referenz-Produktmodells zum Spezifizieren der Produktfunktion eines Sportwagens

In diesem Abschnitt soll – aufbauend auf der vorangehenden Evaluation von Produktfunktions- und Variationsverständnis – das *generische Referenz-Produktmodell* (vgl. Abbildung 5.15 in Abschnitt 5.2) beim Spezifizieren von Produktfunktionen beurteilt werden. Zu diesem Zweck soll bewertet werden, inwieweit sich die zentralen Entwicklungsaktivitäten und Zusammenhänge von Objektanalyse, Zielsynthese, Zielanalyse und Objektsynthese als Strukturierungsframework des Spezifizierens einer Produktfunktion eignen. In diesem Zuge soll die Forschungsfrage 2.4 beantwortet werden. Die nachfolgenden Schilderungen des Übertrags der Prinzipvariation „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ im generischen Referenz-Produktmodell rekonstruieren die Entwicklung dieser Produktfunktion der Fahrzeugaerodynamik auf Basis der Publikationen Gönüldinc & Hölzel (2014) und Meder, Wiegand & Pfadenhauer (2014) am Beispiel der automobilen Produktgeneration unter der unternehmensinternen Bezeichnung Porsche 911 Turbo (Typ 991) – im Folgenden analog der Ontologie im Modell der PGE

als Produktgeneration G_n bezeichnet. Die Produktgeneration G_n befand sich somit zum damaligen Zeitpunkt in der Entwicklung und sollte als nächstes in den Markt eingeführt werden. Die nachfolgenden Zusammenhänge und Ausprägungen von bspw. Eigenschaften oder Merkmalen stammen aus den genannten Publikationen, sind exemplarisch in Expertengesprächen oder durch den Autor quantifiziert worden.

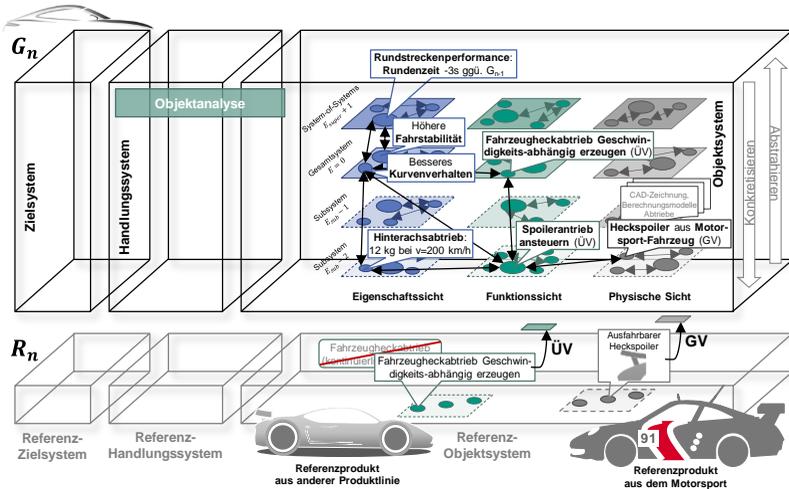


Abbildung 6.3: Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Objektanalyse im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „Fahrzeug-aerodynamik aktiv regeln“ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirscher, Fahl et al. (2020, S. 363)

In der Frühen Phase der Entwicklung der Produktgeneration G_n bzw. des 911 Turbo (Typ 991) wurden durch die **Objektanalyse** zunächst relevante Ziele, Anforderungen und Randbedingungen identifiziert, die entweder über die Elementtypen der Eigenschaften, Funktionen sowie physischen Elemente oder deren Verknüpfungen und Wechselwirkungen expliziert werden können (vgl. Abbildung 6.3). Durch vorausgehende Aktivitäten wurde der Lösungsraum bereits so weit eingegrenzt, sodass bspw. der Heckspoiler eines Motorsport-Fahrzeugs durch Gestaltvariation aus dem Referenz-Objektsystem in die physische Sicht der Produktgeneration G_n (911 Turbo Typ 991) übertragen wurde. In diesem Zuge wurden u.a. bereits erste Teilergebnisse oder Objekte der Produktgeneration (z.B. CAD-Zeichnung des Heckspoilers oder Berechnungsmodell zur Simulation des generierten Abtriebs) erzeugt. In der „Momentaufnahme“ der Objektanalyse sind zudem erste Verknüpfungen der wesentlichen Elemente aus den drei Systemsichten auf Grundlage der Wissensbasis der

Produktentwickelnden und den Aktivitäten des *Abstrahierens* und *Konkretisierens* dargestellt (vgl. Abbildung 6.3). Eine technische Funktion „*Spoilerantrieb ansteuern*“ auf der Subsystem-Ebene $E_{sub} - 1$ war bspw. aus der Vorgänger-Produktgeneration G_{n-1} bekannt und nutzbar, um den Heckspoiler aus- oder einzufahren. Auf Gesamtfahrzeugebene ($E = 0$) kann so insgesamt die Produktfunktion „*Fahrzeugeheckabtrieb Geschwindigkeits-abhängig erzeugen*“ in ihrer Ausprägung realisiert werden. Diese Produktfunktion wurde bereits in der Vorgänger-Generation sowie weiteren Produktlinien eingesetzt und befindet sich daher ebenfalls im *Referenz-Objektsystem*. Gleichermäßen weiß der Produktentwickelnde bspw. aus Windkanaltests der Vorgänger-Produktgeneration oder ersten, virtuellen oder physischen Prototypen vorangehender Analyse-/Syntheseschritte, dass der betrachtete Heckspoiler einen Hinterachsabtrieb von 12 [kg] bei $v = 200$ [km/h] verwirklichen kann. Durch Berücksichtigung verschiedener *Stakeholder* (u.a. Kunde, Anwender, Anbieter) im Handlungssystem konnte der Produktentwickelnde die Analyseergebnisse des Objektsystems gegenüber der *Stakeholder-Wahrnehmung* bewerten, was zur Erweiterung seiner individuellen Erkenntnisse führte. Auf höheren Systemebenen verursachte dies aus Eigenschaftssicht im Vergleich zu bereits gebildeten Zielsystem-Elementen bspw. besseres Kurvenverhalten, höhere Fahrstabilität oder optimierte Rundstreckenperformance. Sofern die *Stakeholder-Erwartungen* ausreichend *objektiviert* waren (bspw. Rundstreckenperformance: Rundenzeit Nürburgring-Nordschleife -3 [s] gegenüber Vorgänger-Produktgeneration G_{n-1}), konnten die Produktentwickelnden die Zielsystem-Elemente während des Entwicklungsprozesses kontinuierlich *verifizieren* und die *Wissensbasis im Handlungssystem erweitern*. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Die *Objektanalyse* leistete daher einen wesentlichen Beitrag zur *Validierung* der Produktgeneration G_n bzw. des 911 Turbo (Typ 991). Identifizierte, technische Konflikte im Objektsystem müssen durch Anpassung der Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen in den folgenden Synthese-/Analyseschritten unter Berücksichtigung des Handlungssystems jedoch weiter aufgelöst werden.

Die **Zielsynthese** findet durch *Festlegung von neuen Zielen* (bspw. durch Fall-spezifisch gewonnenes Wissen), *Verfeinerung i.S.v. Konkretisierung bestehender Ziele* (bspw. entlang der Systemebenen) oder *Änderung bestehender Ziele* (bspw. aufgrund der Erkenntnisse von *Verifikation*) durch den Produktentwickelnden statt. Im Beispiel der Zielsynthese des 911 Turbo (Typ 991) wurden in der Frühen Phase der Entwicklung der Produktgeneration G_n sehr vage Eigenschaften im Zielsystem weiter konkretisiert (vgl. Abbildung 6.4). Informationen über *interne RSE* (bspw. der direkte Vorgänger G_{n-1}), aber auch *externe RSE* – wie z.B. Fahrzeuge der Kern-Wettbewerber des 911 Turbo – dienten der relativen Zielbildung. Auf der Gesamtfahrzeugebene $E = 0$ konnte so bspw. eine Verbesserung der Fahrstabilität bei v_{max} und der maximalen Querbeschleunigung um jeweils +5% aus Eigenschaftssicht im Zielsystem synthetisiert werden.

Dies ist in der „*Momentaufnahme*“ der Zielsynthese in Abbildung 6.4 veranschaulicht. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

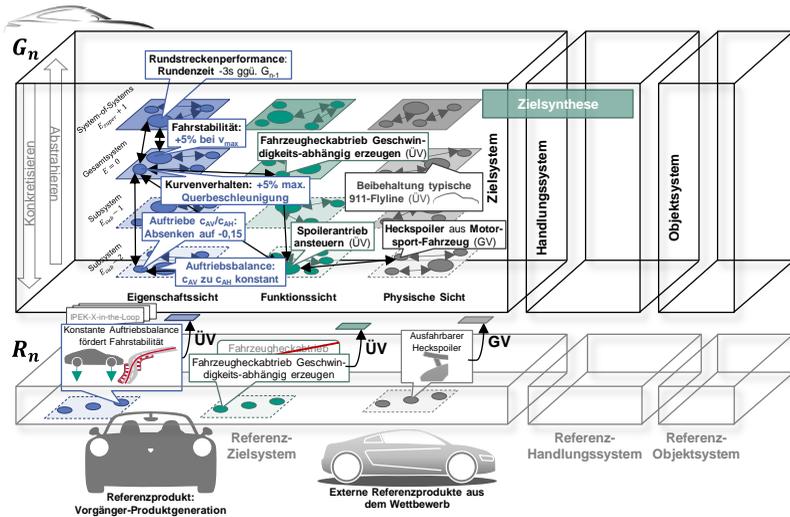


Abbildung 6.4: Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Zielsynthese im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeug-aerodynamik aktiv regeln*“ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 364)

Gleichermaßen konnte ebenso bspw. die Beibehaltung der Porsche-typischen Flyline des 911 aufgrund der *Wissensbasis* über die *Stakeholder-Erwartungen* (hier von Kunde/Anwender) im Handlungssystem entschieden und festgelegt werden. Im Referenz-Zielsystem fanden sich eine Vielzahl *interner, aber auch externer (potenzieller) RSE*, die von entscheidender Bedeutung für die Zielsynthese sind. Zielsysteme anderer Produktgenerationen (teilweise noch in der Entwicklung), aber ebenso externe, nicht explizite, aber rekonstruierbare Informationen, wurden in der Zielsystembildung des 911 Turbo (Typ 991) berücksichtigt. Aus solchen Elementen im Referenz-Zielsystem konnte bspw. die Erkenntnis, dass eine konstante Auftriebsbalance zwischen Vorder- (c_{AV}) und Hinterachse (c_{AH}) die Fahrstabilität fördert, durch den Produktentwickelnden in die Produktgeneration G_n übertragen werden. Aus diesem Wissen konnten dann z.B. die Ziele „*Auftriebsbalance c_{AV} zu c_{AH} konstant*“ festgelegt oder „*Auftriebe c_{AV} und c_{AH} um 0,07 gegenüber der Vorgänger Produktgeneration G_{n-1} absenken auf jeweils -0,15*“ aus Eigenschaftsicht in entsprechender Subsystem-Ebene $E_{Sub} - 2$ konkretisiert werden. Wesentlich war, dass die Zielsystem-Elemente ausreichend *objektiviert* waren, sodass diese für die *Validierung zugänglich* sind. Die Validierung im

Entwicklungsprojekt lieferte (bspw. über Ansätze vergleichbar mit IPEK-X-in-the-Loop, vgl. Abschnitt 2.1.3.4) kontinuierlich neue Informationen, die berücksichtigt werden.

Durch die Aktivität der *Zielsynthese* wurden folglich Zielsystem-Elemente der Produktgeneration G_n bzw. des 911 Turbo (Typ 991) unter Berücksichtigung bereits *analysierter Objektsystem-Elemente* und des *Referenzsystems* mit der *Wissensbasis im Handlungssystem validiert*. Durch die konsequente Nutzung des Referenzsystems konnte die Berücksichtigung der Nutzen verschiedener Stakeholder unterstützt und damit die *Validität der Validierung* erweitert werden. Die Vielzahl an synthetisierten Zielen, Anforderungen und Randbedingungen in unterschiedlicher Granularität wurden über die Sichten und Ebenen systematisch strukturiert, priorisiert und die Produktgeneration des 911 Turbo (Typ 991) an dieser Stelle für den *Kreationsschritt* bzw. die folgende *Zielanalyse* vorbereitet. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

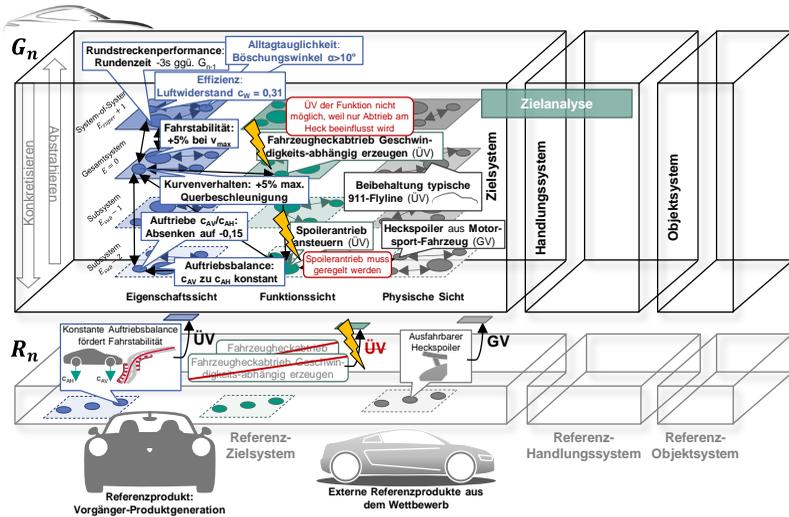


Abbildung 6.5: Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Zielanalyse im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 365)

In der **Zielanalyse** des 911 Turbo (Typ 991) in der Frühen Phase der Entwicklung der Produktgeneration G_n konnten über das Verständnis der *Wechselwirkungen zwischen Zielsystem-Elementen* die *relevanten Zielkonflikte identifiziert* werden. Die Analyse bereits gebildeter Soll-Eigenschaften oder Produktfunktionen sowie bspw. kommuni-

zierte Eigenschaften von Wettbewerbern konnte weitere, zu berücksichtigende Zusammenhänge aufdecken (vgl. Abbildung 6.5). Im Beispiel des 911 Turbo (Typ 991) konnten auf Supersystem-Ebene $E_{Super} + 1$ z.B. festgestellt werden, dass Ziele der Alltagstauglichkeit sowie Effizienz maßgeblich mit der Fahrzeugaerodynamik einhergehen. Für die Produktgeneration G_n sollte bspw. ein um $2,5^\circ$ größerer Böschungswinkel α gegenüber G_{n-1} realisiert werden, damit der 911 Turbo (Typ 991) parkhaus-tauglich ist und bleibt. Der c_w -Wert von 0,31 aus der Vorgänger-Produktgeneration sollte beibehalten werden, um den Kraftstoffverbrauch zu begrenzen. Wie in der „*Momentaufnahme*“ der *Zielanalyse* dargestellt, konnte der Produktentwickelnde die Analyseergebnisse bewerten und feststellen, dass eine *Übernahmevariation* der Produktfunktion „*Fahrzeugheckabtrieb Geschwindigkeits-abhängig erzeugen*“ im Konflikt zu den Zielen aus Eigenschaftssicht steht (vgl. Abbildung 6.5). Darüber hinaus verlangt die technische Funktion „*Spoilerantrieb ansteuern*“ eine Weiterentwicklung, sodass nicht nur ein Aus- und Einfahren, sondern verschiedene Positionen und Anströmwinkel des Spoilers geregelt werden können. Durch die Berücksichtigung verschiedener *Stakeholder* (u.a. Kunde, Anwender und Anbieter) im Handlungssystem ist der Produktentwickelnde damit in der Lage, *validierungsgetrieben zu kreieren*. Bei ausreichender *Objektivierung der Stakeholder-Erwartungen* (bspw. „*mit parkhaustauglichem Böschungswinkel genügend Abtrieb auf der Vorderachse generieren*“) konnte der Produktentwickelnde die *Objektsystem-Elemente* kontinuierlich *verifizieren* und den *Lösungsraum im Handlungssystem systematisch eingrenzen*. Zudem unterstützt eine Objektivierung der Elemente des Zielsystems die *Einschränkung des individuellen Interpretationsspielraums* eines Produktentwickelnden und die *Vereinheitlichung unterschiedlicher mentaler Modelle* der beteiligten Akteure. Weitere identifizierte Abhängigkeiten der Zielsystem-Elemente waren bspw. die Vernetzung der Produktfunktion zur aktiven Dämpferregelung oder dem Öffnen und Schließen des Verdecks in der Cabrio-Produktvariante des 911 Turbo (Typ 991). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Die *Zielanalyse* stellte damit die Grundlage zur weiteren *Kreation* der Produktgeneration G_n bzw. des 911 Turbo (Typ 991) dar. Identifizierte Zielkonflikte müssen durch Anpassung von Zielsystem-Elementen in den folgenden Synthese-/Analyseschritte unter Berücksichtigung des Handlungssystems jedoch weiter aufgelöst werden.

Durch die Aktivität der **Objektsynthese** wurden *Lösungen* des 911 Turbo (Typ 991) durch die *mentale, virtuelle und physische Modellierung von Prinzip und Gestalt* bzw. *Ausprägung aus Eigenschafts-, Funktions- und physischer Sicht* durch *Kreation des Produktentwickelnden im Objektsystem expliziert* (vgl. Abbildung 6.6). An dieser Stelle konnten die kreierte Funktions-Gestalt-Zusammenhänge bspw. über den *C&C²-Ansatz* (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) für die Produktgeneration G_n modelliert werden. Diese Kreation erzeugte eine Vielzahl an *Modellen* und *Teilergebnissen* zur Berücksichtigung in der Produktgeneration G_n . In der *Zielanalyse identifizierte Analogien im Referenzsystem*

tem führten beim 911 Turbo (Typ 991) bspw. zur Creation eines flexiblen, pneumatischen Frontspoilers durch Prinzipvariation, über den einerseits der Böschungswinkel sowie andererseits die Auftriebskraft an der Vorderachse beeinflusst werden kann (vgl. Abbildung 6.7). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

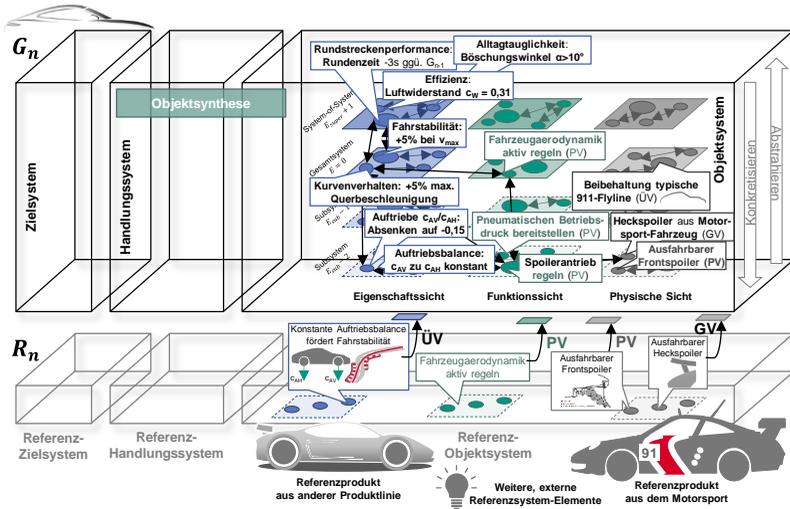


Abbildung 6.6: Beispielhafte „Momentaufnahme“ der Objektsynthese im generischen Referenz-Produktmodell am Beispiel der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ des 911 Turbo (Typ 991) – Darstellung in Anlehnung an Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020, S. 365)

Das Grundelement des Frontspoilers besteht dabei aus einem flexiblen und hochbelastbaren Grundwerkstoff (Elastomere) und wird durch drei aufblasbare Pneumatik-Luftkammer-Elemente aktuiert. Die pneumatische Verstellung in Kombination mit dem Elastomer realisiert eine hohe geometrische Variabilität und schützt gleichzeitig vor Beschädigungen bspw. beim Überfahren von hohen Bordsteinkanten. Die Neuentwicklung des Heckspoilers aus einem Motorsport-Fahrzeug ersetzte das hydraulische Aus- und Einfahrssystem mit festem Endanschlag durch zwei getrennt steuerbare Elektromotoren zur stufenlosen Einstellung von Ausfahrhöhe und Anstellwinkel in Abhängigkeit von Fahrzustand und/oder gewähltem Fahrprogramm. Die Prinzipvariation der technischen Funktion „Spoilerantrieb regeln“ sowie „Pneumatischen Betriebsdruck bereitstellen“ leisteten auf Subsystem-Ebene $E_{Sub} - 2$ bspw. einen Beitrag zur Realisierung der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ auf Gesamtfahrzeug-

gebene $E = 0$. Diese in der Objektsynthese kreierte Produktfunktion der Produktgeneration G_n bzw. des 911 Turbo (Typ 991) stellte damit eine *Prinzipvariation aus Funktionssicht* dar.

Dies zeigte sich besonders eindrucksvoll u.a. in C&C²-Modellen der in Abbildung 6.7 dargestellten physischen Elemente (Front- und Heckspoiler). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020; Meder, Wiegand & Pfadenhauer, 2014)

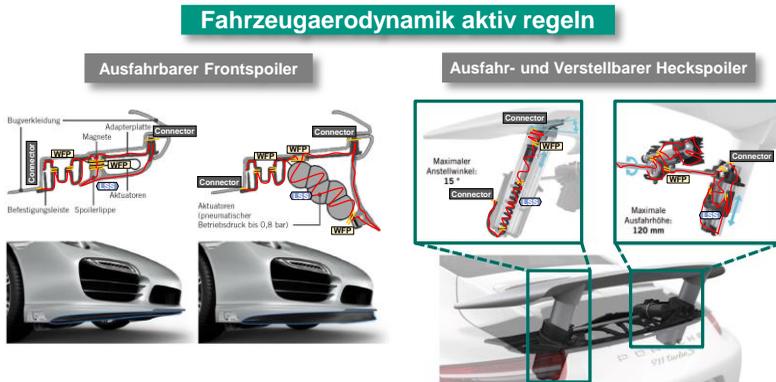


Abbildung 6.7: Prinzipdarstellung der realisierenden, physischen Elemente der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ des 911 Turbo (Typ 991) auf Basis von Meder, Wiegand & Pfadenhauer (2014, S. 62)⁷⁹

Im Rahmen des *ingeschränkten Lösungsraums im Handlungssystem* wurden in der *Objektsynthese* folglich *Objektsystem-Elemente* des 911 Turbo (Typ 991) unter Berücksichtigung *analysierter Elemente im Zielsystem* über den *generischen Variationoperator* (ÜV, AV, PV) auf Basis des *Referenzsystems R_n* der *Produktgeneration G_n* kreierte. Die konsequente Nutzung des Referenzsystems förderte die Objektsynthese durch die Produktentwickelnden, unterstützt die *Realisierung des Nutzens der Stakeholder, ohne die Kreativität einzuschränken*. Die Vielzahl an synthetisierten Objekten in unterschiedlicher Granularität wurden über die Sichten und Ebenen systematisch strukturiert, priorisiert und die Produktgeneration des 911 Turbo (Typ 991) an dieser Stelle für den *Validierungsschritt* bzw. die folgende *Objektanalyse* vorbereitet. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

⁷⁹ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

6.2.4 Evaluation ausgewählter Inhalte des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung

Anknüpfend an sowohl die Evaluation des Verständnisses von Produktfunktionen sowie des generischen Variationsoperators (vgl. Abschnitt 6.2.2) als auch die Anwendbarkeit des generischen Referenz-Produktmodells (vgl. Abschnitt 6.2.3) in der Sportwagenentwicklung erfolgt nachfolgend die Anwendung ausgewählter Inhalte und Methoden des Referenzprozesses zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen in der automobilen Produktentwicklungspraxis.

6.2.4.1 Studiendesign und -vorgehen

Über einen Zeitraum von 11 Monaten wurde eine *Fallstudie* (vgl. Anhang B.6) zur Untersuchung der Anwendbarkeit der entwickelten, prozessualen und methodischen Entwicklungsunterstützung des Produktentwickelnden in Form einer *teilnehmenden Beobachtung* (vgl. Anhang B.1) in sowohl der Konzeptentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) als auch teilweise mit Schnittstellen zu der Volkswagen AG (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) durchgeführt. Die teilnehmenden Beobachter waren dabei in der prozessualen und methodischen Anwendung der Generierung und Priorisierung von Funktionsideen sowie die Spezifikation einzelner Produktfunktionen integriert. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Fallstudie sollen zur Beantwortung der Forschungsfrage 3.6 beitragen. Zu diesem Zweck sind die ausgewählten Inhalte der Anwendbarkeitsevaluierung in der Darstellung der vier Phasen des Referenzprozesses (vgl. Abschnitt 5.3.2.4) hervorgehoben (vgl. Abbildung 6.8).

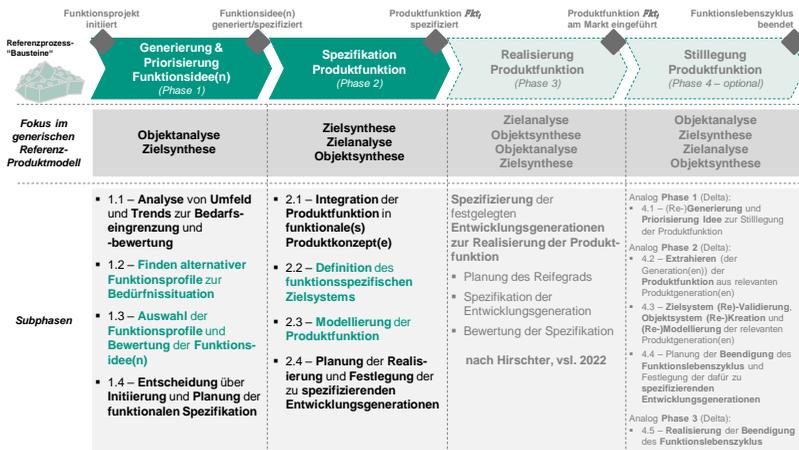


Abbildung 6.8: Einordnung der Fallbeispiele in die vier Phasen des Referenzprozesses zum Spezifizieren von Produktfunktionen

Aufbauend auf den Ergebnissen einer extern durchgeführten Umfeld- und Trendanalyse zur objektiven Bedarfseingrenzung und -bewertung wurde im Rahmen der Evaluation des Referenzprozesses zunächst Produktportfolio-übergreifende Workshops zur Definition alternativer Funktionsprofile im Volkswagen Konzern durchgeführt [Subphase 1.2]. Anschließend daran wurde eine Abschätzung des Innovationspotenzials aus Eigenschaftssicht sowie einer Produktportfolio-übergreifenden Funktionsideen-Priorisierung (insbesondere am Beispiel von Connected Car Umfängen) über Workshops und Expertengespräche sowohl in den einzelnen Marken des Volkswagen Konzerns als auch übergreifend realisiert [Subphase 1.3]. An dieser Stelle wurde das Vorgehen punktuell in spezifischen Produktgenerationen pilotiert. Die Entscheidungen über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation finden weiterhin kontinuierlich statt und werden im Rahmen dieser Evaluation jedoch nicht weiter betrachtet. Ausgewählte Funktionsideen als auch weiterzuentwickelnde Produktfunktionen wurden teilweise Produktgeneration-spezifisch, aber ebenso Produktportfolio-übergreifend hinsichtlich des funktionsspezifischen Zielsystems in verschiedenen Entwicklungsprojekten spezifiziert [Subphase 2.2]. Im Folgenden wurde beispielhaft für die Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ eine Modellierung sowohl funktionspezifisch in Microsoft PowerBI, als auch in No Magic Cameo Systems Modeler zur Integration in Produktmodelle verschiedener Fahrzeugprojekte pilotiert [Subphase 2.3]. Die dritte und vierte Phase kann aufgrund zeitlicher Restriktionen in dieser Forschungsarbeit nicht evaluiert werden.

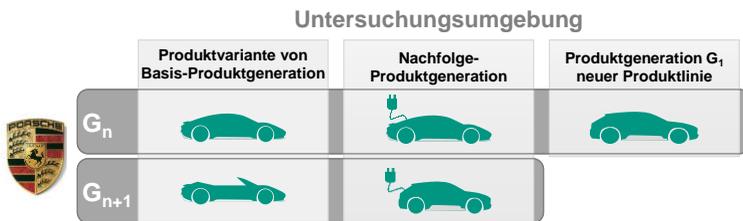


Abbildung 6.9: Übersicht der betrachteten, automobilen Entwicklungsprojekte der Untersuchungsumgebung in der Fallstudie in Anlehnung an Heitger (2019, S. 115)⁸⁰

Im Rahmen der Evaluation des Referenzprozesses wurden verschiedene automobiler Produktgenerationen betrachtet, die sich – wie in Abbildung 6.9 dargestellt – in die Entwicklung von *Produktvarianten existierender Basis-Produktgenerationen*, *Nachfolge-Produktgenerationen* bzw. *Produktgenerationen neuer Produktlinien* (i.S.v. G₁, vgl. Albers, Ebertz, Rapp et al. (2020)) gliedern lassen (Heitger, 2019).

⁸⁰ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

6.2.4.2 Ergebnisse und Diskussion der Evaluation

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Evaluation des Referenzprozesses entsprechend der jeweiligen Phase bzw. Subphase vorgestellt und diskutiert. Aufgrund von Geheimhaltung werden einige der Ergebnisse in der vorliegenden Forschungsarbeit nur qualitativ oder abstrahiert beschrieben, da entsprechende Produktfunktionen zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit erst in fünf oder teilweise mehr als zehn Jahren am Markt eingeführt werden.

Phase 1: Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n)

Im Kontext der Evaluation der ersten Phase des Referenzprozesses wurden drei Workshops im Volkswagen Konzern mit Vertretern aller Marken sowie der größten Absatzmärkte durchgeführt (vgl. Abbildung 6.10).

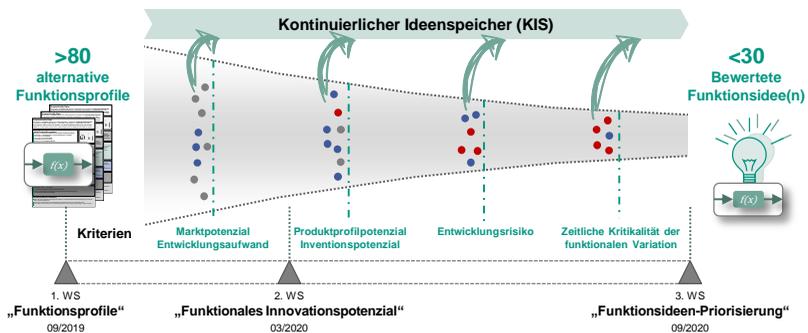


Abbildung 6.10: Ablauf und ausgewählte Ergebnisse der Anwendung der ersten Phase zur Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n)

In Vorbereitung auf den ersten Workshop „*Funktionsprofile*“ wurde extern eine umfassende Umfeld- und Trendanalyse mit dem Fokus auf 2025+ vorgenommen, um einerseits den Bedarf der Stakeholder einzugrenzen und andererseits Bedürfnisse zu bewerten. Auf Basis der Ergebnisse, die zu Beginn des Workshops vorgestellt wurden, fokussierte der erste Workshop die systematische Entwicklung bzw. Definition alternativer Funktionsprofile über Werkzeuge wie bspw. User Journeys, Persona-Methode oder weitere Kreativitätstechniken wie die SCAMMPERR-Methode (vgl. Subphase 1.2 in Abschnitt 5.3.3.2). Resultat des Workshops waren mehr als 80 *Produktportfolio-übergreifende, alternative Funktionsprofile*. Nachdem sowohl Marktpotenzial als auch Entwicklungsaufwand im Nachgang an den ersten Workshop mit Vertriebs- und Finanzexperten der einzelnen Marken und Märkten abgeschätzt wurde, fand ein zweiter Workshop „*Funktionales Innovationspotenzial*“ in großer Runde im Volkswagen Kon-

zern statt (vgl. Subphase 1.3 in Abschnitt 5.3.3.3). Ziel war es, das Entwicklungspotenzial unter Einbeziehen der Sichtweisen aller Marken und Märkte abzuleiten. Aus Eigenschaftssicht wurden hierbei jeweils Kundenrelevanz nach Kano, Seraku, Takahashi et al. (1984), Anbieternutzen, Wettbewerbspositionierung und Variationsart der Produkteigenschaften konkretisiert. Die Funktionsidee als auch technische Lösung wurden ebenso hinsichtlich Variationsart sowie Herkunft und Neuentwicklungsanteil des Referenzsystem-Elements (RSE) bewertet. Die initialen Ergebnisse des Workshops wurden anschließend in den einzelnen Marken plausibilisiert und darüber hinaus Entwicklungsrisiko sowie die zeitliche Kritikalität der funktionalen Variation im Abgleich mit dem Zyklusplan des Produktportfolios determiniert. In einem dritten Workshop „*Funktionsideen-Priorisierung*“ wurde schließlich die Priorisierungslogik über Weighted-Shortest-Job-First (WSJF) am Beispiel der Funktionsideen aus dem Themenfeld „*Konnektivität und Infotainment*“ evaluiert. Die Priorisierung wurde aus einer Produktportfolio-übergreifenden Sicht durchgeführt, um die Inhalte und Erkenntnisse greifbar zu machen. Gleichzeitig wurde das Vorgehen ebenso in der Entwicklung einer Produktgeneration pilotiert. Schlussendlich lagen somit *30 bewertete Funktionsideen* vor, die „ausortierten“ alternativen Funktionsprofile wurden jeweils nicht gänzlich verworfen, sondern in einen Kontinuierlichen Ideenspeicher (KIS) überführt.

Das strukturierte Vorgehen über die Subphasen der ersten Phase des Referenzprozesses zum Spezifizieren aus Funktionssicht in stetig diversifizierenden Produktportfolios unterstützte die systematische Entwicklung alternativer Funktionsprofile, Abschätzung von Marktpotenzial, Entwicklungsaufwand, Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiko. Darüber hinaus konnten damit transparente und objektivierte Entscheidungen über die Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation von generierten und über das Konsent-Prinzip priorisierten Funktionsideen gefördert werden.

Phase 2: Spezifikation Produktfunktion

Die Anwendung der Entwicklungsunterstützung der zweiten Phase wurde ausschließlich bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG evaluiert. Zu diesem Zweck wurde wiederum die Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ als Anwendungsbeispiel verwendet. Die Produktfunktion wird Produktportfolio-übergreifend sowohl in zahlreichen funktionalen Produktkonzepten als auch Produktgenerationen am Markt und in der Entwicklung integriert und umgesetzt. In einem ersten Schritt wurde dazu das funktionspezifische Zielsystem (vgl. Subphase 2.2 in Abschnitt 5.3.4.2) über den Funktionssteckbrief (FSB) der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ Produktportfolio-übergreifend definiert (vgl. Abbildung 6.11). Dieser Funktionssteckbrief bildete die Grundlage für die Integration der Produktfunktion in mindestens drei Produktgenerationen (Produktvarianten einer Basis-Produktgeneration und zwei Nachfolge-Produktgenerationen). (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Die Ergebnisse aus der vorangehenden alternativen Lösungssuche bzw. Vorauswahl von Lösungsalternativen für die funktionale Weiterentwicklung und ggf. Stilllegung der Produktfunktion mündeten schließlich in der Definition der funktionspezifischen (Produkt-)Eigenschaften sowie physischen Elementen zur Realisierung in den drei Produktgenerationen. Die Informationen aus existierenden Funktionsideensteckbriefen (FISB) wurden als Grundlage dafür genutzt. Wie in Abbildung 6.11 ersichtlich, wird die Funktion zunächst insbesondere aus Kunden- bzw. Anwendersicht (hier Fahrer) beschrieben und Herkunft sowie Reife funktionaler RSE konkretisiert.

Produktfunktion	Generation	Funktionsverantwortlicher	Fachbereich	gPorsche 911 Turbo	...	1. Markteinführung	Ausblick Stilllegung
Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln	i	Mustermann, Max	EPA	X		09/2013	-
Funktionsbeschreibung	Funktionale Referenzsystem-Elemente		Mögliche Weiterentwicklung/Stilllegung				
Aktive Koordination der Um- und Durchdringung des Fahrzeuges zur Sicherstellung der maximalen Effizienz bzw. Performance je nach Betriebszustand mit hoher aerodynamischer Fahrsicherheit. Der Fahrer kann zudem über Fahrgrogramme definierte Strategien der Fahrzeugaerodynamik auswählen oder direkt bedienen.	<ul style="list-style-type: none"> Funktionalität der Fahrzeugaerodynamik aus dem Serienfahrzeug Porsche 918 Spyder sowie weiteren Motorsport-Fahrzeugen der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG 		* [...] + [...]				
Initiiierende Ereignisse	Resultierende Ergebnisse		Lösungsoffene Funktionsarchitektur				
<ul style="list-style-type: none"> Fahrer möchte sportliches Fahrverhalten festlegen Fahrer möchte effizientes Fahrverhalten festlegen Fahrzeug wird mit offenem Verdeck bewegt Fahrzeugverzögerung * [...]	<ul style="list-style-type: none"> Optimales Setup der Fahrzeugaerodynamik bspw. für gute Rundzeit auf der Rennstrecke Sportsparendes oder Reichweitenoptimiertes Fahren Kompensation der negativen, aerodynamischen Effekte durch offenes Verdeck auf Fahrsicherheit Aerodynamische Unterstützung zur Erreichung eines möglichst kurzen Bremswegs 						
Anforderungen	Initiiierende/beeinflusste Eigenschaften		Lösungsspezifische Funktionsarchitektur				
<ul style="list-style-type: none"> Parkhaus-tauglicher Böschungswinkel <10° * [...]			* [...]				
Validierung der Funktion durch ...	Physische Elemente						
<ul style="list-style-type: none"> Spoilersystem (Front/Heck), Kühlluftklappen, Verdecksystem inkl. Windschott oder Schiebedachsystem inkl. Windabweiser, [...] UX-Relevanz: Kombiinstrument, Centerdisplay, Fahrgrogrammschalter, [...] * [...]							
Relevant für Function-on-Demand <input type="checkbox"/> Relevant für Connect-Verbund <input type="checkbox"/>		Relevant für [...] <input checked="" type="checkbox"/>		Realisierung in E/E-Architektur A <input type="checkbox"/> Realisierung in E/E-Architektur C <input checked="" type="checkbox"/>		Realisierung in E/E-Architektur B <input type="checkbox"/> Realisierung in [...] <input checked="" type="checkbox"/>	

Abbildung 6.11: Beispielhafter Funktionssteckbrief (FSB) der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ des Porsche 911 Turbo (Typ 991) auf Basis von Meder, Wiegand & Pfadenhauer (2014) – Darstellung nach Fahl, Hirschter & Albers (2021, S. 9)

Ähnliche Funktionalitäten werden bspw. im Motorsport-Bereich der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG erfolgreich eingesetzt. Darunter findet sich einerseits die Konkretisierung der initiiierenden Ereignisse – i.S.v. Auslöser der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ – sowie andererseits die resultierenden Ergebnisse aus Kunden- und Anwendersicht. Das Beispiel verdeutlicht zudem, dass die Produktfunktion verschiedene Produkteigenschaften auf unterschiedlichen Systemebenen beeinflusst wie z.B. Rundstreckentauglichkeit, Alltagstauglichkeit oder aerodynamische Effizienz (vgl. u.a. Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018)). Zu berücksichtigende Anforderungen wie bspw. ein parkhaustauglicher Böschungswinkel oder notwendige Entwicklungsgenerationen

zur Validierung der Produktfunktion werden im FSB dargestellt oder verknüpft. Das Lösungsprinzip der aktiven Regelung der Fahrzeugaerodynamik kann zunächst über die lösungsoffene und -spezifische Funktionsarchitektur (Modellierung erfolgt im nächsten Schritt bzw. Subphase 2.3) konkretisiert werden. Die lösungsspezifische Funktionsarchitektur berücksichtigt dabei die physischen Elemente (wie bspw. Spoilersystem, Kühlluftklappen aber auch User Experience relevante Systeme wie das Kombiinstrument oder den Fahrprogrammschalter), die zur Realisierung der Produktfunktion wesentlich sind. Der Funktionssteckbrief der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ enthält folglich Informationen über RSE, Technologien sowie deren Neu- und Übernahmeanteilen und bildet damit die technische Lösung ab. Auf Grundlage des FSB kann eine detaillierte Modellierung und schlussendlich valide Bewertung der zu entwickelnden Produktfunktion hinsichtlich der relevanten Parameter (z.B. Eigenschaftserfüllung) sowie des technischen und ökonomischen Risikos stattfinden. In Zuge der Anwendung der Entwicklungsunterstützung in der Praxis zeigte sich zudem, dass die Definition eines Funktionsverantwortlichen im Sinne eines „*Single-Point-Of-Truth*“ (dt. ein einziger Punkt der Wahrheit) förderlich ist, um Transparenz über lösungsoffene und -spezifische Inhalte der Produktfunktion zu schaffen und das Propagieren von falschem Wissen zu vermeiden. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Im weiteren Verlauf der Evaluierung wurde die Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ modelliert (vgl. Subphase 2.3 in Abschnitt 5.3.4.3). Auf Grundlage des Funktionssteckbriefes wurden die Verknüpfungen und Schnittstellen der Produktfunktion zu den initiierenden und beeinflussten Produkteigenschaften, den Subfunktionen auf den Subsystem-Ebenen $E_{Sub} - 1$ und $E_{Sub} - 2$ sowie den notwendigen physischen Elementen funktionspezifisch in Microsoft PowerBI modelliert (vgl. Abbildung E.2). Die detaillierte Darstellung sowie die damit verbundenen Erörterungen finden sich aufgrund des Umfangs in Anhang E.1.2 sowie der Publikationen Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) und Fahl, Hirschter & Albers (2021).

Zum Abschluss der initialen Evaluation der zweiten Phase des Referenzprozesses wurde die Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ im No Magic Cameo Systems Modeler zur Integration in die Produktmodelle von zunächst zwei Fahrzeugprojekten in der Entwicklung modelliert. Ein beispielhafter Ausschnitt der Modellierung ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Die funktionspezifische Modellierung in Microsoft PowerBI wurde in ein konsistentes, interdisziplinäres SysML-Modell im Sinne des MBSE übertragen. Die Modellierung in No Magic Cameo Systems Modeler dient dazu, die Rückverfolgbarkeit (*engl.* traceability) und Transparenz nach Integration in ein Produktmodell zu gewährleisten. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

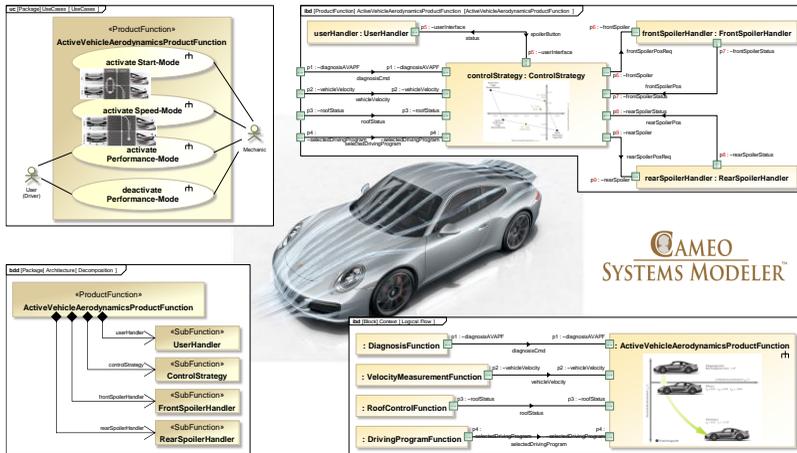


Abbildung 6.12: Beispielhafter Ausschnitt aus Produktmodell in No Magic Cameo Systems Modeler (Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 10)⁸¹

Sofern im MBSE-Modell alle komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Eigenschafts-, Funktions- und physischer Sicht hinterlegt sind, können automatisiert spezifische Sichten für Produktentwickelnde oder Anwendungsfälle auf nur einen Teil des Modells generiert werden. Diese Ausschnitte können wiederum die Ausgangsbasis für weitere Analysen, Simulationen oder Identifikation von Zielkonflikten sein (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Die methodische Modellierung (vgl. Subphase 2.3 in Abschnitt 5.3.4.3) wurde daher in der automobilien Produktentwicklungspraxis und insbesondere am Beispiel der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ angewendet, evaluiert und kritisch mit Experten bzgl. Anwendbarkeit und Nutzen diskutiert. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Weiterführende Erörterungen sowie kritische Diskussion zu den Chancen von MBSE in diesem Rahmen und Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation sowie neuartige Synergien in der Spezifikationsstruktur in MBSE finden sich in Anhang E.1.2 sowie der Publikation Fahl, Hirschter, Wöhrle et al. (2021)⁸².

⁸¹ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

⁸² Der Autor bedankt sich an dieser Stelle bei Hrn. Constantin Mandel vom IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für seinen Beitrag bezüglich seiner Arbeit im Bereich Model-Based Systems Engineering (MBSE) und zu Modellierungsframeworks sowie für die intensiven Diskussionen im Rahmen der Erstellung der Publikation. Des Weiteren dankt der Autor Hrn. Moritz Wäschle (IPEK) für die Diskussionen und seinen Input zur Publikation.

Zum Abschluss der Diskussion werden an dieser Stelle die Anwendungsprämissen der neuen Methode kritisch gewürdigt. Die initiale Anwendung in der automobilen Produktentwicklung bildete aufgrund des Fokus auf ausgewählte Umfänge nur vereinfacht die Komplexität eines Fahrzeugs und des zu Grunde liegenden Produktentwicklungsprozesses ab. Durch den erstmaligen Einsatz am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ konnte die übergreifende Wiederverwendbarkeit der Methode und Ergebnisse anhand von zwei Fahrzeugprojekten und den Experteninterviews bestätigt werden. Die durchgeführte Evaluation der Entwicklungsunterstützung liefert somit Anhaltspunkte für die praktische Anwendbarkeit und den Nutzen. Diese sind jedoch vorbehaltlich der vollumfänglichen, praktischen Anwendung zu werten.

6.2.5 Zwischenfazit

Mittels der Fallstudien sowie der teilnehmenden Beobachtungen und Experteninterviews in der Sportwagenentwicklung konnten die Forschungsfragen 1.5, 2.4 und 3.6 (vgl. Abschnitt 3.1.3) über eine Anwendbarkeitsevaluierung der entwickelten Systematik thematisiert werden. In Bezug zu den Abstraktionsgraden der Produktmodellierung (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) erfolgte zunächst die Evaluation der Instanziierung der entwickelten System-spezifischen Sprache (Funktionsverständnis und Variationsoperator im Modell der PGE) anhand realer Systemelemente (Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik) der Sportwagenentwicklung. Anschließend wurden Instanziierung und Individualisierung des generischen Referenz-Produktmodells in einer realen Produktgeneration des Porsche 911 am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ untersucht und bewertet. Im Hinblick auf die Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) wiederum erfolgte als Abschluss die Evaluation der Instanziierung und Individualisierung der entwickelten Domänen-bezogenen Aktivitätsmuster (Referenzprozess und methodische Unterstützung) in Implementierungsmodellen (Projektvorlagen i.S.v. Soll-Prozessen) und realen Anwendungsmodellen (aufgezeichnete Projektpläne i.S.v. Ist-Prozessen) in der Sportwagenentwicklung – jeweils Produktgenerations- und Domänen-spezifisch.

6.3 Studentisches Entwicklungsprojekt IP – Integrierte Produktentwicklung

In der zweiten Studie wird im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung neben der Anwendbarkeit ebenso der Erfolgsbeitrag der Systematik im studentischen Entwicklungsprojekt initial bewertet. Zu diesem Zweck wird das Funktionsverständnis und die prozessuale sowie methodische Unterstützung in einer Fragebogenstudie evaluiert.

Demzufolge steht die nachfolgende Forschungsfrage (FF) aus Abschnitt 3.1.3 im Mittelpunkt der Studie:

FF3.6 Wie effektiv kann der Produktentwickelnde einen Referenzprozess und die methodische Unterstützung in der automobilen Produktentwicklung anwenden?

Die in Abschnitt 6.3 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikation Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) veröffentlicht worden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vgl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden. Die empirischen Studien in den Publikationen und folglich diesem Abschnitt wurden teilweise in vom Autor Co-betreuten studentischen Abschlussarbeiten Haag (2020)⁸³ und Staiger (2020)⁸³ am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers durchgeführt.

6.3.1 Studiendesign und -vorgehen in IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020

Die zweite Fallstudie wurde in einem Live-Lab (vgl. Anhang B.7) zur Untersuchung und Evaluation von Prozessen, Methoden oder Entwicklungswerkzeugen mit realistischen und praxisnahen sowie gleichzeitig kontrollierbaren Rahmenbedingungen in IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020 durchgeführt. Die Evaluation erfolgte hierbei über Fragebogen-gestützte Umfragen (vgl. Anhang B.3). Das Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 3.2.3.3) ist eine praxisbezogene Lehrveranstaltung des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für Studierende der Studiengänge Maschinenbau, Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen, die im jährlichen Turnus bereits seit 1997 angeboten wird.

Im Jahrgang 2019/2020 beschäftigten sich die Studierenden mit der Themenstellung *„Zukünftige Mobilität für Personen und Güter auf städtischen Straßen ab 2025: Anforderungen und Lösungen für ein flexibles, modulares und skalierbares Fahrzeug- und Transport-Konzept“* des Projektpartners Robert Bosch GmbH (vgl. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019)).

⁸³ Unveröffentlichte, vom Autor Co-Betreute Masterarbeit.

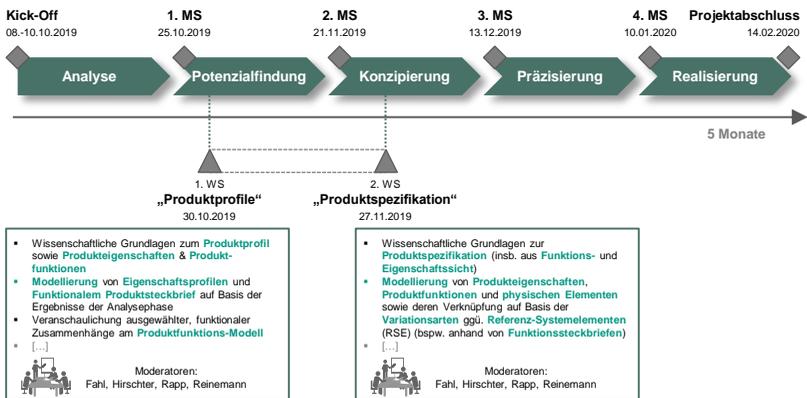


Abbildung 6.13: Vorgehen im Rahmen von IP – Integrierte Produktentwicklung – Darstellung in Anlehnung an (Albers, Bursac, Heimicke et al., 2017, S. 1017); IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019)

Ausgewählte Inhalte der in Kapitel 5 entwickelten Systematik wurden im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung eingesetzt, um die studentischen Entwicklungsteams beim Spezifizieren aus Funktionssicht prozessual und methodisch zu unterstützen. Zu verschiedenen Zeitpunkten im IP-Prozess wurden daher zwei Workshops durch den Autor sowie Tobias Hirscher, Simon Rapp und Jonas Reinemann durchgeführt, an denen jeweils alle 34 Studierenden des Jahrgangs 2019/2020 teilnahmen (vgl. Abbildung 6.13). Einleitend wurden in den zwei Workshops zunächst die wissenschaftlichen Grundlagen zum Produktprofil (vgl. Abschnitt 2.2.1) und der Produktspezifikation (vgl. Abschnitt 2.3) sowie Produktfunktionen und -eigenschaften (vgl. Abschnitt 5.1.5) vermittelt. In Aktivteilen waren die Studierenden anschließend aufgefordert, ausgewählte Prozessschritte der entwickelten Systematik jeweils innerhalb ihres Entwicklungsteams in die Praxis umzusetzen. Die relevanten Werkzeuge zur Unterstützung (bspw. in Form von Vorlagen) wurden dazu bereitgestellt. Das Vorgehen zur Evaluierung ausgewählter Inhalte der vorliegenden Forschungsarbeit in IP – Integrierte Produktentwicklung ist in Abbildung 6.13 dargestellt.

Der erste Workshop „*Produktprofile*“ fand zu Beginn der Potenzialfindungsphase statt. Auf Grundlage der Ergebnisse und Erkenntnisse der Analysephase sollten die Studierenden zunächst Eigenschaftsprofile modellieren und entlang des im Referenzprozess beschriebenen, methodischen Vorgehens einen funktionalen Produktsteckbrief daraus ableiten (vgl. insbesondere Subphase 2.2 in Abschnitt 5.3.4.3). Ausgewählte Pro-

duktfunktionen des funktionalen Produktsteckbriefs wurden anschließend über die Zusammenhänge im Produktfunktions-Modell (vgl. Abschnitt 5.1.5.4) veranschaulicht und in den Entwicklungsteams diskutiert.

Der zweite Workshop „*Produktspezifikation*“ fokussierte das Spezifizieren der Produktgeneration insbesondere aus Funktions- und Eigenschaftssicht anfangs der Konzipierungsphase. Ein Schwerpunkt stellte die Modellierung von Produkteigenschaften, Produktfunktionen und physischen Elementen dar. Die Studierenden konnten die Vorlage für die Funktionssteckbriefe dafür nutzen und darüber das funktionale Produktkonzept weiter schärfen. In diesem Zuge wurden in den Entwicklungsteams Verknüpfungen und Schnittstellen der Produktfunktionen auf Basis u.a. deren Variationsarten gegenüber Referenzsystem-Elementen (RSE) identifiziert und festgelegt.

Die Anwendbarkeit und der Erfolgsbeitrag der entwickelten Systematik und methodischen Unterstützung wurde anschließend zum dritten Meilenstein anhand einer Fragebogen-gestützten Umfrage durch die Studierenden evaluiert.

6.3.2 Ergebnisse und Diskussion der Evaluation

Im Anschluss an die Durchführung der Workshops wurden in einem ersten Schritt die genutzten Methoden und Werkzeuge (Produktfunktions-Modell, Funktionaler Produktsteckbrief, Funktionssteckbriefe) in den Aktivteilen durch die Studierenden detailliert bewertet (vgl. Abbildung 6.14). Die *Anwendbarkeitsevaluierung* umfasste dabei die Kriterien *Aufwand*, *Qualität*, *Anwendbarkeit*, *Integrierbarkeit* und *Übertragbarkeit*. Insgesamt konnte somit der zeitliche Aufwand zur Anwendung der Methoden, die Qualität bzw. Nutzen der erzielten Ergebnisse, Handhabbarkeit und intuitive Anwendbarkeit der Methoden, die Verknüpfbarkeit mit anderen Aufgaben in bestehenden Prozessen sowie letztlich das Nutzungspotenzial der Methoden in anderen (nicht-automobilen) Anwendungsfällen evaluiert werden. (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

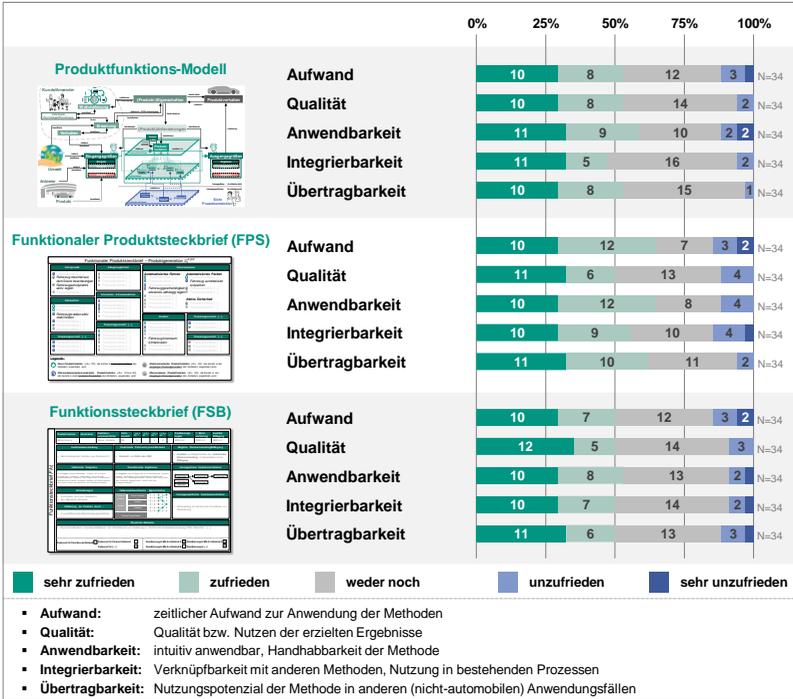


Abbildung 6.14: Evaluierung der von den Studierenden genutzten Methoden und Werkzeuge zum Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 8)

In der Bewertung der Methoden und Werkzeuge durch die Studierenden zeigt sich, dass das Produktfunktions-Modell den Produktentwickelnden bei der Strukturierung der funktionalen Zusammenhänge und Lokalisierung von Zielkonflikten hilft (Anwendbarkeit: 59% „(sehr) zufrieden“) und auch potenzielle Fehlfunktionen im Entwicklungsprozess berücksichtigt. Die damit erzielten Ergebnisse sind qualitativ hochwertig (53% „(sehr) zufrieden“), die Integrierbarkeit in bestehende Prozesse kann noch gesteigert werden. Eine systematische Konkretisierung der Eigenschaftsprofile in einem funktionalen Produktsteckbrief wurde als Mehrwert identifiziert (Aufwand und Anwendbarkeit: 65% „(sehr) zufrieden“, Integrierbarkeit: 56% „(sehr) zufrieden“). Gleichmaßen wird die Strukturierung einzelner Produktfunktionen im Funktionssteckbrief als sinnvoll erachtet, weil hierüber Spezifikations- und Wissenslücken schnell aufgedeckt werden können (alle Kriterien $\geq 50\%$ „(sehr) zufrieden“). Der Aufwand einer initialen Befüllung wird teilweise von den Studierenden als Herausforderung bezeichnet (14% „(sehr) unzufrieden“). Der zeitliche Aufwand zur Anwendung nimmt jedoch erfahrungsgemäß mit

jeder Iteration bzw. Durchführung der Methode kontinuierlich ab. Darüber hinaus können die erstellten Funktionssteckbriefe – im Gegenteil bspw. zur automobilen Entwicklungspraxis – im nächsten Jahrgang bzw. bei der nächsten Produktgenerationsentwicklung aufgrund neuer Themenstellung voraussichtlich nicht mehr genutzt werden.

Anschließend wurde in einem zweiten Schritt eine *initiale Erfolgsevaluierung* durchgeführt. Dazu wurden die Studierenden gebeten, in einem Fragebogen ihre individuelle Meinung zum Effektivitäts- und Effizienzbeitrag der methodischen Unterstützung im Entwicklungsprozess im Live-Lab IP zu bewerten (vgl. Abbildung 6.15).

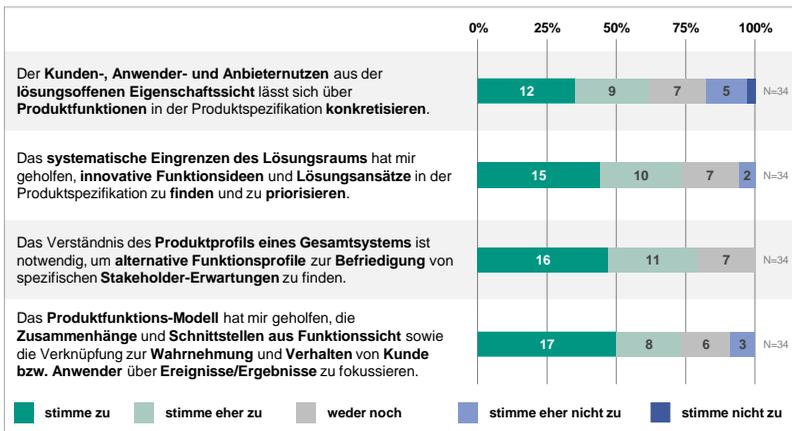


Abbildung 6.15: Evaluierung der Inhalte zum Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 9)

Aus Sicht einer Mehrheit der Studierenden lässt sich der anhand von Produkteigenschaften modellierte Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen insbesondere über Produktfunktionen in der Produktspezifikation konkretisieren (35% „stimme zu“, 26% „stimme eher zu“). Die Befragung der Studierenden verdeutlicht zudem, dass ein systematisches Eingrenzen des Lösungsraums (wie im Referenzprozess beschrieben) bei dem Finden und Priorisieren von innovativen Funktionsideen und Lösungsansätzen unterstützt (44% „stimme zu“, 29% „stimme eher zu“). Mehr als dreiviertel der angehenden Ingenieure (47% „stimme zu“, 32% „stimme eher zu“) bestätigten die Bedeutsamkeit des Produktprofils eines Gesamtsystems für die kreative Suche nach alternativen Funktionsprofilen, um die Stakeholder-Erwartungen adäquat befriedigen zu können. Abschließend konnte herausgearbeitet werden, dass 50% der Studenten einen Mehrwert im Produktfunktions-Modell sehen, um die Wahrnehmung und das Verhalten von Kunde bzw. Anwender über eine lösungsoffene Wirkbeziehung zwischen Ereignissen und Ergebnissen über Produktfunktionen zu verknüpfen.

Zusammenfassend wurde das Aufwand/Nutzen-Verhältnis durch die IP-Studierenden als sehr gut bewertet. Nach Ansicht der Befragten unterstützen die angewendeten Methoden das Spezifizieren von Produktfunktionen in der Produktspezifikation. Die methodische Unterstützung der Produktentwickelnden wird als besonders intuitiv anwendbar empfunden, lässt sich einfach handhaben und in verschiedenen Anwendungsfällen und bestehende IP-Prozesse integrieren. Die Systematik unterstützt nach Ansicht der Befragten die Konkretisierung des Nutzenbündels aus Eigenschaftssicht über Produktfunktionen in der Produktspezifikation. Systematisches Eingrenzen des Lösungsraums und Erweiterung der Wissensbasis fördern das Finden von Funktionsideen und die Entwicklung alternativer Funktionsprofile. Darüber hinaus gab es zudem positive Resonanz durch den beteiligten Projektpartner, der die unternehmensspezifische und reale Entwicklungsaufgabe explizierte. Wenngleich ein Live-Lab (vgl. Anhang B.7) für einen begrenzten Zeitraum das Modell eines realen Anbieter-Ökosystems schafft, gibt es Limitationen in Bezug zur direkten Übertragbarkeit der diskutierten Erkenntnisse auf die reale Entwicklungspraxis. Die IP-Studierenden zeichnet, aufgrund des Auswahlprozesses, zunächst eine grundsätzliche Affinität zum Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS aus. Darüber hinaus wurden die studentischen Produktentwickelnden vorab in den durchgeführten Workshops, im Speziellen, in den zu evaluierenden Methoden und Werkzeugen geschult. Aus diesem Grund müssen die sehr gute Anwendbarkeit und der überschaubare Aufwand der Evaluation relativiert werden.

6.3.3 Zwischenfazit

Die durchgeführte Fragebogenstudie im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020 adressierte die Forschungsfrage 3.6 (vgl. Abschnitt 3.1.3) und evaluierte damit die Entwicklungsunterstützung hinsichtlich Anwendbarkeit und initialem Erfolgsbeitrag. Fokus der Untersuchung stellte die Evaluation der Instanziierung der System-spezifischen Sprache (Funktionsverständnis im Modell der PGE) anhand der Themenstellung *„Zukünftige Mobilität für Personen und Güter auf städtischen Straßen ab 2025: Anforderungen und Lösungen für ein flexibles, modulares und skalierbares Fahrzeug- und Transport-Konzept“* des IP-Projektpartners Robert Bosch GmbH (vgl. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019)) in der Entwicklung eines realen Systems dar (vgl. Abstraktionsgraden der Produktmodellierung in Abschnitt 2.1.2.2). Darüber hinaus wurden in diesem Live-Lab ebenso Instanziierung und Individualisierung der Domänen-bezogenen Aktivitätsmuster in Projektvorlagen (Implementierungsmodelle i.S.v. Soll-Prozesse) und aufgezeichneten IP-Projektplänen (Anwendungsmodelle i.S.v. Ist-Prozesse) der angesprochenen Entwicklungsaufgabe jeweils Produktgenerations-spezifisch in den IP-Teams evaluiert (vgl. Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung in Abschnitt 2.1.3.4).

6.4 Fazit: Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion

Zum Abschluss der Deskriptiven Studie II werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Anwendbarkeits- und initialen Erfolgsevaluation kritisch diskutiert, um u.a. ebenso die Limitationen der entwickelten Unterstützung aufzuzeigen. Die Forschungsinhalte und -ergebnisse der DS-II sind in Abbildung 6.16 zusammengefasst.



Abbildung 6.16: Die Unterstützungs- und initiale Erfolgsevaluation in der Deskriptiven Studie II (DS-II)⁸⁴

In Abschnitt 6.2 wurde mittels *Fallstudien* sowie *teilnehmenden Beobachtungen* und *Experteninterviews* eine *Anwendbarkeitsevaluierung* der entwickelten Systematik in der Sportwagenentwicklung durchgeführt. Zunächst wurde dazu die Anwendbarkeit des Funktionsverständnisses und des Variationsoperators im Modell der PGE (Instanziierung der System-spezifischen Sprache) anhand von Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik (reale Systemelemente) untersucht (vgl. Abstraktionsgrade der Produktmodellierung in Abschnitt 2.1.2.2). Aufbauend darauf wurden Instanziierung und Individualisierung des generischen Referenz-Produktmodells in einer realen Produktgeneration des Porsche 911 am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ evaluiert. Abschließend erfolgte die Produktgenerations- und Domänen-spezifische Evaluation des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung (Instanziierung und Individualisierung der Domänen-bezogenen Aktivitätsmuster) in Projektvorlagen (i.S.v. Soll-Prozessen) und realen aufgezeichneten Projektplänen (i.S.v. Ist-Prozessen) in der Sportwagenentwicklung (vgl. Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung in Abschnitt 2.1.3.4). Die Evaluation der Phasen 3 (Realisierung Produktfunktion) und 4 (Stilllegung Produktfunktion) ist hierbei noch ausstehend.

Die Entwicklungsunterstützung wurde in Abschnitt 6.3 darüber hinaus in einer *Fragebogen-gestützten Umfrage* im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020

⁸⁴ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, IPEK – Institut für Produktentwicklung

hinsichtlich *Anwendbarkeit* und *initialem Erfolgsbeitrag* der Systematik evaluiert. In einem ersten Schritt wurde daher das entwickelte Funktionsverständnis im Modell der PGE (Instanziierung der System-spezifischen Sprache) anhand der IP-Entwicklungsaufgabe der Robert Bosch GmbH zum Thema „*Zukünftige Mobilität für Personen und Güter auf städtischen Straßen ab 2025: Anforderungen und Lösungen für ein flexibles, modulares und skalierbares Fahrzeug- und Transport-Konzept*“ (vgl. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019)) untersucht und bewertet (vgl. Abstraktionsgraden der Produktmodellierung in Abschnitt 2.1.2.2). Gleichmaßen wurden Produktgenerations-spezifische Soll-Prozesse (Projektvorlagen) und aufgezeichneten Ist-Prozesse (Projektplänen) über Instanziierung und Individualisierung der Aktivitätsmuster im IP-Projekt evaluiert (vgl. Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung in Abschnitt 2.1.3.4).

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Deskriptiven Studie II werden im Folgenden anhand der *Segelboot Retrospektive* (Hohmann, 2007) diskutiert (vgl. Abbildung 6.17).

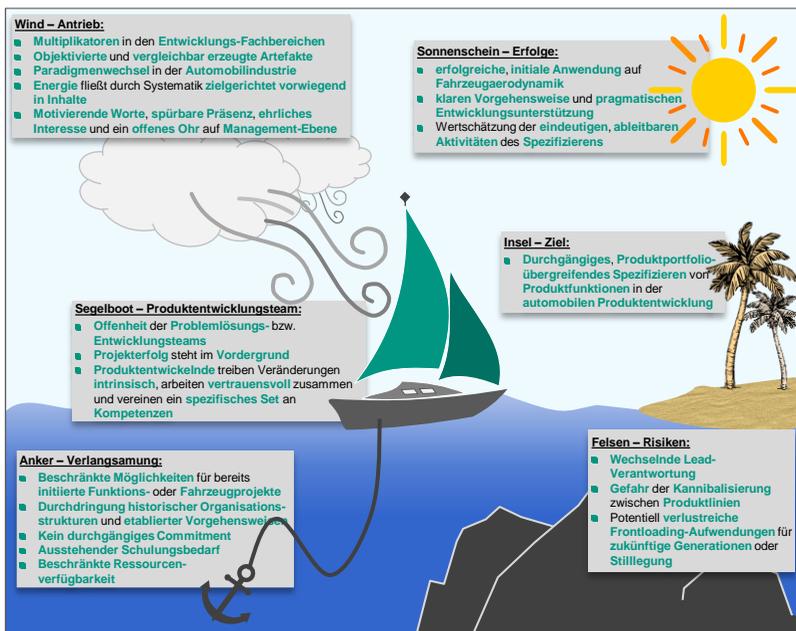


Abbildung 6.17: Zusammenfassung der Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion anhand der Segelboot-Retrospektive – Darstellung in Anlehnung an Löffler (2018)

Diese agile Methode der Retrospektive nutzt ein *Segelboot* als Metapher für das relevante Produktentwicklungsteam, das die entwickelte Systematik anwendet. Der wesentliche Hauptgedanke ist, dass sich die involvierten Produktentwickelnden auf einem Segelboot befinden, das auf ein konkretes Ziel zusteuert (symbolisiert durch die *Insel*). Auf dem Weg dorthin, hilft der *Wind*, das Segelboot vorwärtszutreiben. Hindernisse wie ein hartnäckiger *Anker* halten das Produktentwicklungsteam zurück und *Felsen* stellen Risiken dar, die das Segelboot verlangsamen oder daran hindern könnten, die Insel zu erreichen. Der *Sonnenschein* symbolisiert letztlich all die Erfolge, die das Produktentwicklungsteam bereits erreicht hat oder Dinge, die das Team wertschätzt. Die zusammengeführten Erkenntnisse aus den Fallstudien bzw. den teilnehmenden Beobachtungen und Experteninterviews sind in Abbildung 6.17 den jeweiligen Metaphern zugeordnet. (Hohmann, 2007; Löffler, 2018)

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit stellt das übergeordnete **Ziel** – bzw. die *Insel* in der Segelboot-Retrospektive – ein durchgängiges Spezifizieren von Produktfunktionen in der automobilen Produktentwicklung dar. Die **Problemlösungs- und Entwicklungsteams** (i.S.v. *Segelboot*), die mit der Anwendung der Systematik in der automobilen Produktentwicklung beauftragt wurden, zeigten sich fast ausschließlich offen gegenüber den neuen Prozessen und Methoden. Der Projekterfolg steht in der Anwendung im Vordergrund, sodass alle gemeinsam an einem Strang ziehen. Dies ist nur möglich, da die involvierten Produktentwickelnden Veränderungen intrinsisch vorantreiben, vertrauensvoll zusammenarbeiten und insgesamt ein spezifisches Set an Kompetenzen im Team vereinen. Auf dem Segelboot ist jedem Produktentwickelnden klar, dass es für große Vorhaben viele kleine und originelle Werkzeuge bedarf. Erste Erfolge, wie bspw. die gelungene, initiale Anwendung der Systematik auf Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik sorgt unter den beteiligten Produktentwickelnden für **Zufriedenheit und Wertschätzung** (symbolisiert durch *Sonnenschein*). Darüber hinaus werden die klaren Vorgehensweisen und die pragmatische Entwicklungsunterstützung anerkannt. Insbesondere schätzt das Entwicklungsteam die eindeutig ableitbaren Aktivitäten des Spezifizierens wert.

Nicht nur das orchestrierte Zusammenspiel der Produktentwickelnden, sondern ebenso externe Faktoren und Rahmenbedingungen verschaffen dem Segelboot **Vortrieb** (i.S.v. *Wind*). Mit Ausrollen der Systematik wurden gezielt Multiplikatoren in den Entwicklungs-Fachbereichen eingesetzt, die bei Herausforderungen und Problemen umgehend Rede und Antwort stehen und die Durchdringung in der Organisation fördern. Die Systematik zielt auf die Erzeugung objektiverer und vergleichbarer Artefakte aus Funktionssicht ab und unterstützt damit die Wirksamkeit von getroffenen Entscheidungen. Der Paradigmenwechsel in der Automobilindustrie (bspw. die Gründung der CARIAD zur funktionsübergreifenden Funktionsentwicklung im VW Konzern) steigert die Akzeptanz (Volkswagen AG, 2019). Ziel bei der Entwicklung der Systema-

tik war stets eine effektive Anwendbarkeit, sodass die Energie der Produktentwickelnden zielgerichtet in Inhalte und Artefakte fließt. Zugleich werden die Inhalte und Artefakte bereits im Voraus so ausgeprägt, als ob sie anschließend langfristig gelebt werden müssen, was den Zuspruch befeuert. Nicht zuletzt schaffen motivierende Worte, spürbare Präsenz, ehrliches Interesse an Systematik und Inhalten sowie ein stets offenes Ohr auf Management-Ebene dem Segelboot Vortrieb und unterstützen beim Erreichen des übergeordneten Ziels.

Nichtsdestotrotz gibt es ebenso einige Faktoren, die das Produktentwicklungsteam **verlangsamen** und auf dem Weg zur Insel **zurückhalten** (symbolisiert durch den *Anker*). In der automobilen Produktentwicklungspraxis existieren nur beschränkte Möglichkeiten, die Systematik in bereits initiierte Funktions- oder Fahrzeugprojekte zu integrieren. Durch das simultane Vorhandensein verschiedener Vorgehensweisen wird die Durchdringung etablierter, historischer Organisationsstrukturen mühselig und langsam. Trotz Multiplikatoren gibt es noch kein vollumfängliches Commitment auf der Fachbereichs-Ebene, was unter anderem ebenso an ausstehenden Schulungsbedarfen der Produktentwickelnden (bspw. in MBSE bzw. SysML-Modellierung) liegen mag. In der Frühen Phase der Produktentwicklung sind die Ressourcen knapp bemessen und zu viele Veränderungsvorhaben reduzieren den spürbaren Fortschritt. Dies wird verschärft durch stetige Modifikation der Rahmenbedingungen in der Frühen Phase.

Ein heutiges und zukünftiges **Risiko** (i.S.v. *Felsen*) stellt die Sicherstellung einer Durchgängigkeit der Systematik dar, da die Lead-Verantwortung zwischen Früher Phase der Entwicklung einer Produktgeneration G_n und deren Phase der Realisierung bzw. Produktion wechselt. Gleichmaßen besteht durch eine durchgängige Anwendung der Systematik die Gefahr der Anbieter-internen Kannibalisierung zwischen einzelnen Produktlinien und/oder Produktgenerationen, da Kunde und Anwender am Markt einen „*funktionalen Einheitsbrei*“ wahrnehmen könnten. Eine systematische Differenzierung der funktionalen Produktkonzepte verschiedener Produktgenerationen ist zwingend notwendig. Weiterhin besteht das Risiko, dass potenziell verlustreiche Frontloading-Aufwendungen für zukünftige Generationen oder Stilllegung von Produktfunktionen getätigt werden, bevor die erste Generation überhaupt am Markt eingeführt wurde.

Das Fazit zur Evaluation zeigt damit insgesamt Potenziale für weiterführende Forschung anknüpfend an diese Forschungsarbeit auf. Es bedarf für die vollständige Evaluierung des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung einer durchgängigen Anwendung in weiteren, realen Entwicklungs- und Funktionsprojekten, um die tatsächliche Produkt- und Prozesskomplexität adäquat abzubilden. Auf Grundlage der diskutierten Ergebnisse und Erkenntnisse der Evaluation wird im Ausblick (vgl. Abschnitt 7.2) aufgezeigt, wie die entwickelte Systematik zukünftig in nachfolgenden Forschungsprojekten weiterentwickelt werden kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse der vorliegenden Forschungsarbeit zusammengefasst. Zum Schluss wird im Ergebnistransfer und Ausblick zu weiterführenden Forschungsprojekten angeregt.

7.1 Zusammenfassung

Hochentwickelte Fahrzeuge, wie sie gegenwärtig am Markt eingeführt werden, müssen von Generation zu Generation steigende Kunden- und Anwenderanforderungen, u.a. an Fahrerassistenz, Digitalisierung und Elektromobilität, befriedigen. Aufgrund dessen hat sich das Funktionsspektrum dieser innovativen, automobilen Produktgenerationen im letzten Jahrzehnt mehr als vervierfacht. Gleichermaßen zeigt sich in der automobilen Entwicklungspraxis ein kontinuierlicher Trend hin zur übergreifenden Funktionsentwicklung für das gesamte Produktportfolio eines Anbieters. Bedingt durch bspw. Kosten- und Effizienzoptimierungen in der wettbewerbsgetriebenen Automobilindustrie können daher solche mitunter komplexen Funktionen nicht mehr nur für einzelne Fahrzeuge entwickelt werden. Das Zusammenführen teils diametraler Anforderungen sowie Wechselwirkungen vieler Produktgenerationen aus verschiedenartigen Produktlinien stellt Produktentwickelnde bereits beim Spezifizieren der Funktionen vor ein komplexes Problem (vgl. Kapitel 1). (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Zur Klärung des Forschungsgegenstandes wurde eingangs in Kapitel 2 die relevante Literatur analysiert und diskutiert. Das *Denken in Systemen* spielt eine Schlüsselrolle in der Beherrschung komplexer technischer Zusammenhänge und Abhängigkeiten der interdisziplinären Produktentstehung (vgl. Abschnitt 2.1). Indessen offenbarte die Literaturrecherche das weiterführende Potenzial einer Synthese des Verständnisses von Funktionen des Gesamtproduktes, welche die Kunden-, Anwender- wie auch Anbietersicht in den Betrachtungsmittelpunkt rücken. Daraus resultierte für das Spezifizieren solcher Funktionen ein Bedarf an prozessualer Entwicklungsunterstützung, die mit einem Produktportfolio-übergreifenden Fokus angewendet werden kann. Das empirisch und wissenschaftlich fundierte *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS (vgl. Abschnitt 2.2) liefert im Kern die Beschreibung der Entstehung neuer (innovativer) Produkte auf Basis eines Referenzsystems und den Aktivitäten der Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation. Das systemische Verständnis findet sich im Modell der PGE u.a. in den Iterationen der Modellbildung auf unterschiedlichen Systemebenen von Produkt- und Entwicklungsgenerationen. Außerdem legt das Modell der PGE den Grundstein zur Entwicklung methodischer und prozessualer Unterstützung

des Produktentwickelnden – bspw. beim Spezifizieren aus Funktionssicht. Nicht zuletzt aus diesem Grund bildet das Modell der PGE das Fundament der entwicklungs-methodischen Forschung dieser Arbeit und lässt sich durch eine Differenzierung zwischen technischen Funktionen und Funktionen des Gesamtprodukts in diesem Rahmen weiterentwickeln. Anknüpfend daran zeigte der Stand der Forschung zur *Produktspezifikation in der Frühen Phase* der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 2.3) weiteren Forschungsbedarf auf. In den Aktivitäten der Spezifikation kann ein Hauptaugenmerk auf die Funktionen des Gesamtprodukts nicht nur die Stakeholder-Zentrierung in der Frühen Phase untermauern, sondern ebenso den Produktentwickelnden durch die Verknüpfung mit Produktportfolio-übergreifenden Verfahren und Methoden der Entwicklungsvorhersage unterstützen.

Zusammenfassend konnten aus der Diskussion der Grundlagen und des Stands der Forschung *fünf übergreifende Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation* identifiziert werden (vgl. Abschnitt 2.4): *Systemdenken, Stakeholder-Zentrierung, Differenzierung lösungsoffener und lösungsspezifischer Elemente, Referenzsystem-Elemente und aktivitätsbasierte Dynamik*. Da es jedoch an geeigneter prozessualer und methodischer Unterstützung fehlt, stellt sich die Frage, wie eine transparente und durchgängige Funktionsentwicklung auf Basis der fünf Erfolgsfaktoren in diversifizierten Produktportfolios zukünftig im Rahmen der Produktspezifikation in der Frühen Phase synergistisch gestaltet werden kann?

Auf Grundlage dieser Forschungslücke sowie des abgeleiteten Forschungsbedarfs und den Herausforderungen in der automobilen Entwicklungspraxis, wurde in Abschnitt 3.1 folgende Zielsetzung für diese Arbeit (vgl. Abbildung 7.1) hergeleitet.



Abbildung 7.1: Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit (vgl. Abschnitt 3.1)

Das explizierte Forschungsziel wurde in Kapitel 3 ferner durch Forschungshypothesen fokussiert und zugehörige Forschungsfragen operationalisiert. Die Vorgehensweise in der Forschungsarbeit gliedert sich gemäß der Design Research Methodology (DRM, vgl. Abschnitt 3.2) in *Deskriptive Studie I* (DS-I), *Präskriptive Studie* (PS) und *Deskriptive Studie II* (DS-II). Auf Grundlage des modelltheoretischen und methodischen Gefüges der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung* wurde daher die prozessuale und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren aus Funktionssicht empirisch analysiert (DS-I), in einer dreiteiligen Systematik synthetisiert (PS) sowie der Entwicklungspraxis

angewandt und evaluiert (DS-II). Die Kernergebnisse und -erkenntnisse der drei DRM-Studien werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Deskriptive Studie I (DS-I, vgl. Abbildung 7.2) – Kapitel 4:



Abbildung 7.2: Die drei empirischen Studien in der Deskriptiven Studie I (DS-I) im vierten Kapitel dieser Forschungsarbeit

In einer 3-jährigen, teilnehmenden Beobachtung sowie einer tiefgreifenden Inhaltsanalyse von Prozessen und Methoden in der automobilen Produktentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG und des Volkswagen Konzerns wurden in Abschnitt 4.2 zunächst *Handlungsfelder der funktionalen Produktspezifikation* identifiziert. Wenig strukturierte Prozesse sowie heterogene Abstraktionsgrade und -ebenen als auch uneinheitliche Nomenklaturen und Formulierungen in der Entwicklung des „funktionalen“ Portfolios eines Anbieters müssen adressiert werden. Es ist notwendig den Schwerpunkt in der Frühen Phase stärker auf die für den Kunden oder Anwender wahrnehmbare Funktionen zu legen, die einen direkt greifbaren Wert oder Nutzen des Gesamtproduktes schaffen. Darüber hinaus bedarf es einer Aufwertung der Entwicklungsunterstützung, die der Produktentwickelnde flexibel und anpassbar beim Spezifizieren einsetzen kann. In der Frühen Phase muss dazu einerseits eine gezieltere Generierung und Priorisierung von neuen Funktionsideen unterstützt und andererseits ebenso eine transparente und rückverfolgbare Spezifikation von Funktionen des Gesamtproduktes in Generationen systematisiert werden. Die Produktentwicklungspraxis zeigt zudem auf, dass sich Anbieter in Zukunft bereits in der Spezifikation deutlich stärker mit den Auswirkungen auf die Realisierung von Funktionen oder sogar der Stilllegung bzw. der Beendigung von Funktionslebenszyklen beschäftigen müssen. Daraus folgt die zwingend notwendige Stärkung eines Verständnisses der unterschiedlichen Zugänglichkeiten von Referenzsystem-Elementen (RSE) und eine obligatorische Ausweitung der Nutzung des Referenzsystems in der Produktspezifikation (aus Funktionssicht).

Handlungsfelder notwendiger Unterstützung und Lösungsansätze zum Spezifizieren aus Funktionssicht wurden sowohl über *Fragebogen-gestützte Umfragen* in der industriellen Produktentwicklung, sowie im *Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung*, als auch in einer *Delphi-Studie* mit *anknüpfenden Experteninterviews auf einem Expertenforum* ermittelt (vgl. Abschnitt 4.3). Die heterogene Streuung von Informations- und Wissensfragmenten, wie auch Artefakten, erschwert aus Anbietersicht eine adäquate Allokation von Ressourcen in der Frühen Phase und aus Produktentwickelnden-Sicht eine angemessene Ableitung der notwendigen Entwicklungsaktivitäten. Voneinander abweichende Güte relevanter Informationen beeinträchtigt die Transparenz über Neu- und Übernahmeentwicklung in der Produktspezifikation auf Basis übertragener Elemente aus dem Referenzsystem in eine neue Produktgeneration. Es mangelt an einer Modell-gestützten Strukturierung zum Spezifizieren komplexer Produkte, entlang determinierter Systemsichten und -ebenen, die vom Produktentwickelnden flexibel bspw. an die Spezifikation von Funktionen des Gesamtproduktes adaptiert werden kann. Grundvoraussetzung dafür ist eine strukturierte Homogenisierung der Formulierung und Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes aus Stakeholder-Sicht insbesondere in der Frühen Phase.

Experteninterviews im Zuge eines *Anbieter-übergreifenden Workshops* sowie *zwei Fallstudien* in der automobilen Produktentwicklungspraxis der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Abschnitt 4.4 mündeten in *Handlungsfeldern in Bezug zum Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase*. Die Hebung der Potenziale einer stärkeren Kunden- und Anwenderorientierung in der Frühen Phase gebietet eine Differenzierung der unterschiedlichen Systemsichten (Eigenschaften/Funktionen/ physische Elemente) bzw. Typen von RSE beim Spezifizieren. Dies ermöglicht zum einen ein tiefgreifendes Verständnis der unterschiedlichen Zugänglichkeiten von RSE und fördert zum anderen den Einsatz von Aktivitäten zur Erweiterung der Wissensbasis im Bezug zum Referenzsystem. Das Spezifizieren aus Funktionssicht verlangt daher nach einer Verknüpfung mit anderen Systemsichten und einer Strukturierung der Systemebenen anhand eines generischen Produktmodells. Darüber hinaus ist die Generalisierung der Variationsarten im Modell der PGE mit Bezug zur physischen Gestalt in eine generische Beschreibung des Variationsoperators im Systemkontext notwendig, um ebenso u.a. die Phänomene der Variation von Funktionen zu beschreiben. In diesem Zuge müssen die Definitionen von Funktionen des Gesamtproduktes und technische Funktionen einzelner, physischer Elemente voneinander abgegrenzt werden. Abgesehen davon muss eine strukturierte Überleitung im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses von der initial generierten Funktionsidee bis zur Stilllegung der Funktion gewährleistet sein. Strukturelle Leitlinien zur Formulierung und Modellierung von Funktionen des Gesamtproduktes unterstützen den Produktentwickelnden in seinen Aktivitäten des Spezifizierens aus Funktionssicht und der Variation von Funktionen auf Basis des Referenzsystems besonders in der Frühen Phase.

Zum Abschluss der DS-I wurden in Abschnitt 4.5 aus den identifizierten Handlungsfeldern Anforderungen synthetisiert. Die Übersicht der Anforderungen, zu der jeweils relevanten Forschungshypothese, bereiteten damit die Implementierung der ausgewählten und bewerteten Lösungen in der darauffolgenden Präskriptiven Studie vor.

Präskriptive Studie (PS, vgl. Abbildung 7.3) – Kapitel 5:



Abbildung 7.3: Die drei Bestandteile der entwickelten Unterstützung des Produktentwickelnden in der Präskriptiven Studie (PS) im fünften Kapitel dieser Forschungsarbeit

Als erster Kernbestandteil der präskriptiven Systematik wurde in Abschnitt 5.1 ein *konsistentes Verständnis sowie die Abbildung und Variation von (Produkt-)Funktionen* auf Basis des Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS entwickelt. Als Ausgangsbasis wurden dazu zunächst Typen von RSE, das Mengenverständnis und der generische Variationsoperator aus Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation im Modell der PGE als Beitrag zu einer gemeinsamen Sprache im Sinne der Produktmodellierung synthetisiert. Weiterhin wurde ein grundlegendes generisches Referenz-Produktmodell geschaffen, das sich aus den Systemsichten der Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen zusammensetzt. Die Systemsichten lassen sich hierbei jeweils über eine kontext- und situationsabhängige Anzahl an übergeordneten Supersystem- und untergeordneten Subsystem-Ebenen eines Gesamtsystems hierarchisch gliedern. Darauf aufbauend erfolgte die inhaltsbezogene Spezifikation des Funktionsverständnisses und der abgeleiteten Variationsarten von Funktionen. Eine *Produktfunktion im Modell der PGE* wird in dieser Arbeit definiert als „[...] eine Funktion eines technischen Systems, anhand der sich eine lösungsoffene Wirkbeziehung des Gesamtproduktes zwischen einer Menge von initiierten Ereignissen und resultierenden Ergebnissen sowie den (inhärenten) Zuständen aus u.a. Kunden-, Anwender- und/oder Anbietersicht in einem definierten Kontext beschreiben lässt“ (vgl. Definition 7). Zur Ermöglichung der Beschreibung initialer Definitionen von *Übernahme- und Neuentwicklungsanteilen von Produktfunktionen* wurde der generische Variationsoperator im Modell der PGE anschließend auf den Elementtyp „Funktion“ angewendet. Aus den empirischen Erkenntnissen wurden

abschließend ein Leitfaden zur Formulierung von (Produkt-)Funktionen und ein *Produktfunktions-Modell* synthetisiert, die Produktentwickelnde beim effektiven Spezifizieren leiten. Ein *generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren komplexer Produkte* bildet den zweiten Bestandteil der entwickelten Systematik und unterstützt die Strukturierung der Produktspezifikation durch seine Verknüpfung mit dem erweiterten ZHO-Modell und dem Referenzsystem im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.2). Der in Abschnitt 5.3 entwickelte *Referenzprozess und die methodische Entwicklungsunterstützung zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE* vervollständigen die Systematik. Die prozessuale und methodische Unterstützung des Produktentwickelnden beschreiben im Sinne der Prozessmodellierung in dieser Arbeit folglich Aktivitätsmuster bezogen auf die Domäne der automobilen Produktentwicklung. Im Zuge dessen wird zwischen den vier Phasen der *Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n)*, der *Spezifikation einer Produktfunktion*, der *Realisierung einer Produktfunktion* und der *Beendigung des Funktionslebenszyklus* differenziert. Eine zentrale *Produktfunktions-Roadmap* fungiert im entwickelten Referenzprozess als durchgängiges und konsistentes Planungs- und Steuerungsinstrument des „*funktionalen Portfolios*“ eines Anbieters.

Insbesondere die *Modellierung des Referenzprozesses im iPeM – integrierten Produktentstehungsmodell* trug im Rahmen der abschließenden *Unterstützungsevaluierung* der Systematik in Abschnitt 5.4 zur Verifikation der Berücksichtigung aller Anforderungen aus der Deskriptiven Studie I bei. Die tatsächliche Unterstützung des Produktentwickelnden wurde in einer folgenden Deskriptiven Studie II hinsichtlich Anwendbarkeit und initialem Erfolgsbeitrag evaluiert.

Deskriptive Studie II (DS-II, vgl. Abbildung 7.4) – Kapitel 6:



Abbildung 7.4: Die Unterstütsungs- und initiale Erfolgsevaluierung in der Deskriptiven Studie II (DS-II) im sechsten Kapitel dieser Forschungsarbeit⁸⁵

⁸⁵ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, IPEK – Institut für Produktentwicklung

Die präskriptive Systematik wurde in Bezug zur *Anwendbarkeit* in Abschnitt 6.2 mit Hilfe von *Fallstudien* sowie *teilnehmenden Beobachtungen* und *Experteninterviews* in der Sportwagenentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG evaluiert. Das entwickelte Funktionsverständnis wurde zunächst genutzt, um *reale Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik* gegenüberzustellen. Die phänomenologischen Charakteristika der Variationsarten von physischen Elementen ließen sich über den entwickelten, generischen Variationsoperator im Modell der PGE auf Produktfunktionen übertragen und ebenso „funktionale“ Übernahme- und Neuentwicklungsanteile analog der PGE-Formel berechnen. Die betrachteten Beispiele der Fahrzeugaerodynamik zeigen, dass gleiche Produktfunktionen in unterschiedlichen Produktlinien des Produktportfolios zum Einsatz kommen. Gleichwohl führt eine solche Übernahmevariation einer Produktfunktion nicht selten dazu, dass die Gestalt der realisierenden physischen Elemente (bspw. Heckspoiler, Spoilerantrieb, usw.) variiert wird.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde das generische Referenz-Produktmodell in einer realen Produktgeneration des Porsche 911 anhand der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ evaluiert. Zu diesem Zweck wurden die zentralen Entwicklungsaktivitäten der Objektanalyse, Zielsynthese, Zielanalyse und Objektsynthese in vier „*Momentaufnahmen*“ betrachtet und spezifische Zusammenhänge der Systemelemente im Ziel-, Handlungs- und Objektsystem bzw. zu dem Referenzsystem im Modell der PGE beispielhaft erläutert.

Abschließend erfolgte die *Produktgenerations- und Domänen-spezifische Anwendbarkeitsevaluation* des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung in Projektvorlagen und realen, aufgezeichneten Projektplänen in der Sportwagenentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. In Bezug zur Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n) (Phase 1) wurden *drei Workshops* im Volkswagen Konzern mit Vertretern aller Marken sowie der größten Absatzmärkte veranstaltet. Das strukturierte Vorgehen durch die Subphasen der ersten Phase des Referenzprozesses unterstützte hierbei eine systematische Entwicklung alternativer Funktionsprofile, sowie die Abschätzung von Marktpotenzial, Entwicklungsaufwand, Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiko. Die generierten und über das Konsent-Prinzip priorisierten Funktionsideen förderten dabei transparente und objektivierte Entscheidungen über die Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation. Zur Evaluation der zweiten Phase (Spezifikation Produktfunktion) wurde erneut *eine Produktfunktion der Fahrzeugaerodynamik* gewählt, die Produktportfolio-übergreifend sowohl in zahlreichen funktionalen Produktkonzepten als auch in Produktgenerationen am Markt und in der Entwicklung integriert und umgesetzt wird. In einem ersten Schritt wurde dazu das funktionsspezifische Zielsystem über einen *Funktionssteckbrief* (FSB) der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ Produktportfolio-übergreifend definiert. Im weiteren Verlauf der Evaluierung wurde die Produktfunktion auf Grundlage des

FSB in *Microsoft PowerBI* modelliert. Dabei wurden die Verknüpfungen und Schnittstellen der Produktfunktion zu den initiierenden und beeinflussten Produkteigenschaften, den Subfunktionen sowie den notwendigen physischen Elementen funktionspezifisch modelliert. Zum Abschluss der initialen Evaluation von Phase 2 des Referenzprozesses wurde die Produktfunktion im *No Magic Cameo Systems Modeler* zur Integration in die Produktmodelle von zunächst *zwei Fahrzeugprojekten in der Entwicklung* modelliert. Die Evaluation der Phasen 3 (Realisierung Produktfunktion) und 4 (Stilllegung Produktfunktion) ist noch ausstehend.

Die Entwicklungsunterstützung wurde hinsichtlich *Anwendbarkeit* und *initialem Erfolgsbeitrag* ferner in einer *Fragebogen-gestützten Umfrage* im *Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020* in Abschnitt 6.3 evaluiert. Das entwickelte Funktionsverständnis im Modell der PGE wurde daher zunächst mittels einer Entwicklungsaufgabe der Robert Bosch GmbH in Bezug zur „*Zukünftige[n] Mobilität für Personen und Güter auf städtischen Straßen ab 2025 [...]*“ (vgl. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019)) analysiert und bewertet. Des Weiteren wurden in diesem Rahmen Produktgenerations-spezifische Implementierungsmodelle (i.S.v. Soll-Prozesse) und aufgezeichnete Anwendungsmodelle (i.S.v. Ist-Prozesse) des IP-Projekts herangezogen. Das Aufwand/Nutzen-Verhältnis der angewendeten Methoden wurde als sehr gut bewertet und unterstützte das Spezifizieren von Produktfunktionen zielgerichtet. Das strukturierte Vorgehen ermöglichte eine präzise Konkretisierung des Nutzenbündels aus Eigenschaftssicht über Produktfunktionen und förderte ein systematisches Eingrenzen des Lösungsraums sowie eine Erweiterung der Wissensbasis zum Finden von Funktionsideen und der Entwicklung alternativer Funktionsprofile. Die intuitiv anwendbare, methodische Unterstützung ließ sich einfach handhaben und in verschiedene Anwendungsfälle und bestehende IP-Prozesse integrieren.

Abschließende Bewertung der drei zentralen Forschungshypothesen der Arbeit:

Die Diskussion der Evaluationsergebnisse und -erkenntnisse erfolgte in Abschnitt 6.4 und führte zur abschließenden Bestätigung bzw. Verifikation der drei zentralen Forschungshypothesen (vgl. Abbildung 7.5).

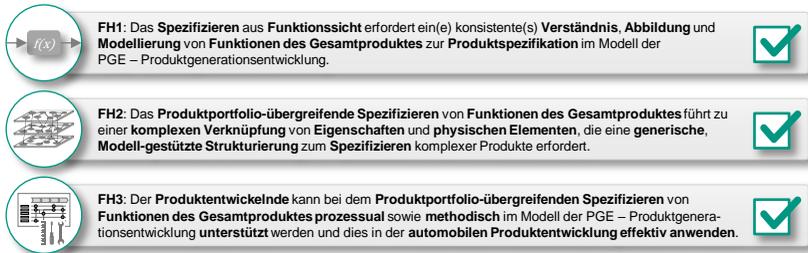


Abbildung 7.5: Bestätigung der drei zentralen Forschungshypothesen (FH1, FH2 und FH3) aus Abschnitt 3.1.2

Erkenntnisse zum Verständnis und dem Spezifizieren von Produktfunktionen wurden vertieft und eine spezifische, methodische Entwicklungsunterstützung für den Anwendungsfall der automobilen Produktentwicklung synthetisiert. Die Fallstudien in der Sportwagenentwicklung zu Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik konnten die *effektive Anwendbarkeit der entwickelten Unterstützungswerkzeuge* aus Funktionsverständnis und -abbildung (FH1), generischem Referenz-Produktmodell (FH2) sowie Referenzprozess und methodischer Unterstützung (FH3) bestätigen. Darüber hinaus zeigte sich *initial ein Erfolgsbeitrag* zur Transparenz und Durchgängigkeit in der Produktspezifikation aus Funktionssicht im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung.

Diese Forschungsarbeit leistet somit einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Modells der PGE und stellt gemäß dem Anspruch der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung den direkten Bezug zur praktischen Umsetzung her.

7.2 Ergebnistransfer und Ausblick

Der Ergebnistransfer und Ausblick zeigt, wie die entwickelte Systematik zum Spezifizieren von Produktfunktionen künftig in anknüpfenden Forschungsprojekten weiterentwickelt werden kann. Zu diesem Zweck wurden identifizierte Handlungsfelder aus den Studien dieser Arbeit, die noch nicht vollständig oder abschließend verwirklicht wurden, in Fragestellungen zukünftiger Forschungsanstrengungen übersetzt. Diese Forschungsarbeiten lassen sich hinsichtlich eines *direkten Transfers der Ergebnisse*, einer *Weiterentwicklung der Systematik* oder *weiterführenden Arbeiten im Hinblick auf den betrachteten Forschungsgegenstand* differenzieren.

7.2.1 Transferanwendung des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen auf nicht-automobile Produktentwicklung

In der vorliegenden Arbeit fokussierten sich sowohl die Deskriptive Studie I (DS-I) als auch die Deskriptive Studie II (DS-II) auf die Domäne der automobilen Produktentwicklung. Die Erkenntnisse der DS-I und Evaluation in der DS-II entstanden dabei vor allem durch spezifische Untersuchungen bei den Kooperationspartnern der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG und teilweise im Volkswagen Konzern. Aufgrund zeitlicher Limitationen dieser Forschungsarbeit erfolgte bisher keine Evaluation der dritten und vierten Phase des entwickelten Referenzprozesses. Die spezifischen Rahmenbedingungen der vorliegenden Untersuchungsumgebungen wurden nach Möglichkeit minimiert. Nichtsdestotrotz erhebt die vorliegende Forschungsarbeit keinen Anspruch auf bedingungslose Repräsentativität, wenngleich eine Übertragbarkeit auf weitere automobiler Original Equipment Manufacturer (OEM) oder Zulieferer in einem gewissen Umfang valide erscheint. Aus diesem Grund muss das Nutzungspotenzial in weiteren Domänen bzw. nicht-automobilen Anwendungsfällen verifiziert werden.

Folglich ergibt sich die nachstehende, zukünftige Forschungsfrage zum möglichen, *direkten Transfer der Forschungsergebnisse*:

Inwieweit lässt sich die entwickelte Systematik aus Verständnis und Abbildung von Produktfunktionen im Modell der PGE, generischem Referenz-Produktmodell sowie Referenzprozess und methodische Unterstützung beim Spezifizieren aus Funktions-sicht auf nicht-automobile Anwendungsfälle übertragen?

Die effektive Transferanwendung der entwickelten Modelle, Prozesse, Methoden und Werkzeuge bedingt eine hinreichende mechatronische Komplexität des zu entwickelnden Systems. Ein initialer Ergebnistransfer auf die *Hausgeräteentwicklung* wurde bereits im Rahmen der studentischen Abschlussarbeiten Endl (2019)⁸⁶ und Staiger (2020)⁸⁶ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Die Entwicklung von Haushaltsgeräten wie bspw. Geschirrspüler oder Kaffeefullautomaten zeichnet – analog der automobilen Produktentwicklung – ebenso eine direkte Beziehung zum Anwender aus. An dieser Stelle besteht das Potenzial vertiefende Anwendbarkeits- und Erfolgsevaluationen durchzuführen, um die Generalisierbarkeit sowie Übertragbarkeit der entwickelten Systematik zu bewerten (vgl. z.B. Reinemann, Fahl, Hirschter et al. (2019) und Reinemann, Hirschter, Mandel et al. (2018)).

⁸⁶ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

7.2.2 Anbieter- oder Domänen-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen

Die Erkenntnisse zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen in dieser Forschungsarbeit deuten zudem auf übergeordnete Synergiepotenziale zwischen verschiedenen OEMs der Automobilindustrie hin. Innerhalb einer Domäne kann eine globale Standardisierung analog der *Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge* (vgl. DIN EN 15380:2006/2013/2014) zielführend sein. Der Betrachtungsfokus wird vom Produktportfolio eines Anbieters hierbei auf das Spezifizieren sogenannter *funktionaler Portfolios* verschiedener Anbieter oder gar einer ganzen Domäne abstrahiert. Die Vorteile dieser Zusammenführung kann sich in effizienteren Vergaben von Subsystem-Entwicklungen durch Dienstleister, Domänen-bezogene Standardisierung von Tests/Validierung und/oder Freigaben von Produktfunktionen zeigen. Aus diesem Grund hat bspw. der Volkswagen-Konzern eine neue Gesellschaft zur übergreifende Funktionsentwicklung gegründet. Im Zuge dessen soll die *CARIAD* Synergien und Skaleneffekte durch eine Produktportfolio-übergreifende Entwicklung von Produktfunktionen – zunächst mit hohem Software-Anteil – für alle Konzernmarken der Volkswagen AG ausschöpfen und realisieren (Fahl, Hirschter & Albers, 2021; Volkswagen AG, 2019). Die entwickelte Systematik und deren methodische Unterstützung kann dementsprechend weiterentwickelt bzw. Domänen-übergreifend generalisiert werden. In diesem Kontext spielt nicht zuletzt die weitergehende Erforschung der Auswirkungen der Einbeziehung standortverteilter Anbieter beim Spezifizieren eine Schlüsselrolle der *standortverteilten Zusammenarbeit in der Produktentwicklung* (vgl. z.B. Albers, Weissenberger-Eibl, Dühr et al. (2020)). Darüber hinaus stellt die *Stärkung der Modellbasierten Systementwicklung* (MBSE) (vgl. z.B. Powelske, Mandel, Albers et al. (2018)) und *Produktgenerations-übergreifendes Wissensmanagement* in der Entwicklungspraxis einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar.

Folgende, zukünftige Forschungsfrage kann hierbei zur möglichen *Weiterentwicklung bzw. Generalisierung der Systematik* beitragen:

Wie kann das übergreifende Spezifizieren von Produktfunktionen in Kooperation von unterschiedlichen Anbietern oder zwischen Domänen ermöglicht werden?

Darüber hinaus kann zur Weiterentwicklung oder Generalisierung einzelner Bestandteile der Systematik mit Bezug zu Produktfunktionen bspw. die Betrachtung auf die *Spezifikation von soziotechnischen Interaktionskonzepten* im Modell der PGE übertragen und ausgeweitet werden. Im Kontext interaktiver Produkte wird das unmittelbare Zusammenwirken des Kunden bzw. Anwenders und des technischen Produkts oftmals als distinktives Produktmerkmal hervorgehoben (Hassenzahl, 2006; Schröppel, Miehl & Wartzack, 2019). Mit dem Ziel einer positiven und Anbieter-prägenden User Experience – folglich der spezifischen Wahrnehmung des Kunden bzw. Anwenders

bei der Benutzung des Produkts – rückt im Rahmen der Produktentwicklung die Gestaltung von Interaktionskonzepten zunehmend in den Mittelpunkt der Frühen Phase. Forschungsbedarf existiert daher im Hinblick auf die systemtheoretische Beschreibung der Interaktion zwischen dem Menschen und der Menge an Produktfunktionen, die eine direkte Bedien- bzw. Anzeigeschnittstelle haben. Anknüpfend daran ergeben sich Potenziale einer *integrativen, Produktportfolio-übergreifenden Entwicklung von Produktfunktionen* und den *dazugehörigen, soziotechnischen Interaktionskonzepten*, die dann spezifisch für unterschiedliche Produktgenerationen verschiedener Produktlinien auszuprägen sind.

7.2.3 Referenz-Organisationsstruktur eines Anbieters zum Spezifizieren einer Produktgeneration

Anknüpfend an die Entwicklung eines generischen Referenz-Produktmodells und eines Referenzprozesses, liegt Potenzial in der Erforschung und Synthese einer zuträglichen Referenz-Organisationsstruktur. In diesem Sinne können generelle Regelungen für die Verteilung von Zuständigkeiten auf organisatorische Einheiten eines Anbieters zum Spezifizieren einer Produktgeneration empirisch untersucht werden. Gleichermaßen ergeben sich in diesem Aspekt Möglichkeiten einer systemtheoretischen Betrachtung. Die Organisation eines Anbieters kann nach Luhmann (1991) als ein *autopoietisches, soziales System* aufgefasst werden. Die Autopoiesis beschreibt hierbei die Kerneigenschaft der Selbstherstellung und -erhaltung eines sozialen Systems (Morel, Bauer, Meleghy et al., 2015, S. 191). Ferner schreibt Luhmann (1991, S. 31) sozialen Systemen die Eigenschaft der Selbstreferentialität zu, also die *„[...] Fähigkeit, Beziehungen zu sich selbst herzustellen und diese Beziehungen zu differenzieren gegen Beziehungen zu ihrer Umwelt.“* Demnach empfiehlt sich eine simultane Betrachtung organisationaler Strukturen und Arbeitskreise mit den Aufgaben und Kompetenzprofilen involvierter Produktentwickelnden, die Handlungen in der Organisationsstruktur ausführen.

In diesem Rahmen kann die folgende, zukünftige Forschungsfrage *weiterführenden Arbeiten im Kontext des betrachteten Forschungsgegenstands* zu Grunde liegen:

Wie kann ein Anbieter für das Spezifizieren einer Produktgeneration durch Organisations- und Arbeitskreisstrukturen sowie Rollen unterstützt und befähigt werden?

Initiale Untersuchungen und Überlegungen hierzu wurden in der studentischen Abschlussarbeit Staiger (2020)⁸⁷ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt (vgl. bspw. Abbildung 7.6). In diesem

⁸⁷ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

Zusammenhang kann die Organisationsstruktur der Produktgenerations-spezifischen Produktentwicklung, um organisationale Strukturen und Arbeitskreise der Produktportfolio-übergreifenden Funktionsentwicklung ergänzt werden. Vor dem Hintergrund der *Zusammenführung von Systems Engineering und der KaSPro* zur Etablierung und Weiterentwicklung einer *systemorientierten und agilen Produktgenerationsentwicklung* in der Praxis (vgl. u.a. Albers, Hirschter, Fahl et al. (2019)), bietet sich die Gliederung in ein übergreifendes Systems Engineering Team sowie jeweils ein Anforderungs- und Architekturteam an. Funktionale Konzeptteams können ergänzend mit einem Produktportfolio-übergreifenden Fokus solche Produktfunktionen spezifizieren, die besonders stark über mehrere Subsysteme (einer logischen und/oder physischen Referenz-Architektur) vernetzt sind.

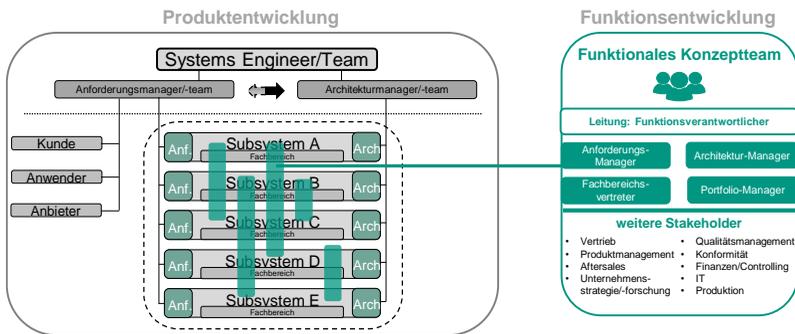


Abbildung 7.6: Schematische Darstellung eines Ansatzes der organisationalen Strukturen und Arbeitskreise zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen

Schlussendlich müssen Rollen (wie bspw. Portfolio-, Anforderungs- oder Architekturmanager) definiert werden, um einerseits klare Verantwortlichkeiten zu schaffen und andererseits die Aufgaben entsprechend den Kompetenzprofilen involvierter Produktentwickelnden zu verteilen. Eine gezielte Kompetenzvermittlung der handelnden Akteure sowie prozessorientierte Unterstützung bei der Anwendung der Methoden durch systematisches Coaching unterstützt die Verbreitung in der Organisation. Unter Berücksichtigung des Systems Engineering kann das *Framework des ASD-Innovation Coachings* (vgl. Albers, Hahn, Niever et al. (2020)) die erfolgreiche Zusammenarbeit in funktionsübergreifenden und selbstorganisierten Entwicklungsteams ermöglichen. Dieses interne Coaching bietet die Chance, die Akteure zum Spezifizieren einer Produktgeneration in agil-strukturierten Prozessen des ASD – Agile Systems Design nach Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019) zu befähigen.

Literaturverzeichnis

- Abbott, R. (2006). Open at the Top; Open at the Bottom; and Continually (but Slowly) Evolving. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings 2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering* (24.-26.04.2006), Los Angeles, CA, USA (S. 41–46). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Albers, A. (1991). Das Zweimassenschwungrad der dritten Generation – Optimierung der Komfoteigenschaften von PKW-Antriebssträngen. In H. Peeken & C. Troeder (Hrsg.), *Antriebs-technisches Kolloquium '91. Maschinen- und Anlagenüberwachung, Komponenten der Antriebstechnik im System, Neu- und Weiterentwicklungen* (S. 245–267). Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Albers, A. (2010). Five hypotheses about engineering processes and their consequences. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusák (Hrsg.), *Proceedings of the TMCE 2010 Symposium. Virtual Engineering for Competitiveness* (12.-16.04.2010), Ancona, Italien (S. 343–356). Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- Albers, A. (2011). Der Entwickler im Zentrum des Systems der Produktentstehung. In D. Spath, H. Binz & B. Bertsche (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2011. Engineering - eine Herausforderung für die Zukunft* (23.-24.11.2011), Stuttgart (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A. (2020). *Erfolgreiche Produktentwicklung. Innovation und Markterfolg*. Vorlesung zu Methoden und Prozessen der Produktgenerationsentwicklung. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: https://www.ipek.kit.edu/70_2829.php
- 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. Mporfu & P. Butala (Hrsg.), *Procedia 30th CIRP Design. Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking* (05.-08.05.2020), Kruger National Park, South Africa (Procedia CIRP, Vol. 91, S. 875–882). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- 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.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Reiß, N. & Bursac, N. (2017). Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering. *Design Science Journal*, Vol. 3 (E5), 1–19. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.5>
- Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S. & Klingler, S. (2013). X-in-the-Loop. A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. S. Kim, S. W. Lee, J. Clarkson & G. Cascini (Hrsg.), *DS 75: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Design Information and Knowledge* (19.-22.08.2013), Seoul, Korea (ICED, S. 391–400). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A. & Braun, A. (2011a). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development (IJPD)*, Vol. 15 (No. 1/2/3), 6–25. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2011.043659>

- Albers, A. & Braun, A. (2011b). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 5–30). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446428911.001>
- Albers, A., Braun, A. & Muschik, S. (2010a). Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung. In M. Maurer & S.-O. Schulze (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering (TdSE) 2010. Menschen - Kosten - Komplexe Produkte - Dienstleistungen* (10.-12.11.2010), München, Freising (S. 87–96). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A., Braun, A. & Muschik, S. (2010b). Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes. In P. Heisig, P. J. Clarkson & S. Vajna (Hrsg.), *Modelling and Management of Engineering Processes* (S. 15–26). London, UK: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-199-8_2
- Albers, A., Burkardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN problem solving methodology in the product development. In A. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED05). Engineering Design and the Global Economy* (15.-18.08.2005), Melbourne, Australia (n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- 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 International Conference on Interactive Collaborative Learning*. Volume 2 (27.-29.09.2017), Budapest, Hungary (Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC), Vol. 716, S. 636–647). Cham, Schweiz: Springer International Publishing.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2016). PGE – Product Generation Engineering. Case Study of the Dual Mass Flywheel. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić & S. Škec (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2016. 14th International Design Conference* (16.-19.05.2016), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 791–800). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, Vol. 81 (No. 1), 13–31. <https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>
- Albers, A., Bursac, N. & Scherer, H. (2014). Modelbased Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung. *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP, Ausgabe 1* (April 2014), 20–21.
- 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 smarterer Produkte für die Zukunft* (18.-19.06.2015), Stuttgart (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A. & Düser, T. (2011). Validierung im Produktentstehungsprozess. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 133–142). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A., Ebel, B. & Lohmeyer, Q. (2012). Systems of Objectives in Complex Product Development. In I. Horváth, Z. Rusák, A. Albers & M. Behrendt (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010 Symposium. Mobile and ubiquitous technologies for global product development* (07.-11.05.2012), Karlsruhe (S. 267–278). Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- 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*, Nr. 149, 1–26. <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.), *Procedia 30th CIRP Design. Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking* (05.-08.05.2020), Kruger National Park, South Africa (Procedia CIRP, Vol. 91, S. 665–677). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Haag, S., Hünemeyer, S. & Staiger, T. (2020). Defining, Formulating and Modeling Product Functions in the Early Phase in the Model of PGE – Product Generation Engineering. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 6th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2020* (12.10.-12.11.2020), Wien, Österreich (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T. & Rapp, S. (2021). Application of the Generic Variation Operator in the Model of PGE – Product Generation Engineering onto the Element Types of Properties and Functions of Technical Systems. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021 (CIRP Design 2021)* (19.-21.05.2021), Enschede, Netherlands (Procedia CIRP, Vol. 100, 870-875). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Fischer, J., Klingler, S. & Behrendt, M. (2014, 28. Mai). *Durchgängige Validierung und Verifizierung am Beispiel der akustischen Eigenschaften eines Elektrofahrzeugs*. Vortrag im Rahmen vom 7. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug. Graz, Österreich: Virtual Vehicle Research GmbH.
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2010). Von der fachdisziplinerorientierten zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In R. Ruprecht (Hrsg.), *Produktion in Deutschland hat Zukunft. Ergebnisse aus dem BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“* (09.-10.03.2010), Karlsruhe (S. 248–256). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinerorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sandler & R. Stark (Hrsg.), *Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung* (acatech DISKUSSION, April 2012, S. 17–29). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6_3
- Albers, A., Gladysz, B., Heitger, N. & Wilmsen, M. (2016). Categories of product innovations. A prospective categorization framework for innovation projects in early development phases based on empirical data. In L. Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), *Procedia 26th CIRP Design. Creative Design of Products and Production Systems* (15.-17.06.2016), Stockholm, Sweden (Procedia CIRP, Vol. 50, S. 135–140). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Gladysz, B., Kniel, J., Aschoff, M. & Meyer, A. (2016). Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. In K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg, R. H. Stelzer, P. Köhler et al. (Hrsg.), *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016. Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion* (06.-07.10.2016), Rostock (Berichte aus der Konstruktionstechnik, o. S.). Aachen: Shaker Verlag.
- Albers, A., Grunwald, A., Marthaler, F., Reiß, N. & Bursac, N. (2018). Experience Scenarios to Stimulate Creativity. Generating Solutions in the System of Systems of Seamless Mobility. In E. Dekoninck, A. Wodehouse, C. Snider, G. Georgiev & G. Cascini (Hrsg.), *DS 89: Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC 2018)* (31.01.-02.02.2018), Bath, UK (ICDC, S. 93–100). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.

- Albers, A., Hahn, C., Niever, M., Heimicke, J., Marthaler, F. & Spadinger, M. (2020). Forcing Creativity in Agile Innovation Processes through ASD-Innovation Coaching. In J. F. Boujut, G. Cascini, S. Ahmed-Kristensen, G. V. Georgiev & N. Iivari (Hrsg.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Design Creativity (ICDC 2020)* (26.-28.08.2020), Oulu, Finland (ICDC, S. 231–238). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- 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 IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 4th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2018* (01.-03.10.2018), Rome, Italy (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- 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* (08.-09.12.2016), Berlin (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 360, o. S.). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- 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. Agilität und kognitives Engineering* (15.-16.05.2019), Stuttgart (S. 253–262). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- 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 P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018. Design in the era of digitalization* (14.-17.08.2018), Linköping, Sweden (NordDESIGN, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Degner, N. & Dühr, K. (2019). The Product Developer in the Centre of Product Development. A Systematic Literature Review on Describing Factors. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *DS 94: Proceedings of the Design Society: 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19). Responsible Design for Our Future* (05.-08.08.2019), Delft, Netherlands (ICED, S. 1843–1852). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiß, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N. & Marthaler, F. (2019). Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD – Agile Systems Design. *KIT Scientific Working Papers, Nr. 113*, 1–14. <https://doi.org/10.5445/IR/1000091847>
- 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.), *Procedia 28th CIRP Design* (23.-25.05.2018), Nantes, France (Procedia CIRP, Vol. 70, S. 253–258). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- 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 RADMA (Hrsg.), *R&Designing Innovation. Transformational Challenges for Organisations and Society* (30.06.-04.07.2018), Milan, Italy (n. p.). Chester, UK: RADMA.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J. & Rapp, S. (2021). Analysis of the Variation of the Element Types of Properties and Functions of Technical Systems in Product Development Practice. In

-
- E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021 (CIRP Design 2021)* (19.-21.05.2021), Enschede, Netherlands (Procedia CIRP, Vol. 100, 876-881). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Rapp, S., Rehn, K. & Haag, S. (2022). Analysis of the Variation of Physical Elements and their Effects on Properties and Functions using the Example of Different Generations of the System "Roll Stabilization". *KIT Scientific Working Papers, Nr. 183*.
- 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.), *Procedia 29th CIRP Design. Open Design and Design as Exponential Technology* (08.-10.05.2019), Póvoa de Varzim, Portugal (Procedia CIRP, Vol. 84, S. 838–847). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Wöhrle, G., Reinemann, J. & Rapp, S. (2020). Generic reference product model for specifying complex products by the example of the automotive industry. In I. Horváth & G. N. Keenaghan (Hrsg.), *Digital Proceedings of TMCE 2020. Designing and engineering of smart systems* (11.-15.05.2020), Dublin, Ireland (S. 353–370). Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- Albers, A., Klingler, S. & Ebel, B. (2013). Modeling Systems of Objectives in Engineering Design Practice. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. S. Kim, S. W. Lee, J. Clarkson & G. Cascini (Hrsg.), *DS 75: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Design Information and Knowledge* (19.-22.08.2013), Seoul, Korea (ICED, S. 379–388). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. Proceedings of DESIGN 2014. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014. 13th International Design Conference* (19.-22.05.2014), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 81–90). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Kurrle, A. & Klingler, S. (2016). The Connected Car. A system-of-systems: Exploration of challenges in development from experts view. In M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann (Hrsg.), *16. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik* (15.-16.03.2016), Stuttgart (S. 1439–1450). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Albers, A. & Lohmeyer, Q. (2012). Advanced systems engineering. towards a model-based and human-centered methodology. In I. Horváth, Z. Rusák, A. Albers & M. Behrendt (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010 Symposium. Mobile and ubiquitous technologies for global product development* (07.-11.05.2012), Karlsruhe (S. 407–416). Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- 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 & J. Malmqvist (Hrsg.), *DS 68: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)* (15.-19.08.2011), Copenhagen, Denmark (ICED, S. 256–265). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Mandel, C., Yan, S. & Behrendt, M. (2018). System of Systems Approach for the Description and Characterization of Validation Environments. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018. 15th International Design Conference* (21.-24.05.2018), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 2799–2810). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.

- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *VDI Konstruktion, 6-2015*, 74–81.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. *Konstruktion, 7-8/2002*, 55–60.
- Albers, A., Matthiesen, S., Bursac, N., Moeser, G., Schmidt, S. & Lüdcke, R. (2014). Abstraktionsgrade der Systemmodellierung – von der Sprache zur Anwendung. In M. Maurer & S.-O. Schulze (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering (TdSE) 2014* (12.-14.11.2014), Bremen (S. 181–192). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2006). A New Approach in Product Development based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In V. Václav & H. Stanislav (Hrsg.), *DS 41: Proceedings of AEDS 2006 Workshop* (2006, Oktober), Pilsen, Czech Republic (AEDS, S. 5–12). Glasgow, Scotland, UK: 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.), *DS 42: Proceedings of ICED 2007. 16th International Conference on Engineering Design* (28.-31.07.2007), Paris, France (ICED, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Meyer-Schwickerath, B. & Siebe, A. (2013). Vorausschau im Kontext des Produktentstehungsprozesses mittelständischer Unternehmen – Ein Ansatz auf Basis des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM). In J. Gausemeier (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung* (05.-06.12.2013), Berlin (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 318, 55-74). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Albers, A. & Muschik, S. (2010). The Role and Application of Activities in the Integrated Product Engineering Model (iPeM). In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 60: Proceedings of DESIGN 2010. 11th International Design Conference* (17.-20.05.2010), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 127–136). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- 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. Produktentwicklung im disruptiven Umfeld* (28.-29.06.2017), Stuttgart (S. 345–354). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- 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. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *DS 102: Proceedings of the DESIGN 2020. 16th International Design Conference* (26.-19.10.2020), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 2235–2244). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 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.), *Procedia 28th CIRP Design* (23.-25.05.2018), Nantes, France (Procedia CIRP, Vol. 70, S. 469–474). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Rapp, S., Hirschter, T., Fahl, J. & Wöhrle, G. (2021). Providing a Model for Estimating Innovation Potential and Development Risks in the Research and Engineering of Mechatronic Systems Based on Variations in Different System Views and Characteristics of Reference System Elements. In RADMA (Hrsg.), *Innovation in an Era of Disruption* (06.-08.07.2021), Glasgow, UK (n. p.). Chester, UK: RADMA.

-
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In S. Wartack & B. Schleich (Hrsg.), *DS 94: Proceedings of the Design Society: 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19). Responsible Design for Our Future* (05.-08.08.2019), Delft, Netherlands (ICED, S. 1693–1702). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Albers, A., Reinemann, J., Fahl, J. & Hirschter, T. (2019). Augmented Reality for Product Validation: Supporting the Configuration of AR-Based Validation Environments. In J. Y. Chen & G. Fragomeni (Hrsg.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications and Case Studies. 11th International Conference* (26.-31.07.2019), Orlando, FL, USA (Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 11575, S. 429–448). Cham, Schweiz: Springer.
- 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.), *Procedia 29th CIRP Design. Open Design and Design as Exponential Technology* (08.-10.05.2019), Póvoa de Varzim, Portugal (Procedia CIRP, Vol. 84, S. 630–637). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- 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.), *DS 85: Proceedings of NordDesign 2016* (10.-12.08.2016), Trondheim, Norway (NordDESIGN, S. 411–420). Glasgow, Scotland, UK: 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.), *Procedia 26th CIRP Design. Creative Design of Products and Production Systems* (15.-17.06.2016), Stockholm, Sweden (Procedia CIRP, Vol. 50, S. 100–105). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Urbanec, J. & Lüdcke, R. (2014). Situation-Appropriate Method Selection in Product Development Process. Empirical Study of Method Application. In M. Laakso & K. Ekman (Hrsg.), *DS 81: Proceedings of NordDesign 2014* (27.-29.08.2014), Espoo, Finland (NordDESIGN, S. 550–559). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2018). Extended Target Weighing Approach – Estimation of Technological Uncertainties of Concept Ideas in Product Development Processes. *SAE Technical Paper, 2018-37-0028*, n. p. <https://doi.org/10.4271/2018-37-0028>
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2020). Funktionsbasierte Entwicklung leichter Produkte. In F. Henning & E. Möller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (2., überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 133–151). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446459847.006>
- 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.), *Procedia 25th CIRP Design* (02.-04.03.2015), Haifa, Israel (Procedia CIRP, Vol. 36, S. 129–134). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Stürmlinger, T., Mandel, C., Wang, J., Baneres, M. & Behrendt, M. (2019). Identification of potentials in the context of Design for Industry 4.0 and modelling of interdependencies between product and production processes. In G. D. Putnik (Hrsg.), *Procedia 29th CIRP Design. Open Design and Design as Exponential Technology* (08.-10.05.2019), Póvoa de Varzim, Portugal (Procedia CIRP, Vol. 84, S. 100–105). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N. (2018). Live-Labs as real-world validation environments for design methods. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pav-

- ković (Hrsg.), *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018. 15th International Design Conference* (21.-24.05.2018), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 13–24). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Albers, A., Weissenberger-Eibl, M. A., Dühr, K., Zech, K. & Seus, F. (2020). Literature-based identification of success-relevant influencing factors of distributed product development. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Procedia 30th CIRP Design. Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking* (05.-08.05.2020), Kruger National Park, South Africa (Procedia CIRP, Vol. 91, S. 415–420). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- 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. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design. Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). London, UK: Springer.
- Albright, R. E. & Kappel, T. A. (2003). Roadmapping In the Corporation. *Research-Technology Management*, Vol. 46 (Issue 2), 31–40. <https://doi.org/10.1080/08956308.2003.11671552>
- Alink, T. (2010). *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Forschungsberichte IPEK, Band 48*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000023234>
- Allmann, C. (2007). Anforderungen auf Kundenfunktionsebene in der Automobilindustrie. In W.-G. Bleek, J. Raasch & H. Züllighoven (Hrsg.), *Software Engineering 2007 (SE 2007). Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik* (27.-30.03.2007), Hamburg (o. S.). Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V.
- Alt, O. (2019). Modellbasiertes Systems Engineering ohne Anlernaufwand mit den Fundamental Modeling Concepts. In S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger & S. Ackva (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering (TdSE) 2019* (06.-08.11.2019), München (S. 205–212). Otto-brunn: Gesellschaft für Systems Engineering (GfSE).
- Andreasen, M. M. (1994). Modelling. The Language of the Designer. *Journal of Engineering Design*, Vol. 5 (Issue 2), 103–115. <https://doi.org/10.1080/09544829408907876>
- Arnemann, J. (2019). Epigenetik. In A. M. Gressner & T. Arndt (Hrsg.), *Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik* (Springer Reference Medizin, S. 795). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Arslan, M., Bursac, N., Killer, B. & Albers, A. (2018). Developing R&D-Strategies for Future Innovations. Activities in the Context of Technological Transformation and PGE - Product Generation Engineering. In RADMA (Hrsg.), *R&Designing Innovation. Transformational Challenges for Organisations and Society* (30.06.-04.07.2018), Milan, Italy (n. p.). Chester, UK: RADMA.
- Arslan, M., Haug, F., Heitger, N., Krämer, L. & Albers, A. (2016). Don't get stuck in complexity. Coping with strategic complexity in the context of Product Generation Engineering. In RADMA (Hrsg.), *From Science to Society. Innovation and Value Creation* (03.-06.07.2016), Cambridge, UK (n. p.). Chester, UK: RADMA.
- Atteslander, P. (2010). *Methoden der empirischen Sozialforschung* (13., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Avison, D., Lau, F., Myers, M. & Nielsen, P. A. (1999). Action Research. To make academic research relevant, researchers should try out their theories with practitioners in real situations and real organizations. *Communications of the ACM*, 42 (1), 94–97. <https://doi.org/10.1145/291469.291479>
- Bader, J. J. (2007). *Die Hauptstellgrößen des Produktzielmanagements am Beispiel der Automobilentwicklung*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau. Dresden: TU Dresden.

-
- Bailom, F., Hinterhuber, H., Matzler, K. & Sauerwein, E. (1996). Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit. *Marketing Zeitschrift für Forschung und Praxis (ZFP)*, 18 (2), 117–126.
- Bartuschat, M. (2001). Entwicklung und Einsatz eines Konfigurationssystems am Beispiel des Omnibus. In VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.), *Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen. Erfahrungen, Methoden und Instrumente* (07.-08.11.2001), Kassel (VDI-Berichte, Bd. 1645, S. 103–120). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Bayer, T. (2010). *Integriertes Variantenmanagement. Variantenkostenbewertung mit faktorenanalytischen Komplexitätstreibern*. Dissertation, Institut für Angewandte Betriebswirtschaftslehre - Unternehmensführung (IBU). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Beck, A., Eichstädt, H., Schweibenz, W., Gaiser, B., Savigny, P. v. & Schubert, U. (2005). Personas in der Praxis. In M. Hassenzahl & M. Peissner (Hrsg.), *Usability Professionals 2005 (UP05)* (S. 94–100). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Becker, J., Knackstedt, R. & Pöppelbuß, J. (2009). Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management. Vorgehensmodell und praktische Anwendung. *Wirtschaftsinformatik*, Vol. 51, 249–260. <https://doi.org/10.1007/s11576-009-0167-9>
- Beihoff, B., Oster, C., Friedenthal, S., Paredis, C., Kemp, D., Stoewer, H., Nichols, D. & Wade, J. (2014). *A World in Motion – Systems Engineering Vision 2025* (INCOSE, Hrsg.). <https://www.incose.org/>. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: http://www.incose.org/newsevents/announcements/docs/SystemsEngineeringVision_2025_June2014.pdf
- Beitz, W. (1985). Kreativität des Konstrukteurs. *Konstruktion*, 37 (10), 381–386.
- Bergenthal, J. (2011). *Final Report Model Based Engineering (MBE) Subcommittee* (NDIA Systems Engineering Division, Hrsg.). <http://www.ndia.org/>: M&S Committee. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <http://www.ndia.org/-/media/sites/ndia/meetings-and-events/divisions/systems-engineering/modeling-and-simulation/reports/model-based-engineering.ashx>
- Bernhart, W. (2004). Concept Commonalities. Von komponentenorientierten Plattformen zu funktionsorientierten Systembaukästen. *Automotive Executive Newsletter, Frühjahr 2004*, 4–5. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: http://www.adlittle.cn/sites/default/files/viewpoints/ADL_Newsletter_Automotive_Spring_2004.pdf
- Bertalanffy, L. v. (1969). *General System Theory. Foundations, Development, Applications*. New York, NY, USA: George Braziller.
- Birkhofer, H. & Jänsch, J. (2003). Interaction between Individuals. In U. Lindemann (Hrsg.), *Human Behaviour in Design. Individuals, Teams, Tools* (S. 105–110). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Blees, C. (2011). *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 3*. Dissertation, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT). Hamburg: TU Hamburg-Harburg. <https://doi.org/10.15480/882.1037>
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London, UK: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bliss, C. (2000). *Management von Komplexität - Ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion. Unternehmensführung und Marketing, Band 35*. Dissertation, Institut für Marketing. Wiesbaden: WWU Münster. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-10720-0>
- Börsting, P., Keller, R., Alink, C., Eckert, C. M., Albers, A. & Clarkson, P. J. (2008). The Relation between Function and Requirements for an Improved Detection of Component Linkages. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 48: Proceedings DESIGN 2008. 10th International Design Conference* (19.-22.05.2008), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 309–316). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.

- Boulding, K. E. (1956). General Systems Theory. The Skeleton of Science. *Management Science*, Vol. 2 (No. 3), 197–208.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (Hrsg.). (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7., aktualisierte Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01691-3>
- Brandt, L. S. (2016). *Architekturgesteuerte Elektrik/Elektronik Baukastenentwicklung im Automobil. Produktentwicklung München, D138*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung. München: TU München.
- Braun, A. (2014). *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung – Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*. *Forschungsberichte IPEK, Band 72*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Breiting, A. & Flemming, M. (1993). *Theorie und Methoden des Konstruierens*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84864-3>
- Breunig, S. A. E. (2017). *Produktarchitekturgestaltung mechatronischer Baukastensysteme. Ergebnisse aus der Produktionstechnik, 22/2017*. Dissertation, Werkzeugmaschinenlabor (WZL). Aachen: RWTH Aachen.
- Brin, C. & Durm, J. (01/1994), *B60K 11/08*. Kraftfahrzeug, insbesondere Personenwagen, mit einer im Heckbereich angeordneten Luftleitvorrichtung. Europäische Patentschrift. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (Anmelder), EP 0 447 625 B1.
- Bringmann, E. & Krämer, A. (2008). Model-based Testing of Automotive Systems. In IEEE Computer Society (Hrsg.), *ICST '08: Proceedings of the 2008 International Conference on Software Testing, Verification, and Validation* (09.-11.04.2008), Lillehammer, Norway (S. 485–493). Red Hook, NY, USA: Curran Associates, Inc.
- Bucciarelli, L. L. (1994). *Designing Engineers*. Cambridge, MA, USA: MIT Press. <https://doi.org/10.1080/03043799508928289>
- Bursac, N. (2016). *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 93*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Chrissis, M. B., Konrad, M. & Shrum, S. (2009). *CMMI: Richtlinien für Prozess-Integration und Produkt-Verbesserung*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley.
- Christiansen, S.-K. & Gausemeier, J. (2010). Klassifikation von Reifegradmodellen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 105 (Issue 4), 344–349. <https://doi.org/10.3139/104.110290>
- Clark, K. & Fujimoto, T. (1991). *Product Development Performance. Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. Cambridge, MA, USA: Harvard Business School Press.
- Cooper, R. G. (1994). Third-Generation New Product Processes. *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 11 (Issue 1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/1540-5885.1110003>
- Cooper, R. G. (2001). *Winning at New Products. Accelerating the Process from Idea to Launch* (3rd Edition). Reading, MA, USA: Perseus Books.
- Cooper, R. G. & Edgett, S. J. (2010). Developing a Product Innovation and Technology Strategy for Your Business. *Research-Technology Management*, Vol. 53 (Issue 3), 33–40. <https://doi.org/10.1080/08956308.2010.11657629>
- Cooper, R. G. & Kleinschmidt, E. J. (1993). Screening New Products for Potential Winners. *Long Range Planning*, Vol. 26 (Issue 6), 74–81. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(93\)90208-W](https://doi.org/10.1016/0024-6301(93)90208-W)

-
- Corbett, C., Brunner, M., Schmidt, K., Schneider, R. & Dannebaum, U. (2018). Leveraging Hardware Security to Secure Connected Vehicles. *SAE Technical Paper, 2018-01-0012*, n. p. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0012>
- Cross, M. & Sivaloganathan, S. (2005). A methodology for developing company-specific design process models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 219* (Issue 3), 265–282. <https://doi.org/10.1243/095440505X28972>
- Daenzer, W. F. & Büchel, A. (1976). *Systems Engineering. Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*. Köln: Venator & Hanstein.
- Dahmann, J. S. & Baldwin, K. J. (2008). Understanding the Current State of US Defense Systems of Systems and the Implications for Systems Engineering. In IEEE (Hrsg.), *2008 IEEE International Systems Conference Proceedings* (07.-10.04.2008), Montreal, Canada (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- D'Ambrosio, J. & Soremekun, G. (2017). Systems engineering challenges and MBSE opportunities for automotive system design. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)* (05.-08.10.2017), Banff, AB, Canada (S. 2075–2080). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Danneels, E. (2004). Disruptive Technology Reconsidered. A Critique and Research Agenda. *Journal of Product Innovation Management, Vol. 21* (Issue 4), 246–258. <https://doi.org/10.1111/j.0737-6782.2004.00076.x>
- Darlington, M. J. & Culley, S. J. (2002). Current Research in the Engineering Design Requirement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216* (Issue 3), 375–388. <https://doi.org/10.1243/0954405021520049>
- Deigendesch, T. (2009). *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel: Dissertation. Forschungsberichte IPEK, Band 41*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).
- Delligatti, L. (2014). *SysML distilled. A Brief Guide to the Systems Modeling Language*. Upper Saddle River, NJ, USA: Addison-Wesley.
- Deming, W. E. (2000). *Out of the Crisis* (Reprint Edition). Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Denger, A., Fritz, J., Kissel, M., Parvan, M. & Zingel, C. (2012). Potentiale einer funktionsorientierten Lenkung mechatronischer Produkte in der Automobilindustrie. In M. Maurer & S.-O. Schulze (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering (TdSE) 2012. Zusammenhänge erkennen und gestalten* (07.-09.11.2012), Paderborn (S. 405–414). München: Carl Hanser Verlag.
- Deubzer, F. & Lindemann, U. (2009). Networked Modelling. Use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis. In M. Norell Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *DS 58: Proceedings of ICED 09. 17th International Conference on Engineering Design* (24.-27.08.2009), Palo Alto, CA, USA (ICED, 371–380). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Dewar, R. D. & Dutton, J. E. (1986). The Adoption of Radical and Incremental Innovations. An Empirical Analysis. *Management Science, Vol. 32* (No. 11), 1371–1520. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.11.1422>
- Dick, J., Hull, E. & Jackson, K. (2017). *Requirements Engineering* (4. Auflage). Basel, Schweiz: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61073-3>
- Diez, W. (2006). *Automobil-Marketing. Navigationssystem für neue Absatzstrategien* (5., erweiterte und aktualisierte Auflage). München: mi-Wirtschaftsbuch Verlag.

- DIN EN, 15380:2006/2013/2014 (2006/2013/2014). *Bahnanwendungen – Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO, 9241-210:2011-01 (2011). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 9000:2015-11 (2015). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO, 31000:2018-10 (2018). *Risikomanagement - Leitlinien*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 9241-210:2020-03 (2020). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth Verlag.
- Disselkamp, M. (2012). *Innovationsmanagement. Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen* (2., überarbeitete Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
<https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4472-6>
- Dörner, D. (1979). *Problemlösen als Informationsverarbeitung* (2. Auflage). Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer.
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. (2016). *Drei spezifische Varianten: aktive Wankstabilisierung PDCC*. Porsche-Fahrwerkentwicklung. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter:
<https://presskit.porsche.de/specials/de/porsche-fahrwerkentwicklung/topic/drei-spezifische-varianten-aktive-wankstabilisierung-pdcc.html>
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. (2020a). *Neuer 911 Turbo S: in jeder Fahrsituation die passende Aerodynamik*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://newsroom.porsche.com/de/2020/technik/porsche-active-aerodynamics-911-turbo-s-20507.html>
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (Hrsg.). (2020b). *Pioniergeist. Geschäfts- und Nachhaltigkeitsbericht der Porsche AG 2019*. Stuttgart. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://newsroom.porsche.com/dam/jcr:aaacdf1-d8df-47f4-9339-2b620fb14acf/Gesch%C3%A4fts-%20und%20Nachhaltigkeitsbericht%202019%20der%20Porsche%20AG.pdf.PDF.PDF>
- Dudenredaktion (Hrsg.). (n.d.a). *Größe*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Groesse>
- Dudenredaktion (Hrsg.). (n.d.b). *Physiologie*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Physiologie>
- Dudenredaktion (Hrsg.). (n.d.c). *Psychologie*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Psychologie>
- Dudenredaktion (Hrsg.). (n.d.d). *Sportwagen*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Sportwagen>
- Dumitrescu, R., Albers, A., Gausemeier, J., Riedel, O. & Stark, R. (Hrsg.). (2021). *Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*. Paderborn: Fraunhofer Verlag.
- Dumitrescu, R., Bremer, C., Kühn, A., Trächtler, A. & Frieben, T. (2015). Model-based development of products, processes and production resources. A state oriented approach for an integrated system model of objects, processes and systems. *at-Automatisierungstechnik*, 63 (10), 844–857. <https://doi.org/10.1515/auto-2015-0014>
- Dumitrescu, R., Drewel, M. & Falkowski, T. (2020). KI-Marktplatz. Das Ökosystem für Künstliche Intelligenz in der Produktentstehung. *Zeitschrift für wirtschaftliche Fabrikplanung (ZWF)*, 115 (1-2), 86–90. <https://doi.org/10.3139/104.112240>
- Dumitrescu, R., Tschirner, C. & Bansmann, M. (2020). Systems Engineering als Grundlage der Gestaltung digitaler Arbeitswelten in der Produktentstehung. In G. W. Maier, G. Engels & E. Steffen (Hrsg.), *Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten* (S. 405–432). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

-
- Durst, C. & Durst, M. (2016). Integriertes Innovationsmanagement. Vom Umfeldscanning zur Roadmap. In T. Abele (Hrsg.), *Die frühe Phase des Innovationsprozesses. FOM-Edition (FOM Hochschule für Oekonomie & Management)* (S. 217–233). Wiesbaden: Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09722-6_12
- Düser, T. (2010). *X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Forschungsberichte IPEK, Band 47*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Düser, T., Albers, A. & Ott, S. (2008). X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In Haus der Technik e.V. (Hrsg.), *8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation* (16.-17.09.2008), Kassel (o. S.). Kassel: Haus der Technik e.V.
- Earl, C., Johnson, J. & Eckert, C. M. (2005). Complexity. In J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design Process Improvement. A Review Of Current Practice* (S. 174–197). London, UK: Springer.
- Ebel, B. (2015). *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Forschungsberichte IPEK, Band 85*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Eckert, C. M., Alink, T. & Albers, A. (2010). Issue Driven Analysis of an Existing Product at Different Levels of Abstraction. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 60: Proceedings of DESIGN 2010. 11th International Design Conference* (17.-20.05.2010), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 673–682). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Eckert, C. M., Alink, T., Ruckpaul, A. & Albers, A. (2011). Different notions of function. results from an experiment on the analysis of an existing product. *Journal of Engineering Design*, Vol. 22 (Nos. 11-12), 811–837. <https://doi.org/10.1080/09544828.2011.603297>
- Eckert, C. M., Clarkson, P. J. & Stacey, M. K. (2003). The spiral of applied research. A methodological view on integrated design research. In A. Folkesson, K. Galen, M. Norell & U. Sellgren (Hrsg.), *DS 31: Proceedings of ICED 03. 14th International Conference on Engineering Design* (19.-21.08.2003), Stockholm, Sweden (ICED, S. 245–255). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Eckert, C. M., Clarkson, P. J. & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, Vol. 15, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00163-003-0031-7>
- Ehrlenspiel, K. (2009). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (4., überarbeitete Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5., überarbeitete und erweiterte Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Eigner, M., Dickopf, T. & Apostolov, H. (2019). Interdisziplinäre Design Methodik. In R. H. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *Entwickeln Entwerfen Erleben in Produktentwicklung und Design 2019* (27.-28.06.2019), Dresden (S. 415–435). Dresden: TUDpress.
- Eigner, M., Dickopf, T., Schulte, T. & Schneider, M. (2015). mecPro²- Entwurf einer Beschreibungssystematik zur Entwicklung cybertronischer Systeme mit SysML. In S.-O. Schulze & C. Muggeo (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering (TdSE) 2015* (11.-13.11.2015), Ulm (S. 163–172). München: Carl Hanser Verlag.

- Eigner, M., Koch, W. & Muggeo, C. (2017). *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55124-0>
- Eigner, N. & Stelzer, R. H. (2009). *Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management* (2., neu bearbeitete Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68401-5>
- Eiletz, R. (1999). *Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Beispiel PKW-Entwicklung. Konstruktionstechnik München, Band 32*. Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau. München: TU München.
- Endl, M. (2019). *Produktportfolioübergreifende Definition funktionaler Produktkonzepte in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Konzeptentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. IPEK-Thesis, Nr. 3890, Sperrvermerk bis 2024*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Erden, M. S., Komoto, H., van Beek, T. J., D'Amelio, V., Echavarria, E. & Tomiyama, T. (2008). A review of function modeling. Approaches and applications. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 22 (Issue 2), 147–169. <https://doi.org/10.1017/S0890060408000103>
- Ettlie, J. E., Bridges, W. P. & O'Keefe, R. D. (1984). Organization Strategy and Structural Differences for Radical Versus Incremental Innovation. *Management Science*, Vol. 30 (No. 6), 653–776. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.6.682>
- European Industrial Research Management Association (Hrsg.). (1997). *Technology roadmapping. delivering business vision* (Working Group Report No. 52). Paris, France.
- Ewert, R. (2020). *Prozessuale und methodische Unterstützung des kundenorientierten Anforderungsmanagements in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. IPEK-Thesis, Nr. 3891, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Fahl, J. (2017). *Prozessmodell zur funktionalen Beschreibung einer Produktgeneration in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Gesamtfahrzeugentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. IPEK-Thesis, Nr. 3464, Sperrvermerk bis 2022*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Fahl, J., Hirschter, T. & Albers, A. (2021). Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen am Beispiel der Sportwagenentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2021* (2021, Mai), Stuttgart (o.S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Fahl, J., Hirschter, T., Haag, S., Staiger, T. & Albers, A. (2020). Functions in the Early Phase of Product Development: A Systematic Literature Review. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 6th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2020* (12.10.-12.11.2020), Wien, Österreich (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- 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 IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 5th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2019* (01.-03.10.2019), Edinburgh, UK (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Fahl, J., Hirschter, T., Maier, H. & Albers, A. (2020). Cross-Industry Sectoral Study: Interactions and Challenges of Requirements Engineering in the Early Phase of Product Development.

-
- In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deininger (Hrsg.), *DS 101: Proceedings of NordDesign 2020* (12.-14.08.2020), Lyngby, Dänemark (NordDESIGN, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Fahl, J., Hirschter, T., Wöhrle, G. & Albers, A. (2021). Proposing a Specification Structure for Complex Products in Model-Based Systems Engineering (MBSE). In O. Isaksson & M. Panarotto (Hrsg.), *Proceedings of the 23rd International Conference on Engineering Design (ICED21)* (16.-20.08.2021), Gothenburg, Sweden (ICED, S. 2481–2490). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. (2016). *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse* (8., überarbeitete und ergänzte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50372-0>
- Feldhusen, J. & Gebhardt, B. (2008). *Product Lifecycle Management für die Praxis. Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34009-6>
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollständig überarbeitete Auflage 2013). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>
- Fink, A. (2019). *Die Zukunft der urbanen Mobilität. Szenarien und Perspektiven für die Mobilität von morgen* (Scenario Management International AG, Hrsg.) (Urbane Mobilität 2040). Paderborn.
- Fink, A., Schlake, O. & Siebe, A. (2001). *Erfolg durch Szenario-Management. Prinzip und Werkzeuge der strategischen Vorausschau* (2. Auflage). Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Fink, A. & Siebe, A. (2016). *Szenario-Management. Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen*. Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Frank, U. (2006). *Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175*. Dissertation, Heinz Nixdorf Institut. Paderborn: Universität Paderborn.
- Franke, H.-J. (1985). Konstruktionsmethodik und Konstruktionspraxis. Eine kritische Betrachtung. In V. Hubka (Hrsg.), *WDK 12: Proceedings ICED 85. Workshop Design-Konstruktion* (26.-28.08.1985), Hamburg (ICED, S. 910–924). Zürich, Schweiz: Heurista.
- Franke, H.-J. & Firchau, N. L. (1998). *Zusammenfassender Zwischenbericht des Kalenderjahres 1998 für das BMBF-Projekt "Methoden und Werkzeuge der Kostenreduktion variantenreicher Produktspektren in der Einzel- und Kleinserienfertigung – EVAPRO"* (Institut für Konstruktionslehre, Maschinen und Feinwerkelemente an der TU Braunschweig, Hrsg.). Braunschweig.
- Franke, H.-J., Hesselbach, J., Huch, B. & Firchau, N. L. (2002). *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Frech, R. (2018). *Prozess der PKW-Entwicklung. Phasen im Entwicklungsprozess*. Vorlesung zu Grundsätzen der PKW-Entwicklung I. Karlsruhe: Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: https://www.fast.kit.edu/lff/1017_1130.php
- Gaag, A. (2010). *Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung. Produktentwicklung München, D107*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung. München: TU München.
- Galbraith, J. R. (1973). *Designing Complex Organizations*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley.
- Gängl-Ehrenwerth, C., Faullant, R. & Schwarz, E. J. (2013). Kundenintegration in den Neuproduktentwicklungsprozess. In D. E. Krause (Hrsg.), *Kreativität, Innovation, Entrepreneurship* (S. 371–384). Wiesbaden: Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-02551-9_19

- Garcia, M. L. & Bray, O. H. (1997). *Fundamentals of Technology Roadmapping* (Sandia Report, SAND97-0665). Albuquerque, NM, USA: Sandia National Laboratories.
<https://doi.org/10.2172/471364>
- Gassmann, O. (2006). Innovation und Risiko. zwei Seiten einer Medaille. In O. Gassmann & C. Kobe (Hrsg.), *Management von Innovation und Risiko. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen* (2. Auflage, S. 3–24). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gausemeier, J. (2013). Strategische Planung und integrative Entwicklung der technischen Systeme von morgen. *Schriftenreihe der Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften*, o. S.
- Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Echterfeld, J., Pfänder, T., Steffen, D. & Thielemann, F. (2019). *Innovationen für die Märkte von morgen. Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Steffen, D., Czaja, A., Wiederkehr, O. & Tschirner, C. (2013). *Systems Engineering in der industriellen Praxis* (Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT & UNITY AG, Hrsg.). Paderborn.
- Gausemeier, J., Gaukster, T. & Tschirner, C. (2013). Systems Engineering Management Based on a Discipline-Spanning System Model. In C. Paredis, C. Bishop & D. Bodner (Hrsg.), *Procedia Computer Science* (19.-22.03.2013), Atlanta, GA, USA (S. 303–312). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Gausemeier, J., Lindemann, U., Reinhart, G. & Wiendahl, H.-P. (2000). *Kooperatives Produktengineering. Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens* (HNI-Verlagschriftenreihe, Bd. 79). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Gausemeier, J. & Moehringer, S. (2003). New Guideline VDI 2206. A Flexible Procedure Model for the Design of Mechatronic Systems. In A. Folkesson, K. Gralen, M. Norell & U. Sellgren (Hrsg.), *DS 31: Proceedings of ICED 03. 14th International Conference on Engineering Design* (19.-21.08.2003), Stockholm, Sweden (ICED, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Gausemeier, J. & Plass, C. (2014). *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen* (2., überarbeitete Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Gausemeier, J., Rammig, F. J. & Schäfer, W. (Hrsg.). (2009). *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus. Definitionen, Anwendungen, Konzepte* (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 234). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Gausemeier, J., Trächtler, A. & Schäfer, W. (2014). *Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten*. München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446438453>
- Geier, M., Stier, C., Düser, T., Behrendt, M., Ott, S. & Albers, A. (2009). Simulationsgestützte Methoden. IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten. *ATZextra - Automotive Engineering Partners*, Vol. 14 (Issue 14), 48–53.
- Gero, J. S. & Kannengiesser, U. (2004). The Situated Function-Behavior-Structure Framework. *Design Studies*, Vol. 25 (Issue 4), 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>
- Geschka, H., Schaufele, J. & Zimmer, C. (2017). Explorative Technologie-Roadmaps. Eine Methodik zur Erkundung technologischer Entwicklungslinien und Potenziale. In M. G. Möhrle & R. Isenmann (Hrsg.), *Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen* (VDI-Buch, 4. Auflage, 83-102). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-52709-2_6

- Gladysz, B. & Albers, A. (2018). How Do C&C²-Models Improve Efficiency, Comprehensibility and Scope in Failure Analysis. An Empirical Study based on Two Live-Labs. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *DS 92: Proceedings of the DE-DESIGN 2018. 15th International Design Conference* (21.-24.05.2018), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 1127–1138). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Gladysz, B., Beautier, E., Albers, A. & Lehle, W. (2016). PQRM – Ein Produktreifegradmodell zur entwicklungsbegleitenden Beurteilung und Steuerung der Produktqualität. *VDI Konstruktion*, Vol. 68 (Issue 10), o. S.
- Gladysz, B., Waldeier, L., Albers, A. & Jahn, H. (2018). Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung. Ein systematischer Ansatz für die Produktgenerationsentwicklung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Band 113 (Ausgabe 1-2), 42–45. <https://doi.org/10.3139/104.111827>
- Gönüldinc, O. & Hölzel, S. (2014). Adaptive Aerodynamik – Innovation des Porsche 911 Turbo. In G. Tecklenburg (Hrsg.), *Karosseriebautage Hamburg 2014. 13. ATZ-Fachtagung*. Conference Proceedings (S. 159–174). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Göpfert, J. (2009). *Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation* (2. Auflage). Norderstedt: Books on Demand.
- Grabowski, H. & Geiger, K. (Hrsg.). (1997). *Neue Wege zur Produktentwicklung*. Stuttgart: Raabe.
- Granig, P. (2007). *Innovationsbewertung. Potentialprognose und -steuerung durch Ertrags- und Risikosimulation*. Wiesbaden: Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-8350-5412-7>
- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthesen, S. & Albers, A. (2019). The contact and channel approach. 20 years of application experience in product engineering. *Journal of Engineering Design*, Vol. 31 (Issue 5), 241–265. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1699035>
- Grebici, K., Goh, Y. M. & McMahon, C. A. (2008). Uncertainty and Risk Reduction in Engineering Design Embodiment Processes. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 48: Proceedings DESIGN 2008. 10th International Design Conference* (19.-22.05.2008), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 143–156). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Grimm, K. (2003). Software Technology in an Automotive Company. Major Challenges. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings 25th International Conference on Software Engineering* (03.-10.05.2003), Portland, OR, USA (S. 498–503). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Grimm, R., Schuller, M. & Wilhelmer, R. (2014). *Portfoliomanagement in Unternehmen. Leitfaden für Manager und Investoren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00260-2>
- Gusig, L.-O. & Kruse, A. (Hrsg.). (2010). *Fahrzeugentwicklung im Automobilbau. Aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz*. München: Carl Hanser Verlag.
- Haag, S. (2020). *Untersuchung des Funktionsverständnisses und methodische Unterstützung der Funktionsentwicklung im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie. IPEK-Thesis, Nr. 4198, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Hab, G. & Wagner, R. (2017). *Projektmanagement in der Automobilindustrie. Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette* (5., aktualisierte und überarbeitete Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10472-6>
- Haberfellner, R. & Daenzer, W. F. (2002). *Systems Engineering. Methodik und Praxis* (11. Auflage). Zürich, Schweiz: Verlag Industrielle Organisation.

- Haberfellner, R., Weck, O. L. de, Fricke, E. & Vössner, S. (Hrsg.). (2015). *Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung* (13., aktualisierte Auflage). Zürich: Orell Füssli.
- Häder, M. (2019). *Empirische Sozialforschung* (4. Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26986-9>
- Hallerstede, S., Hansen, F., Holt, J., Lauritsen, R., Lorenzen, L. & Peleska, J. (2012). Technical Challenges of SoS Requirements Engineering. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 7th SoSE 2012* (16.-19.07.2012), Genova, Italy (S. 573–578). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Hansen, F. (1955). *Konstruktionssystematik. Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure* (2. Aufl.). Berlin: VEB Verlag Technik.
- Harashima, F., Tomizuka, M. & Fukuda, T. (1996). Mechatronics. "What Is It, Why, and How?". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1* (Issue 1), 1–4. An Editorial. <https://doi.org/10.1109/TMECH.1996.7827930>
- Hardt, M. & Große-Rhode, M. (2008). Funktionsorientierte Systementwicklung mit Autosar. Vom Softwarekomponentenmarkt zu architekturzentrierten Prozessen. *ATZ elektronik, Vol. 3* (Issue 6), 12–17. <https://doi.org/10.1007/BF03223932>
- Harrer, M., Görich, H.-J., Reuter, U. & Wahl, G. (2013). 50 Jahre Porsche 911 Optimierung von Fahrwerkregelung und Bremssystemen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 115* (Issue 12), 962–969. <https://doi.org/10.1007/s35148-013-0332-8>
- Hassenzahl, M. (2006). Interaktive Produkte wahrnehmen, erleben, bewerten und gestalten. In M. Eibl, H. Reiterer, P. F. Stephan & F. Thissen (Hrsg.), *Knowledge Media Design. Theorie, Methodik, Praxis* (2., korrigierte Auflage, S. 147–167). Berlin: de Gruyter. <https://doi.org/10.1524/9783486593433.147>
- Hauschildt, J., Salomo, S., Schultz, C. & Kock, A. (2016). *Innovationsmanagement* (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 6., vollständig aktualisierte und überarbeitete Auflage). München: Verlag Frank Vahlen.
- Heiser, P. (2018). *Meilensteine der qualitativen Sozialforschung. Eine Einführung entlang klassischer Studien* (Studentexte zur Soziologie (STSO)). Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-18557-2>
- Heismann, R. & Maul, L. (2012). Mit systematischem Innovationsmanagement zum Erfolg. In S. Ili (Hrsg.), *Innovation Excellence. Wie Unternehmen ihre Innovationsfähigkeit systematisch steigern* (S. 39–60). Düsseldorf: Symposion Publishing.
- Heiss, S. F. (2010). *Kundenwissen für Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie: Fallstudie und Modellentwicklung zum Wissen von und über Kunden*. Dissertation, Institut für Medien und Bildungstechnologie/Medienpädagogik. Augsburg: Universität Augsburg.
- Heitger, N. (2019). *Methodische Unterstützung der initialen Zielsystembildung in der Automobilentwicklung im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 120*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Henderson, R. & Clark, K. B. (1990). Architectural Innovation. The Reconfiguration of Existing. *Administrative Science Quarterly, Vol. 35* (No. 1), 9–30. <https://doi.org/10.2307/2393549>
- Henn, H. (1999). *Customer-Value-Implementierung. Ansätze und Praxisbeispiele zur wertorientierten Unternehmensführung*. Dissertation, Betriebswirtschaftliches Institut. Stuttgart: Universität Stuttgart. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-08323-8>
- Henshaw, M., Siemieniuch, C., Sinclair, M., Barot, V., Henson, S., Ncube, C., Ling Lim, S., Dogan, H., Jamshidi, M. & DeLaurentis, D. (2013). *The Systems of Systems Strategic Research Agenda* (Trans-Atlantic Research and Education Agenda in System of Systems (T-AREA-SoS), Hrsg.) (TAREA-PU-WP5-R-LU-26 Issue 2). Loughborough, UK.

-
- Herrmann, A. (1998). *Produktmanagement* (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). München: Vahlen.
- 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 (TUHH).
- Hirschter, T. (vsI. 2023). *Methodische Unterstützung der Produktspezifikation anhand von Eigenschaften als Elemente des Produktprofils in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band XXX*. Dissertation - aktuell im Professorenreview., IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- 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 (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung* (08.-09.11.2018), Berlin (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 385, 309–329). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Hohmann, L. (2007). *Innovation Games. Creating Breakthrough Products Through Collaborative Play*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional.
- Hollenberg, S. (2016). *Fragebögen. Fundierte Konstruktion, sachgerechte Anwendung und aussagekräftige Auswertung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12967-5>
- Homburg, C. (2017). *Marketingmanagement. Strategie - Instrumente - Umsetzung - Unternehmensführung* (6., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13656-7>
- Hörmann, K., Dittmann, L., Hindel, B. & Müller, M. (2006). *SPiCE in der Praxis. Interpretationshilfe für Anwender und Assessoren*. basierend auf ISO/IEC 15504 (Stand 2006). Heidelberg: dpunkt Verlag.
- Hubbard, D. W. (2010). *How to Measure Anything. Finding the Value of "Intangibles" in Business* (2nd Edition). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Hubka, V. (1976). *Theorie der Konstruktionsprozesse. Analyse der Konstruktionstätigkeit* (Hochschultext (HST)). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81035-0>
- Hubka, V. (1984). *Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre* (Hochschultext (HST), 2., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10446-0>
- INCOSE Technical Operations. (2007). *Systems Engineering Vision 2020* (International Council on Systems Engineering (INCOSE), Hrsg.) (INCOSE-TP-2004-004-02 Version 2.03). <http://www.incose.org/>.
- International Business Machines Corporation. (n.d.). *IBM Engineering Requirements Management DOORS Family*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.ibm.com/de-de/products/requirements-management>
- IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2018). *Der Innovations-Enabler des KIT: Projekt Kick-Off und die erste Phase von IP – Integrierte Produktentwicklung 2018/2019*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/6121.php>
- IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2019). *Lösungen für die urbane Mobilität von Morgen: IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020 mit BOSCH*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/7261.php>

- IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2020). *IP – Integrierte Produktentwicklung*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/3439.php>
- Isermann, R. (2008). *Mechatronische Systeme. Grundlagen* (2., vollständig neu bearbeitete Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32512-3>
- ISO/IEC/IEEE, 42010:2011(E) (2011). *Systems and software engineering*. Genf, Schweiz: ISO.
- ISO/IEC, 33001:2015-03 (2015). *Information technology — Process assessment — Concepts and terminology*. Genf, Schweiz: ISO.
- ISO/IEC, 33020:2019-11 (2019). *Information technology — Process assessment — Process measurement framework for assessment of process capability*. Genf, Schweiz: ISO.
- Jeschke, S., Jakobs, E.-M. & Dröge, A. (Hrsg.). (2013). *Exploring Uncertainty. Ungewissheit und Unsicherheit im interdisziplinären Diskurs*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00897-0>
- Johannessen, J. A., Olsen, B. & Lumpkin, G. T. (2001). Innovation as newness: what is new, how new, and new to whom? *European Journal of Innovation Management*, Vol. 4 (Issue 1), 20–31. <https://doi.org/10.1108/14601060110365547>
- Johne, F. A. & Snelson, P. A. (1988). Success Factors in Product Innovation. A Selective Review of the Literature. *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 5 (Issue 2), 114–128. <https://doi.org/10.1111/1540-5885.520114>
- Kaiser, B., Baumann, C. & Augustin, B. (2013). Von der Komponenten- zur Funktionsorientierten Entwicklung in der Funktionalen Sicherheit. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Elektronik im Fahrzeug* (16.-17.10.2013), Baden-Baden (VDI-Berichte, Bd. 2188, S. 583–594). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kamp, J. (2019). *Unterstützung der Spezifikation eines funktionalen Produktkonzeptes in der Konzeptentwicklung*. Thesis Universität Duisburg-Essen; Sperrvermerk bis 2024. Masterarbeit, Lehrstuhl für Mechatronik. Duisburg-Essen: Universität Duisburg Essen.
- Kandt, A., Pickshaus, T., Fleischer, K. & Schmitt, R. (2016). A New Model to Ascertain Product Maturity in Product Development Processes. In L. Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), *Procedia 26th CIRP Design. Creative Design of Products and Production Systems* (15.-17.06.2016), Stockholm, Sweden (Procedia CIRP, Vol. 50, S. 173–178). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Kano, N., Seraku, N., Takahashi, F. & Tsuji, S. (1984). Attractive quality and must-be quality. *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, Vol. 14 (Issue 2), 147–156. https://doi.org/10.20684/quality.14.2_147
- Keating, C., Rogers, R., Unal, R., Dryer, D., Sousa-Poza, A., Safford, R., Peterson, W. & Rabadi, G. (2003). System of Systems Engineering. *Engineering Management Journal*, Vol. 15 (Issue 3), 36–45. <https://doi.org/10.1080/10429247.2003.11415214>
- Kececi, E. F. (2019). *Mechatronic Components. Roadmap to Design*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01132-1>
- Keuth, H. (1978). *Realität und Wahrheit. Zur Kritik des kritischen Rationalismus*. Tübingen: J.C.B. Mohr.
- Khurana, A. & Rosenthal, S. (1997). Integrating the Fuzzy Front End of New Product Development. *MIT Sloan Management Review*, Vol. 38 (No. 2), 103–120.
- Kim, E. (2016). *Design Roadmapping. Integrating Design Research Into Strategic Planning For New Product Development*. Dissertation, Roscoe and Elizabeth Hughes Chair in Mechanical Engineering. Berkeley, CA, USA: UC Berkeley.

-
- Kirchhof, R. (2003). *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement. Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktionswirtschaft. Cottbus: TU Cottbus. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-10129-1>
- Kitchenham, B. & Charters, S. (2007). *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Version 2.3* (Keele University and Durham University Joint Report, Hrsg.) (EBSE Technical Report EBSE 2007-001). Newcastle, UK.
- Klauder Jr., L. T. (1968). Generalization of Thermodynamic Square. *American Journal of Physics*, Vol. 36 (Issue 6), 556–557. <https://doi.org/10.1119/1.1974977>
- Klaus, G. (1961). *Kybernetik in philosophischer Sicht*. Berlin: Dietz Verlag.
- Kleiner, S. & Kramer, C. (2013). Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6. In M. Abramovici & R. Stark (Hrsg.), *Smart Product Engineering. Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference* (11.-13.03.2013), Bochum (S. 93–102). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Klingler, S. (2017). *Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 101*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J. & D'Amore, R. (2001). Providing Clarity and A Common Language to the "Fuzzy Front End". *Research-Technology Management*, Vol. 44 (Issue 2), 46–55. <https://doi.org/10.1080/08956308.2001.11671418>
- Kohlborn, T., Fieft, E., Korthaus, A. & Rosemann, M. (2009). Towards a service portfolio management framework. In H. Scheepers & M. Davern (Hrsg.), *Evolving Boundaries and New Frontiers. Defining the IS Discipline* (02.-04.12.2009), Melbourne, Australia (S. 861–870). Clayton, Australia: Monash University.
- Kohn, A. (2014). *Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen. Produktentwicklung München, D126*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung. München: TU München.
- Koletzko, C. (2007). *Untersuchung des Einflusses von Verstelldämpfern auf das Wankverhalten von PKW unter Berücksichtigung einer aktiven Wankstabilisierung*. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. München: TU München.
- Koller, R. (1985). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen des methodischen Konstruierens* (2., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12183-2>
- Königs, S. F., Beier, G., Figge, A. & Stark, R. (2012). Traceability in Systems Engineering – Review of industrial practices, state-of-the-art technologies and new research solutions. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 26 (No. 4), 924–940. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.08.002>
- Kopenhagen, F. (2004). *Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen - Komplexitätsreduzierung in der Konzeptphase. Berichte aus der Konstruktionstechnik*. Dissertation, Arbeitsbereich Produktionswirtschaft. Hamburg: TU Hamburg-Harburg.
- Kotler, P., Keller, L. K. & Opresnik, M. O. (2015). *Marketing-Management. Konzepte – Instrumente – Unternehmensfallstudien* (14., aktualisierte Auflage). München: Pearson Studium.
- Krehmer, H., Meerkamm, H. & Wartzack, S. (2009). The Product's Degree of Maturity as a Measurement for the Efficiency of Design Iterations. In M. Norell Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *DS 58: Proceedings of ICED 09. 17th International Conference on Engineering Design* (24.-27.08.2009), Palo Alto, CA, USA (ICED, S. 181–192). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.

- Küppers, G. & Krohn, W. (1992). Selbstorganisation. Zum Stand einer Theorie in den Wissenschaften. In G. Küppers & W. Krohn (Hrsg.), *Emergenz. Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung* (2. Aufl., S. 7–26). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Kurrle, A. (2017). *Durchgängige Dokumentation von verteilten Zielsystemen in der Produktentwicklung durch Verwendung semantischer Metainformationen am Beispiel Connected Car. Forschungsberichte IPEK, Band 108*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Lange, S. (2010). Elektronikfunktionen innovativ integrieren. *ATZextra*, Vol. 15 (Issue 7), 60–66. <https://doi.org/10.1365/s35778-010-0443-8>
- Leffingwell, D. (2011). *Agile Software Requirements. Lean Requirements Practices for Teams, Programs, and the Enterprise*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley.
- Lewin, B. (1991). *Gene. Lehrbuch der molekularen Genetik* (2. Aufl.). Weinheim: Wiley-VCH.
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (3., korrigierte Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Lindemann, U. & Lorenz, M. (2008). Uncertainty Handling in Integrated Product Development. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 48: Proceedings DESIGN 2008. 10th International Design Conference* (19.-22.05.2008), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 175–182). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Lindemann, U., Reichwald, R. & Zäh, M. F. (Hrsg.). (2006). *Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Linstone, H. A., Turoff, M. & Helmer, O. (2002). *The Delphi Method. Techniques and Applications*. Reading, MA, USA: Addison-Wesley.
- Löckel, K. (2018). Systems Engineering. Ganzheitlicher Ansatz mit großem Potential. *ATZextra*, Vol. 23 (Supplement Issue 11), 18–23. <https://doi.org/10.1007/s35778-018-0067-y>
- Löffler, M. (2018). *Improving Agile Retrospectives. Helping Teams Become More Efficient*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional.
- Lohmeyer, Q. (2013). *Menschenzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Forschungsberichte IPEK, Band 59*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Lombard, L. B. (1986). *Events. A Metaphysical Study*. London, UK: Routledge & Kegan Paul.
- Luczak, H. (Hrsg.). (1999). *Servicemanagement mit System. Erfolgreiche Methoden für die Investitionsgüterindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60058-6>
- Ludwig, B. (2001). *Management komplexer Systeme. Der Umgang mit Komplexität bei unvollkommener Information: Methoden, Prinzipien, Potentiale*. Berlin: edition sigma.
- Luhmann, N. (1991). *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie* (4. Aufl.). Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag.
- Lüthje, C. (2007). Methoden zur Sicherstellung von Kundenorientierung in den frühen Phasen des Innovationsprozesses. In C. Herstatt & B. Verworn (Hrsg.), *Management der frühen Innovationsphasen. Grundlagen - Methoden - Neue Ansätze* (2., überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 39–60). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9293-2_3
- Maier, H. (2010). *Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Optimierung der Entwicklungsprozesse in der Automobilindustrie*. Dissertation, Institut für Arbeitswissenschaft und Prozessmanagement (IfA). Kassel: Universität Kassel.

-
- Maier, M. W. (1998). Architecting Principles for Systems-of-Systems. *Systems Engineering*, Vol. 1 (Issue 4), 167–284.
- Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2021). Nutzer- und Aufgabengerechte Unterstützung von Modellierungsaktivitäten im Kontext des MBSE-Model-Based Systems Engineering. In R. H. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *EEE 2021 - Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2021* (17.-18.06.2021), Dresden (S. 727–736). Dresden: TUDpress.
- Mankins, J. (1995). *Technology Readiness Level. A White Paper*, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, D.C., USA.
- Marthaler, F. (2021). *Zukunftsorientierte Produktentwicklung – Eine Systematik zur Ableitung von generationsübergreifenden Zielsystemen zukünftiger Produktgenerationen durch strategische Vorausschau. Forschungsberichte IPEK, Band 137*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Marthaler, F., Stehle, S., Siebe, A. & Albers, A. (2020). Future-oriented product engineering through environment scenarios by using the example of future forms of mobility in urban living spaces. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deinger (Hrsg.), *DS 101: Proceedings of NordDesign 2020* (12.-14.08.2020), Lyngby, Dänemark (NordDESIGN, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Marxen, L. (2014). *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Forschungsberichte IPEK, Band 74*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Massaro, M., Dumay, J. C. & Guthrie, J. (2016). On the Shoulders of Giants. Undertaking a Structured Literature Review in Accounting. *Accounting Auditing & Accountability Journal*, Vol. 29 (No. 5), 767–801. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-01-2015-1939>
- Matros, K. (2016). *Entwicklung von Hybridantriebssystemen auf Basis des Pull-Prinzips der Validierung und des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. Forschungsberichte IPEK, Band 95*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Matthiesen, S. (2002). *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Forschungsberichte mkl, Band 6*. Dissertation, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH).
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung - Prozess und Methode. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gessinger, A., Pflieger, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018). Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung – Techniken zur Analyse und Synthese. *KIT Scientific Working Papers, Nr. 58*, 1-22. <https://doi.org/10.5445/IR/1000080744>
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation – Using the C&C²-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. In F. Laroche & A. Bernard (Hrsg.), *Procedia 28th CIRP Design* (23.-25.05.2018), Nantes, France (Procedia CIRP, Vol. 70, S. 475–480). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Dueltgen, P., Pelshenke, C. & Gittel, H.-J. (2017). Realitätsnahe Komponententests zur Unterstützung der Produktentwicklung bei der Validierung von Power-Tools. *VDI Konstruktion*, Vol. 69 (Issue 7-8), 76–81.
- Matthiesen, S. & Ruckpaul, A. (2012). New Insights on the Contact&Channel-Approach. Modelling of Systems with Several Logical States. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković &

- N. Bojčetić (Hrsg.), *DS 70: Proceedings of DESIGN 2012. 12th International Design Conference* (21.-24.05.2012), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 1019–1028). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Matthiesen, S., Schaefer, T., Mangold, S. & Durow, W. (2013). X-in-the-Loop in der Gerätebranche. Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung. In D. Spath, B. Bertsche & H. Binz (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2013* (19.-20.06.2013), Stuttgart (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Matthiesen, S., Schmidt, S., Moeser, G. & Munker, F. (2014). The Karlsruhe SysKIT Approach. A Three-Step SysML Teaching Approach for Mechatronic Students. In G. Moroni & T. Tolio (Hrsg.), *Procedia 24th CIRP Design. Mass Customization and Personalization* (14.-16.04.2014), Milano, Italy (Procedia CIRP, Vol. 21, S. 385–390). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- McManus, H. & Hastings, D. (2005). A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems. In INCOSE (Hrsg.), *Proceedings of INCOSE International Symposium 2005* (10.-15.07.2005), Rochester, NY, USA (Vol. 15, Issue 1, S. 484–503). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Meboldt, M. (2008). *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung-als Beitrag zum integrierten Produktenstehungs-Modell (iPeM)*. Forschungsberichte IPEK, Band 29. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Meder, J., Wiegand, T. & Pfadenhauer, M. (2014). Adaptive Aerodynamik des neuen Porsche 911 Turbo. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 116 (Issue 2), 58–63. <https://doi.org/10.1007/s35148-014-0045-7>
- Meyer-Schwickerath. (2014). *Vorschau im Produktentstehungsprozess - Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) als Bezugsrahmen für Vorausschau am Beispiel von Szenariotechnik und strategischer Frühaufklärung*. Forschungsberichte IPEK, Band. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Michalko, M. (2006). *Thinkpad. A Brainstorming Card Deck*. Berkeley, CA, USA: Ten Speed Press.
- Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K. A. (1960). *Plans and the Structure of Behavior*. New York, NY, USA: Holt, Rhinehart and Winston.
- Moeser, G., Grundel, M., Weilkens, T., Kümpel, S., Kramer, C. & Albers, A. (2016). Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf. Ergebnisse des FAS4M-Projektes. In S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger & S. Ackva (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering (TdSE) 2016* (25.-27.10.2016), Herzogenaurach (419-428). München: Carl Hanser Verlag.
- Mohr, D., Müller, N., Krieg, A., Gao, P., Kaas, H.-W., Krieger, A. & Hensley, R. (2013). The road to 2020 and beyond. What's driving the global automotive industry? *Advanced Industries*, (August 2013), 1-24.
- Möhrle, M. G. & Isenmann, R. (2017). Grundlagen des Technologie-Roadmapping. In M. G. Möhrle & R. Isenmann (Hrsg.), *Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen* (VDI-Buch, 4. Auflage, S. 1–16). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52709-2_1
- Möhrle, M. G. & Specht, D. (2018). Stichwort: Roadmapping. In Springer Gabler Verlag (Hrsg.), *Gabler Wirtschaftslexikon* (o. S.). Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/roadmapping-42835/version-266177>

-
- Morel, J., Bauer, E., Meleghy, T., Niedenzu, H.-J., Preglau, M. & Staubmann, H. (2015). *Soziologische Theorie. Abriss der Ansätze ihrer Hauptvertreter* (De Gruyter Studium, 9., aktualisierte und erweiterte Auflage). Oldenburg: de Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783486855562>
- Morkevicius, A., Aleksandraviciene, A., Mazeika, D., Bisikirskiene, L. & Strolija, Z. (2017). MBSE Grid. A Simplified SysML-Based Approach for Modeling Complex Systems. In INCOSE (Hrsg.), *Proceedings of INCOSE International Symposium 2017* (15.-20.07.2017), Adelaide, Australia (Vol. 27, Issue 1, S. 136–150). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Müller, C., Glitzner, M., Höller, H., Wipfler, H. & Vorbach, S. (2016). Integriertes Produktportfolio-Management für die Entwicklung hybrider Leistungsbündel. In M. Bruhn & K. Hadwich (Hrsg.), *Servicetransformation* (S. 595–616). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Munker, F. (2016). *Ein Ansatz zur anwenderorientierten Systemmodellierung für die interdisziplinäre Produktentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 98*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Muschik, S. (2011). *Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering. Forschungsberichte IPEK, Band 50*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Nagel, J. (2011). *Risikoorientiertes Anlaufmanagement*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktionswirtschaft. Cottbus: BTU Cottbus. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6850-0>
- Nellore, R. & Söderquist, K. (2000). Strategic outsourcing through specifications. *Omega, Vol. 28* (Issue 5), 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(99\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(99)00078-X)
- No Magic, I. (n.d.). *Cameo Systems Modeler*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler>
- North, K. (2011). *Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen* (5., aktualisierte und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Object Management Group. (2017). *OMG Systems Modeling Language. Version 1.5*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.5>
- Oehmen, J. (2016). Risiko- und Chancenmanagement in der Produktentwicklung. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 59–98). München: Carl Hanser Verlag.
- Oerding, J. (2009). *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung: Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM. Forschungsberichte IPEK, Band 37*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Pahl, G. & Beitz, W. (1977). *Konstruktionslehre. Handbuch für Studium und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02288-7>
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34061-4>
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik. Planung komplexer innovativer Systeme*. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81893-6>
- Peglow, N. (2021). *Systematik zur Bewertung von Varianten in der Angebotsphase von Common-Rail Pumpen der automobilen Zulieferindustrie auf Basis des Modells der PGE - Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 135*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Peglow, N., Powelske, J., Birk, C., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg, R. H. Stelzer, K. Brökel et al. (Hrsg.), *15. Gemeinsames*

- Kolloquium Konstruktionstechnik 2017. Interdisziplinäre Produktentwicklung* (05.-06.10.2017), Duisburg (o. S.). Essen: Universität Duisburg-Essen Universitätsbibliothek.
- Pfeifer-Silberbach, U. (2005). *Ein Beitrag zum Monitoring des Reifegrades in der Entwicklung eines Produktes*. Dissertation, Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK). Darmstadt: TU Darmstadt.
- Phaal, R., Farrukh, C. J. P. & Probert, D. R. (2005). Developing a Technology Roadmapping System. In T. R. Anderson, T. U. Daim & D. F. Kocaoglu (Hrsg.), *A Unifying Discipline for Melting the Boundaries Technology Management* (31.07.-04.08.2005), Portland, OR, USA (S. 99–111). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Pohl, K. (2007). *Requirements Engineering. Grundlagen, Prinzipien, Techniken*. Heidelberg: dpunkt Verlag.
- Pohl, K., Broy, M., Daembkes, H. & Hönninger, H. (Hrsg.). (2016). *Advanced Model-Based Engineering of Embedded Systems. Extensions of the SPES 2020 Methodology*. Cham, Schweiz: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48003-9>
- Pohl, K., Hönninger, H., Achatz, R. & Broy, M. (Hrsg.). (2012). *Model-Based Engineering of Embedded Systems. The SPES 2020 Methodology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34614-9>
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4>
- Porter, A. (2004). *Accelerated Testing and Validation. Testing, Engineering and Management Tools for Lean Development*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7653-3.X5018-8>
- Powelske, J., Mandel, C., Albers, A. & Behrendt, M. (2018). The role of helper plug-ins to efficiently support modelling and improve the acceptance of MBSE. In INCOSE (Hrsg.), *Proceedings of the INCOSE EMEA Sector Systems Engineering Conference (EMEASEC) 2018 / Tag des Systems Engineering (TdSE) 2018* (05.-07.11.2018), Berlin (n. p.). San Diego, CA, USA: INCOSE.
- Pulm, U. (2004). *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. Produktentwicklung München, Band 56*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung. München: TU München.
- Ramos, A. L., Ferreira, J. V. & Barceló, J. (2012). Model-Based Systems Engineering. An Emerging Approach for Modern Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 42 (Issue 1), 101–111. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2106495>
- 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.), *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018. Design in the era of digitalization* (14.-17.08.2018), Linköping, Sweden (NordDESIGN, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Rehn, K. (2020). *Technische Analyse der Variationen physischer Elemente ausgewählter Generationen von Wankstabilisierungssystemen und deren Auswirkungen auf Eigenschaften und Funktionen zur Generalisierung der Erkenntnisse in der Gesamtfahrzeugentwicklung. IPEK-thesis, Nr. 4199, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Reichwald, R., Meyer, A., Engemann, M. & Walcher, D. (2007). *Der Kunde als Innovationspartner. Konsumenten integrieren, Flop-Raten reduzieren, Angebote verbessern*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

-
- Reinemann, J. (2021). *Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 133*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Reinemann, J., Fahl, J., Hirschter, T. & Albers, A. (2019). Augmented Reality in der Produktvalidierung. Potenziale und Grenzen in frühen Entwicklungsphasen. In R. H. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *Entwickeln Entwerfen Erleben in Produktentwicklung und Design 2019* (27.-28.06.2019), Dresden (33-50). Dresden: TUDpress.
- 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. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X - Beiträge zum 29. DfX-Symposium September 2018* (15.-26.09.2018), Tutzing (o. S.). Hamburg: TuTech Verlag.
- Reiß, N. (2018). *Ansätze zur Steigerung der Methodenakzeptanz in agilen Prozessen der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 112*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Renner, I. (2007). *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Produktentwicklung München, Band 68*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung. München: TU München.
- Rode, S. (2013). *Virtuelle Stimuli für Kundentests im Innovationsprozess* (Schriften zur Medienproduktion (SMP), Vol. 1). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2368-7>
- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In G. Ropohl (Hrsg.), *Systemtechnik. Grundlagen und Anwendung* (S. 1–77). München: Carl Hanser Verlag.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik* (3., überarbeitete Auflage). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Roth, K. (1982). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Systematisierung und zweckmäßige Aufbereitung technischer Sachverhalte für das methodische Konstruieren*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08152-5>
- Roth, K. (1994). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Kataloge*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08150-1>
- Rude, S. (1998). *Wissensbasiertes Konstruieren*. Habilitationsschrift, Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion (PRK). Karlsruhe: TH Karlsruhe.
- SAE-Norm, J3016:2018-06 (2018). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. Warrendale, PA, USA: SAE International.
- Scaled Agile, I. (n.d.). *SAFe for Lean Enterprises 5.0*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.scaledagileframework.com/>
- 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. Forschungsberichte IPEK, Band 97*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Schicker, G. & Strassl, J. (2019). *Produktportfolio-Management im Zeitalter der Digitalisierung* (Weidener Diskussionspapiere, Nr. 69). Amberg-Weiden: Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden.
- Schimpf, S. & Rummel, S. (2015). Bewertung von technologischen Entwicklungen. In J. Warschat, S. Schimpf & M. Korell (Hrsg.), *Technologien frühzeitig erkennen, Nutzenpotenziale systematisch bewerten. Methoden, Organisation, semantische Werkzeuge zur Informationsgewinnung und -speicherung* (S. 46–61). Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes

- syncTech - Synchronisierte Technologieadaption als Treiber der strategischen Produktinnovation. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Schmalenbach, H. H. (2013). *Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik. Forschungsberichte IPEK, Band 68*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Schmitt, W. (2014). Antike und mittelalterliche Theorien über die fünf Sinne. In G. Keil (Hrsg.), *Grenzüberschreitungen* (Fachprosaforschung, Band 10, S. 7–18). Baden-Baden: Deutscher Wissenschaftsverlag.
- Schröppel, T., Miehl, J. & Wartzack, S. (2019). Konzept zur Identifikation relevanter Produkteigenschaften zur Unterstützung einer positiven User Experience. In R. H. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *Entwickeln Entwerfen Erleben in Produktentwicklung und Design 2019* (27.-28.06.2019), Dresden (S. 205–218). Dresden: TUDpress.
- Schubert, B. (1991). *Entwicklung von Konzepten für Produktinnovationen mittels Conjointanalyse*. Stuttgart: Poeschel.
- Schuh, G. (Hrsg.). (2012). *Innovationsmanagement. Handbuch Produktion und Management 3* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25050-7>
- Schuh, G., Lenders, M. & Bender, D. (2009). Szenarirobuste Produktarchitekturen. In J. Gausemeier (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung* (19.-20.11.2009), Berlin (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 265, 99-120). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Schumpeter, J. A. (1939). *Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. New York, NY, USA: McGraw Hill.
- Schwanager, M. (2004). *Systemtheorie. Eine Einführung für Führungskräfte, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler* (Diskussionsbeitrag Institut für Betriebswirtschafts (IfB), No 19 - Dezember 2004, 3. Auflage). St. Gallen, Schweiz: Universität St. Gallen.
- Schweitzer, G. (1989). Mechatronik. Aufgaben und Lösungen. *VDI-Berichte, Nr. 787*, 1–15.
- Sedchaicharn, K. (2010). *Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt. Forschungsberichte IPEK, Band 45*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Seiffert, U. & Rainer, G. (Hrsg.). (2008). *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden: Vieweg+Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9479-3>
- Sekolec, S. (2005). *Produktstrukturierung als Instrument des Variantenmanagements in der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien*. Dissertation, Zentrum für Produkt-Entwicklung. Zürich, Schweiz: ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005014499>
- Shenhar, A., Dvir, D., Milosevic, D., Mullenburg, J., Patanakul, P., Reilly, R., Ryan, M., Sage, A., Sausser, B., Srivannaboon, S. et al. (2005). Toward a NASA-Specific Project Management Framework. *Engineering Management Journal, Vol. 17* (Issue 4), 8–16. <https://doi.org/10.1080/10429247.2005.11431667>
- Shenhar, A., Dvir, D. & Shulman, Y. (1995). A two dimensional taxonomy of products and innovations. *Journal of Engineering and Technology Management, Vol. 12* (Issue 3), 175–200. [https://doi.org/10.1016/0923-4748\(96\)80015-4](https://doi.org/10.1016/0923-4748(96)80015-4)
- Shimomura, Y., Yoshioka, M., Takeda, H., Umeda, Y. & Tomiyama, T. (1998). Representation of Design Object Based on the Functional Evolution Process Model. *Journal of Mechanical Design, Vol. 120* (Issue 2), 221–229. <https://doi.org/10.1115/1.2826962>

-
- Smith, J. (2005). An Alternative to Technology Readiness Levels for Non-Developmental Item (NDI) Software. In IEEE Computer Society (Hrsg.), *Proceedings of the HICSS 2005* (03.-06.01.2005), Big Island, HI, USA (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Smith, P. G. & Reinertsen, D. G. (1997). *Developing Products in Half the Time. New Rules, New Tools* (2. Aufl.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Soja, H., Thomas, P. & Kleiner, R. (2019). Aktive Aerodynamik im SUV-Segment und die Auswirkung auf Luftwiderstand und Reichweite. In A. Piskun (Hrsg.), *Karosseriebautage Hamburg 2018. 16. ATZ-Fachtagung* (S. 35–49). Conference proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-22038-9_3
- Souder, W. E. & Chakrabarti, A. (1978). The R&D/Marketing interface. Results from an empirical study of innovation projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. EM-25 (Issue 4), 88–93. <https://doi.org/10.1109/TEM.1978.6447302>
- Specht, D., Behrens, S. & Richter, M. (2017). Strategische Planung mit Roadmaps. Möglichkeiten für das Innovationsmanagement, die Personalbedarfs- und die Fabrikplanung. In M. G. Möhrle & R. Isenmann (Hrsg.), *Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen* (VDI-Buch, 4. Auflage, S. 65–82). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52709-2_5
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer-Verlag.
- Staiger, T. (2020). *Prozessuale und methodische Unterstützung der produktlinienübergreifenden Funktionsentwicklung von Sportwagen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. IPEK-Thesis, Nr. 4001, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Stechert, C. (2010). *Modellierung komplexer Anforderungen. Bericht Nr. 75*. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik. Braunschweig: TU Braunschweig.
- Steiner, M. (2007). *Nachfrageorientierte Präferenzmessung. Bestimmung zielgruppenspezifischer Eigenschaftssets auf Basis von Kundenbedürfnissen*. Dissertation, Lehrstuhl Marketing. Jena: Universität Jena.
- Teufelsdorfer, H. & Conrad, A. (1998). *Kreatives Entwickeln und innovatives Problemlösen mit TRIZ/TIPS. Einführung in die Methodik und ihre Verknüpfung mit QFD*. Erlangen: Publicis-MCD-Verlag.
- Thau, S. L. (2013). *Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²: Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. Forschungsberichte IPEK, Band 66*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000036948>
- Thomke, S. & Fujimoto, T. (2000). The Effect of "Front-Loading" Problem-Solving on Product Development Performance. *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 17 (Issue 2), 128–142. [https://doi.org/10.1016/S0737-6782\(99\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0737-6782(99)00031-4)
- Thun, J.-H. von & Stumpfe, J. (2004). Integration von Produkt- und Prozessentwicklung. Zur Problematik von Komplexität und Dynamik bei der Innovation von Produkten und Prozessen. In F. Maier (Hrsg.), *Komplexität und Dynamik als Herausforderung für das Management. Festschrift zum 60. Geburtstag von Peter Milling* (S. 155–177). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Thunnissen, D. P. (2005). *Propagating and Mitigating Uncertainty in the Design of Complex Multidisciplinary Systems*. Dissertation, Engineering and Applied Science. Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology.
- Tsvasman, L. R. (2006). *Das grosse Lexikon Medien und Kommunikation. Kompendium interdisziplinärer Konzepte*. Würzburg: Ergon Verlag.

- Ulrich, H. & Probst, G. (1995). *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Ein Brevier für Führungskräfte* (4. Auflage). Bern: Paul Haupt.
- Ulrich, K. T. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, Vol. 24 (Issue 3), 419–440. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)00775-3](https://doi.org/10.1016/0048-7333(94)00775-3)
- Ulrich, K. T. & Eppinger, S. D. (2015). *Product Design and Development* (6. Aufl.). New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional.
- Unger, D. W. & Eppinger, S. D. (2009). Comparing Product Development Processes and Managing Risk. *International Journal of Product Development (IJPD)*, Vol. 8 (No. 4), 382–402. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2009.025253>
- Utterback, J. M. & Abernathy, W. J. (1975). A Dynamic Model of Process and Product Innovation. *Omega*, Vol. 3 (No. 6), 639–656. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(75\)90068-7](https://doi.org/10.1016/0305-0483(75)90068-7)
- Van Loon, H. (2007). *Process Assessment and ISO/IEC 15504. A Reference Book* (2. Aufl.). New York, NY, USA: Springer US.
- VDI-Richtlinie, 2221-2:2019-11 (2019). *VDI 2221 Blatt 2: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI-Richtlinie, 2221:1993-05 (1993). *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI-Richtlinie, 2206:2004-06 (2004). *VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI-Richtlinie, 2221-1:2019-11 (2019). *VDI 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI-Richtlinie, 2803-1:2019-01 (2019). *VDI 2803 Blatt 1: Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode*. Berlin: Beuth Verlag.
- Vermaas, P. E. (2010). Technical functions: towards accepting different engineering meanings with one overall account. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusák (Hrsg.), *Proceedings of the TMCE 2010 Symposium. Virtual Engineering for Competitiveness* (12.-16.04.2010), Ancona, Italien (S. 183–194). Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- Vermaas, P. E. (2013). The coexistence of engineering meanings of function: Four responses and their methodological implications. *Functional Descriptions in Engineering. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 27 (Issue 3), 191–202. <https://doi.org/10.1017/S0890060413000206>
- Verworn, B. (2005). *Die frühen Phasen der Produktentwicklung. Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik*. Dissertation, Technologie- und Innovationsmanagement. Hamburg: TU Hamburg-Harburg.
- Verworn, B. & Herstatt, C. (2007). Strukturierung und Gestaltung der frühen Phasen des Innovationsprozesses. In C. Herstatt & B. Verworn (Hrsg.), *Management der frühen Innovationsphasen. Grundlagen - Methoden - Neue Ansätze* (2., überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 111–134). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9293-2_6
- Volkswagen AG. (2019). *Start einer neuen Ära. Volkswagen auf dem 40. Wiener Motorensymposium*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://ecarandbike.com/start-einer-neuen-aura/>
- Volkswagen AG (Hrsg.). (2020). *Mobilität für kommende Generationen. Geschäftsbericht 2019*. Wolfsburg. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: https://www.volkswagen-nag.com/presence/investorrelation/publications/annual-reports/2020/volkswagen/Y_2019_d.pdf

-
- Vom Brocke, J., Simons, A., Niehaves, B., Riemer, K., Plattfaut, R. & Cleven, A. (2009). Reconstructing the Giant. On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. In S. Newell, E. A. Whitley, N. Pouloudi, J. Wareham & L. Mathiassen (Hrsg.), *ECIS 2009 Proceedings* (08.-10.06.2009), Verona, Italy (S. 2206–2217). Atlanta, GA, USA: AIS.
- Waitzinger, S. M. (2015). *Ein Vorgehensmodell zur Risikoidentifikation in der Entwicklung technologiegetriebener Geschäftsmodelle. Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Band 29*. Dissertation, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT). Stuttgart: Universität Stuttgart.
- 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. Forschungsberichte IPEK, Band 103*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Walden, D. D., Roedler, G. J., Forsberg, K., Hamelin, R. D., Shortell, T. M. & Kaffenberger, R. (Hrsg.). (2017). *INCOSE Systems Engineering Handbuch V.4.0. Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten* (4. Ausgabe). Ottobrunn: Gesellschaft für Systems Engineering (GfSE).
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. & Olschewski, I. (2009). *Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden: Vieweg+Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9311-6>
- 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. Wartack (Hrsg.), *DFX 2016: Proceedings of the 27th Symposium Design for X* (05.-06.10.2016), Jesteburg (DfX, S. 283–295). Hamburg: TuTech Verlag.
- Warkentin, A., Herbst, J. & Gausemeier, J. (2009). Konzeption eines funktionsorientierten Produktmodells zur Nutzung in den nachgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus. In J. Gausemeier, F. Rammig, W. Schäfer & A. Trächtler (Hrsg.), *6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme* (02.-03.04.2009), Paderborn (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 250, S. 189–202). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Wäschle, M., Timucin, M., Radimersky, A., Mandel, C., Fahl, J. & Hirschter, T. (2021). Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produktanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE. In H. Binz, B. Bertsche, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2021* (2021, Mai), Stuttgart (o.S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- We.CONECT Global Leaders GmbH. (2019). *re:work Smart Requirements Engineering – Rückblick 2019*. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.smart-requirements-engineering.de/rueckblick-2019>
- Weber, C. (2012). Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften. Eine kritische Zwischenbilanz. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartack (Hrsg.), *DFX 2012: Proceedings of the 23rd Symposium Design for X (DfX)* (04.-05.10.2012), Bamberg/Erlangen (DfX, S. 25–62). Hamburg: TuTech Verlag.
- Weber, C. & Werner, H. (2001). Schlussfolgerungen für "Design for X" (DfX) aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen. In H. Meerkamm (Hrsg.), *DFX 2001: Proceedings of the 12th Symposium on Design for X* (11.-12.10.2001), Neukirchen/Erlangen (DfX, S. 37–48). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.

- Webster, J. & Watson, R. (2002). Analyzing the past to prepare for the future. writing a literature review. *MIS Quarterly*, Vol. 26 (No. 2), 13–23.
- Weilkiens, T. (2006). *Systems Engineering mit SysML/UML. Modellierung, Analyse, Design*. Heidelberg: dpunkt.verlag.
- Weinzierl, J. (2006). *Produktreifegrad-Management in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Anlaufmanagement*. Dortmund: Praxiswissen.
- Weissler, P. (SAE International, Hrsg.). (2018). 'Function on Demand' brings opportunities, security challenges. Zugriff am 07.01.2021. Verfügbar unter: <https://www.sae.org/news/2018/05/function-on-demand>
- Werdich, M. (Hrsg.). (2012). *FMEA - Einführung und Moderation. Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld)* (2. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2217-8>
- Wesner, E. (1977). *Die Planung von Marketing-Strategien auf der Grundlage des Modells des Produktlebenszyklus*. Dissertation. Berlin: Freie Universität Berlin.
- Wheelwright, S. C. & Clark, K. B. (1995). *Leading Product Development. The Senior Manager's Guide to Creating and Shaping*. New York, NY, USA: Free Press.
- Wiedemann, G. E. (2014). *Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen*. Dissertation, Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik. München: TU München.
- Wieland, A. & Wallenburg, C. M. (2012). Dealing with supply chain risks. Linking risk management practices and strategies to performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 42 (Issue 10), 887–905. <https://doi.org/10.1108/09600031211281411>
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics. Or the Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Wilmsen, M., Dühr, K., Heimicke, J. & Albers, A. (2019). The first steps towards innovation: A reference process for developing product profiles. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *DS 94: Proceedings of the Design Society: 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19). Responsible Design for Our Future* (05.-08.08.2019), Delft, Netherlands (ICED, S. 1673–1682). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Wintergerst, E. (2015). *Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. Forschungsberichte IPEK, Band 86*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Winzer, P. (2013). Das Systems Engineering (SE). Altes Denken in neuem Gewand. In P. Winzer (Hrsg.), *Generic Systems Engineering. Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung* (S. 1–58). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30365-4_1
- Wöhrle, G. (2020). *Methodische Unterstützung der Spezifikation komplexer mechatronischer Systeme im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie. IPEK-Thesis, Nr. 4166, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Wynn, D. C., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). Modelling Iteration in Engineering Design. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *DS 42: Proceedings of ICED 2007. 16th International Conference on Engineering Design* (28.-31.07.2007), Paris, France (ICED, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.

-
- Yogasara, T. (2014). *Anticipated user experience in the early stages of product development*. Dissertation, Faculty of Creative Industries. Brisbane, Australia: Queensland University of Technology.
- Zingel, C. (2013). *Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. Forschungsberichte IPEK, Band 70*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Wissenschaftliche Vorveröffentlichungen unter Mitautorenschaft des Autors dieser Dissertation

- 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.), *Procedia 30th CIRP Design. Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking* (05.-08.05.2020), Kruger National Park, South Africa (Procedia CIRP, Vol. 91, S. 665–677). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Haag, S., Hünemeyer, S. & Staiger, T. (2020). Defining, Formulating and Modeling Product Functions in the Early Phase in the Model of PGE – Product Generation Engineering. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 6th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2020* (12.10.-12.11.2020), Wien, Österreich (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T. & Rapp, S. (2021). Application of the Generic Variation Operator in the Model of PGE – Product Generation Engineering onto the Element Types of Properties and Functions of Technical Systems. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021 (CIRP Design 2021)* (19.-21.05.2021), Enschede, Netherlands (Procedia CIRP, Vol. 100, 870-875). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- 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 IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 4th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2018* (01.-03.10.2018), Rome, Italy (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- 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. Agilität und kognitives Engineering* (15.-16.05.2019), Stuttgart (S. 253–262). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- 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 RADMA (Hrsg.), *R&Designing Innovation. Transformational Challenges for Organisations and Society* (30.06.-04.07.2018), Milan, Italy (n. p.). Chester, UK: RADMA.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J. & Rapp, S. (2021). Analysis of the Variation of the Element Types of Properties and Functions of Technical Systems in Product Development Practice. In E. Lutters (Hrsg.), *31st CIRP Design Conference 2021 (CIRP Design 2021)* (19.-

- 21.05.2021), Enschede, Netherlands (Procedia CIRP, Vol. 100, 876-881). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Rapp, S., Rehn, K. & Haag, S. (2022). Analysis of the Variation of Physical Elements and their Effects on Properties and Functions using the Example of Different Generations of the System "Roll Stabilization". *KIT Scientific Working Papers, Nr. 183*.
- 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.), *Procedia 29th CIRP Design. Open Design and Design as Exponential Technology* (08.-10.05.2019), Póvoa de Varzim, Portugal (Procedia CIRP, Vol. 84, S. 838–847). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Wöhrle, G., Reinemann, J. & Rapp, S. (2020). Generic reference product model for specifying complex products by the example of the automotive industry. In I. Horváth & G. N. Keenaghan (Hrsg.), *Digital Proceedings of TMCE 2020. Designing and engineering of smart systems* (11.-15.05.2020), Dublin, Ireland (S. 353–370). Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- 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. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *DS 102: Proceedings of the DESIGN 2020. 16th International Design Conference* (26.-19.10.2020), Dubrovnik, Croatia (DESIGN, S. 2235–2244). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Albers, A., Rapp, S., Hirschter, T., Fahl, J. & Wöhrle, G. (2021). Providing a Model for Estimating Innovation Potential and Development Risks in the Research and Engineering of Mechatronic Systems Based on Variations in Different System Views and Characteristics of Reference System Elements. In RADMA (Hrsg.), *Innovation in an Era of Disruption* (06.-08.07.2021), Glasgow, UK (n. p.). Chester, UK: RADMA.
- Albers, A., Reinemann, J., Fahl, J. & Hirschter, T. (2019). Augmented Reality for Product Validation: Supporting the Configuration of AR-Based Validation Environments. In J. Y. Chen & G. Fragomeni (Hrsg.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications and Case Studies. 11th International Conference* (26.-31.07.2019), Orlando, FL, USA (Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 11575, S. 429–448). Cham, Schweiz: Springer.
- 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.), *Procedia 29th CIRP Design. Open Design and Design as Exponential Technology* (08.-10.05.2019), Póvoa de Varzim, Portugal (Procedia CIRP, Vol. 84, S. 630–637). Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V.
- Fahl, J., Hirschter, T. & Albers, A. (2021). Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen am Beispiel der Sportwagenentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2021* (2021, Mai), Stuttgart (o.S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Fahl, J., Hirschter, T., Haag, S., Staiger, T. & Albers, A. (2020). Functions in the Early Phase of Product Development: A Systematic Literature Review. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 6th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2020* (12.10.-12.11.2020), Wien, Österreich (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- 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 IEEE (Hrsg.), *Proceedings of 5th International Symposium on Systems Engineering (ISSE) 2019* (01.-03.10.2019), Edinburgh, UK (n. p.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.

-
- Fahl, J., Hirschter, T., Maier, H. & Albers, A. (2020). Cross-Industry Sectoral Study: Interactions and Challenges of Requirements Engineering in the Early Phase of Product Development. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deiningner (Hrsg.), *DS 101: Proceedings of NordDesign 2020* (12.-14.08.2020), Lyngby, Dänemark (NordDESIGN, n. p.). Glasgow, Scotland, UK: The Design Society.
- Fahl, J., Hirschter, T., Wöhrle, G. & Albers, A. (2021). Proposing a Specification Structure for Complex Products in Model-Based Systems Engineering (MBSE). In O. Isaksson & M. Panarotto (Hrsg.), *Proceedings of the 23rd International Conference on Engineering Design (ICED21)* (16.-20.08.2021), Gothenburg, Sweden (ICED, S. 2481–2490). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 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 (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung* (08.-09.11.2018), Berlin (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 385, 309–329). Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut.
- Reinemann, J., Fahl, J., Hirschter, T. & Albers, A. (2019). Augmented Reality in der Produktvalidierung. Potenziale und Grenzen in frühen Entwicklungsphasen. In R. H. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *Entwickeln Entwerfen Erleben in Produktentwicklung und Design 2019* (27.-28.06.2019), Dresden (33-50). Dresden: TUDpress.
- Wäschle, M., Timucin, M., Radimersky, A., Mandel, C., Fahl, J. & Hirschter, T. (2021). Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produktanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE. In H. Binz, B. Bertsche, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2021* (2021, Mai), Stuttgart (o.S.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

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

- Endl, M. (2019). *Produktportfolioübergreifende Definition funktionaler Produktkonzepte in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Konzeptentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. IPEK-Thesis, Nr. 3890, Sperrvermerk bis 2024*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Haag, S. (2020). *Untersuchung des Funktionsverständnisses und methodische Unterstützung der Funktionsentwicklung im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie. IPEK-Thesis, Nr. 4198, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Kamp, J. (2019). *Unterstützung der Spezifikation eines funktionalen Produktkonzeptes in der Konzeptentwicklung. Thesis Universität Duisburg-Essen; Sperrvermerk bis 2024*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Mechatronik. Duisburg-Essen: Universität Duisburg Essen.
- Staiger, T. (2020). *Prozessuale und methodische Unterstützung der produktlinienübergreifenden Funktionsentwicklung von Sportwagen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. IPEK-Thesis, Nr. 4001, Sperrvermerk bis 2025*. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Des Weiteren wird auf nachfolgende studentische Arbeiten referenziert, die nicht durch den Autor dieser Arbeit Co-betreut wurden:

- Ewert, R. (2020). *Prozessuale und methodische Unterstützung des kundenorientierten Anforderungsmanagements in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. IPEK-Thesis, Nr. 3891, Sperrvermerk bis 2025. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Fahl, J. (2017). *Prozessmodell zur funktionalen Beschreibung einer Produktgeneration in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Gesamtfahrzeugentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG*. IPEK-Thesis, Nr. 3464, Sperrvermerk bis 2022. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Rehn, K. (2020). *Technische Analyse der Variationen physischer Elemente ausgewählter Generationen von Wankstabilisierungssystemen und deren Auswirkungen auf Eigenschaften und Funktionen zur Generalisierung der Erkenntnisse in der Gesamtfahrzeugentwicklung*. IPEK-thesis, Nr. 4199, Sperrvermerk bis 2025. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Wöhrle, G. (2020). *Methodische Unterstützung der Spezifikation komplexer mechatronischer Systeme im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie*. IPEK-Thesis, Nr. 4166, Sperrvermerk bis 2025. Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Glossar

Übernahmevariation (ÜV) eines Systemelements im Modell der PGE

Die **Übernahmevariation (ÜV)** ist ein *Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung zur Übernahmeentwicklung* eines Systemelements einer neuen Systemgeneration, bei der das zu Grunde liegende Lösungsprinzip von einem Referenzsystem-Element (RSE) aus dem Referenzsystem in eine neue Systemgeneration im Inneren unverändert (hinsichtlich der Ausprägung) übernommen wird und Anpassungen entsprechend den Anforderungen der Systemintegration und den Randbedingungen nur an den Schnittstellen zu anderen Systemelementen vorgenommen werden. (vgl. Definition 11)

Ausprägungsvariation (AV) eines Systemelements im Modell der PGE

Die **Ausprägungsvariation (AV)** ist ein *Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung zur Neuentwicklung* eines Systemelements einer neuen Systemgeneration, bei der das zu Grunde liegende Lösungsprinzip von einem Referenzsystem-Element (RSE) aus dem Referenzsystem mitsamt aller inhärenter Elemente und Verknüpfungen im Inneren auf eine neue Systemgeneration übertragen jedoch mindestens partiell in seiner Ausprägung variiert wird. (vgl. Definition 5)

Prinzipvariation (PV) eines Systemelements im Modell der PGE

Die **Prinzipvariation (PV)** ist ein *Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung zur Neuentwicklung* eines Systemelements einer neuen Systemgeneration, bei der das zu Grunde liegende Lösungsprinzip von einem Referenzsystem-Element (RSE) aus dem Referenzsystem auf eine neue Systemgeneration durch Hinzufügen und/oder Entfernen inhärenter Elemente und Verknüpfungen im Inneren übertragen und variiert wird. Dadurch wird ein gegenüber dem Referenzsystem-Element (RSE) neues Lösungsprinzip realisiert.

Eine Prinzipvariation (PV) geht immer mit einer Ausprägungsvariation (AV) einher – man spricht auch von einer Neuentwicklung eines Systems, beginnend mit der Prinzipvariation (beeinflussbar durch den Produktentwickelnden). (vgl. Definition 12)

Funktion in der KaSPRO

Eine **Funktion** in der Produktentwicklung ist ein *Elementtyp* eines technischen Systems, anhand der sich eine *Wirkbeziehung* zwischen einer Menge von (initiiierenden) *Eingangsgroößen* (engl. inputs) und (resultierenden) *Ausgangsgroößen* (engl. outputs) sowie den (inhärenten) *Zustandsgrößen* (engl. states) aus einer u.a. Kunden-, Anwender-, Anbieter- und/oder Produktentwickelnden-Sicht in einem *definierten Kontext* beschreiben lässt. Die *Ausprägung einer Funktion* ergibt sich aus der *hierarchischen Gliederung* in *Subfunktion(en)* und/oder *strukturalen Gliederung* in *Haupt- und Nebenfunktion(en)*. Eine *Funktionsausprägung* wird *fraktal* durch mindestens eine Sub- oder Hauptfunktion desselben technischen Systems und dessen Ausprägung bestimmt. (vgl. Definition 6)

Produktfunktion im Modell der PGE

Eine **Produktfunktion** im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ist eine *Funktion* eines technischen Systems, anhand der sich eine *lösungsoffene Wirkbeziehung des Gesamtproduktes* zwischen einer Menge von *initiiierenden Ereignissen* und *resultierenden Ergebnissen* sowie den (inhärenten) *Zuständen* aus u.a.

Technische Funktion in der KaSPro

Kunden-, Anwender- und/oder Anbietersicht in einem *definierten Kontext* beschreiben lässt. (vgl. Definition 7)

Eine **technische Funktion** in der Produktentwicklung ist die *Funktion* eines *physischen Elements*, anhand der sich eine *lösungsspezifische Wirkbeziehung* zwischen einer Menge von (initiiierenden) *Eingangsgroößen* und (resultierenden) *Ausgangsgroößen* in Form von *Stoff, Energie und/oder Information* sowie den (inhärenten) *Zustandsgrößen* aus einer *Produktentwickelnden-Sicht* beschreiben lässt. Die *Ausprägung einer technischen Funktion* wird *fraktal* durch die *Wirkflächenpaare* (WFP), *Leitstützstrukturen* (LLS) und *Connectoren* (C) des physischen Elements bestimmt. (vgl. Definition 13)

Funktionales Produktkonzept im Modell der PGE

Ein **funktionales Produktkonzept** im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ist ein *Produktkonzept*, anhand dessen sich ein *lösungsöffener Vorschlag* zur Erfüllung der *Anforderungen* und *Ziele* des *Gesamtproduktes* aus *Funktionssicht* in der Frühen Phase im Modell der der PGE über *Produktfunktionen* einer Produktgeneration beschreiben lässt. Das funktionale Produktkonzept definiert die *initialen Übernahme- und Neuentwicklungsanteile* von Produktfunktionen unter Berücksichtigung von u.a. *Kunden-, Anwender- und/oder Anbieternutzen* (*im Kontext des Produktportfolios*). (vgl. Definition 8)

Produktportfolio im Modell der PGE

Ein **Produktportfolio** eines *Anbieters* ist ein *Portfolio*, das die Menge der am Markt eingeführten und in der Entwicklung befindlichen *Varianten der Produktgenerationen* aller *Produktlinien* eines *Anbieters* beschreibt. Ein Produktportfolio wird einerseits durch seine *Breite* (bspw. Anzahl unterschiedlicher Produktlinien), andererseits durch seine *Tiefe* (bspw. Anzahl Varianten der Produktgenerationen) definiert. (vgl. Definition 9)

Produktlinie im Modell der PGE

Eine **Produktlinie** ist eine *Gruppe technischer Produkte* des *Produktportfolios*, die jeweils eine zusammenhängende Menge von *konsekutiven Produktgenerationen* beschreibt. Produktgenerationen innerhalb einer Produktlinie können sich auf den *gleichen Produkttyp* beziehen, an den *gleichen Kunden-/Anwendertypus* gerichtet sein bzw. über *ähnliche Absatzkanäle* vertrieben werden oder sich alle *innerhalb einer bestimmten Preisspanne* bewegen. (vgl. Definition 10)

Produktvariante im Modell der PGE

Eine **Produktvariante** ist die *Variante eines technischen Produktes*, die eine *geringfügig variierte Ausprägung* einer *übergeordneten Ausgangs-Produktgeneration* *innerhalb einer Produktlinie* beschreibt. Die Produktvariante unterscheidet sich somit *geringfügig*, aber dennoch *merklich* bspw. auf Ebene der Produkteigenschaften, -funktionen und/oder physischen Elementen von ihrer Ausgangs-Produktgeneration und *realisiert teilweise variierten Kunden-/Anwender- bzw. Anbieternutzen*. (vgl. Definition 14)

Anhang

A. Weiterführende Grundlagen und Ergänzungen zum Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden weiterführende Grundlagen und Ergänzungen zum Stand der Forschung in Kapitel 2 in Bezug zum *systemischen Verständnis in der Produktentstehung* (vgl. Abschnitt 2.1) sowie der *Produktspezifikation in der Frühen Phase* (vgl. Abschnitt 2.3) erläutert. Die nachfolgend aufgeführte Literatur dient als Vertiefung, steht jedoch nicht im unmittelbaren Kern dieser Forschungsarbeit.

A.1 Systemisches Verständnis in der Produktentstehung

A.1.1 Klassifizierung von Systemen

Mechatronische Systeme stellen eine spezielle Art des integrierten Entwurfs sowie der Fertigung technischer Systeme dar (Harashima, Tomizuka & Fukuda, 1996). Die Entwicklung eines mechatronischen Systems charakterisiert sich durch das Zusammenwirken der drei klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik (Schweitzer, 1989; VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Hieraus lässt sich nach Isermann (2008) ableiten, dass mechatronische Systeme durch die Integration mechanischer und elektronischer Hardware sowie informationsverarbeitender Softwareelementen entstehen. Strukturell setzt sich ein solches mechatronisches System nach VDI-Richtlinie 2206:2004-06 aus einem *Grundsystem* sowie einer Kombination von *Sensoren*, *Aktoren* und einer zugehörigen *Informationsverarbeitung* zusammen (vgl. Abbildung A.1).

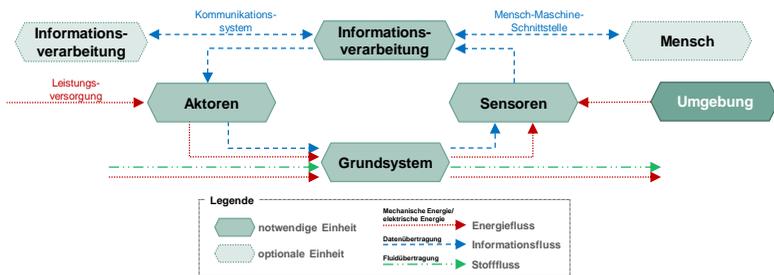


Abbildung A.1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems (schematische Darstellung nach VDI-Richtlinie 2206:2004-06, S. 14)

Ein allgemein beliebiges, physikalisches Grundsystem kann sich in einem mechatronischen System aus *mechanischen* oder *fluidtechnischen*, *chemischen* sowie *biologischen Strukturen* konstituieren (VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Über den strukturellen Zusammenhalt hinaus ermöglichen *Schnittstellen* zwischen den Systemelementen den Austausch von *Eingangs-* und *Ausgangsgrößen* anderer Beziehungsdimensionen i.S.v. *Stoff-, Energie- und Informationsflüssen*, deren Betrachtung insbesondere vor dem Hintergrund zunehmend komplexerer Systeme an Relevanz gewinnt (Feldhusen & Grote, 2013). Die Sensoren eines mechatronischen Systems dienen der Erfassung relevanter Zustandsgrößen des Grundsystems und der Systemumgebung. Sensorisch ermittelte Daten fließen in die Informationsverarbeitung, die eine übergreifende Systemanalyse durchführt. Daraus werden Maßnahmen der Zustandsbeeinflussung des Grundsystems durch die Ansteuerung von Aktoren (gespeist durch eine Leistungsversorgung) umgesetzt. Optional ist ein mechatronisches System über ein Kommunikationssystem mit weiteren Einheiten der Informationsverarbeitung verknüpft. Darüber hinaus kann über eine *Mensch-Maschine-Schnittstelle* die Kommunikation oder Interaktion mit dem Menschen bzw. dem Anwender des Systems realisiert werden (VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Mittels der Mensch-Maschine-Schnittstelle lassen sich mechatronische Systeme hinsichtlich des Grads der Interaktivität klassifizieren (Hassenzahl, 2006). Die *sozio-technische Interaktion* erfolgt über die Schnittstelle, welche selbst Teil des mechatronischen Systems ist. Solche Systeme werden nach DIN EN ISO 9241-210:2011-01 als interaktive Systeme bezeichnet, „*die Eingaben von einem (einer) Benutzer(in) [empfangen] und Ausgaben zu einem (einer) Benutzer(in) [übermitteln]*“ (S.6). Da im Begriffsverständnis die Möglichkeit der Interaktion des menschlichen Subjekts vordergründig in seiner Rolle als Benutzer oder Anwender in einer Beziehung zum System steht, können interaktive Systeme oder Produkte von jenen abgegrenzt werden, die ausschließlich mit anderen technischen Produkten interagieren (Yogasara, 2014).

In der industriellen Entwicklungspraxis wird technischen Systemen häufig eine hohe *strukturelle Komplexität* zugesprochen, die sich einerseits in einer großen Anzahl und andererseits in der Verschiedenheit, Dynamik und Veränderlichkeit der Systemelemente sowie deren Schnittstellen ausdrückt (Bliss, 2000). Komplexität im Sinne einer komplexen Systemstruktur kann nach Patzak (1982) folglich über die Vielfalt der Systemelemente (Varietät) und deren Relationen (Konnektivität) determiniert werden. In der Automobil- und Zulieferindustrie oder dem Maschinen- und Anlagenbau können *komplexe technische Systeme* nicht nur im Hinblick auf einzelne Produkte, sondern ebenso im Bezug zum *Produktportfolio* (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) festgestellt werden (Ponn & Lindemann, 2011). In der Konnektivität und der Varietät eines Systems liegt jedoch nicht zwangsweise die Implikation, sondern lediglich ein verstärkender Faktor der Systemkomplexität (Ulrich & Probst, 1995). Den konstituierenden Faktor des komplexen Charakters eines Systems schreiben Ulrich & Probst (1995) vielmehr der Dynamik zu. Die Dynamik oder Veränderlichkeit bezeichnet die „*Fähigkeit eines Systems, in einer gegebenen Zeitspanne eine große Anzahl von verschiedenen Zuständen annehmen zu können*“ (Ulrich & Probst, 1995, S. 58). Auf Grundlage dieses Verständnisses von Komplexität können vier grundsätzliche Systemtypen in Abhängigkeit von *Dynamik* und *Vielfalt der Systemelemente und -relationen* klassifiziert werden (vgl. Abbildung A.2).

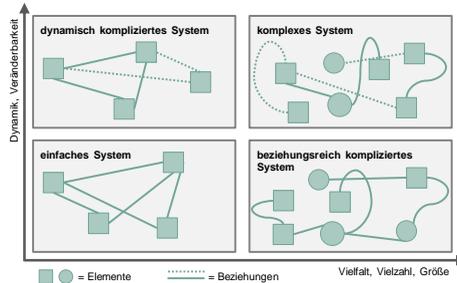


Abbildung A.2: Systemklassifikation hinsichtlich Komplexität nach Ulrich & Probst (1995, S. 61)

Das Systemmerkmal Komplexität hat sowohl konstitutiven als auch beschreibenden Charakter (Kirchhof, 2003). Die Systemkomplexität entsteht somit basierend auf dem konstruktivistischen Verständnis als subjektive Größe erst durch den Betrachter und verkörpert daher ein Maß für den Informationsmangel, einen Überfluss an möglichen Lösungen oder Unbestimmbarkeit des Systems (Meboldt, 2008). Systemdenken und Modellverständnis (vgl. Abschnitt 2.1.2) tragen im Sinne eines ganzheitlichen Denkens dazu bei, komplexe Systeme besser zu verstehen und zu gestalten (Haberfellner, Weck, Fricke et al., 2015). Das reale Beispiel des Internets, globaler Satellitensysteme oder des Produktsystems Fahrzeug in Wechselwirkung mit der Verkehrsinfrastruktur zeigt, dass die einzelnen (*Sub*-)Systeme eines *Supersystems* den Umfang und die Bedeutung annehmen können, in der diese selbst als eigenständige, komplexe Systeme betrachtet werden können (Albers, Mandel, Yan et al., 2018; Maier, 1998). Bereits in den 1950er Jahren sprach Boulding (1956) im Zusammenhang mit der allgemeinen Systemtheorie von einem sogenannten *System-of-Systems* (SoS). Geprägt wurde der Begriff insbesondere durch Maier (1998), der in dieser Hinsicht fünf charakterisierende Merkmale eines System-of-Systems differenziert:

- operative Unabhängigkeit der Elemente,
- unabhängiges Management der Elemente,
- geografische Verteilung,
- evolutionäre Entwicklung sowie
- emergentes Verhalten.

Ein SoS sollte jedoch nicht nur als größere Form eines traditionellen, hierarchischen Systems betrachtet werden, sondern eher im Sinne eines Umfelds für Systeme, in dem diesem miteinander interagieren können und in einer *serviceorientierten Beziehung* zueinander stehen (Abbott, 2006). Albers, Mandel, Yan et al. (2018) beschreiben neun kennzeichnende Attribute der Systeme innerhalb eines SoS, die solche von Subsystemen eines *monolithischen System-of-Subsystems* abgrenzen. Da SoS in unterschiedlichen Größen und Ausprägungen existieren, lassen sich vier Typen im Wesentlichen anhand der Beziehungen von Operatoren und dem SoS zugehörigen Systemen unterscheiden (vgl. Abbildung A.3). (Dahmann & Baldwin, 2008; Henshaw, Siemieniuch, Sinclair et al., 2013; Maier, 1998)

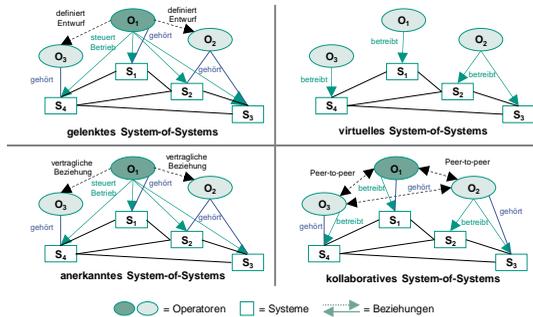


Abbildung A.3: Vier Typen eines System-of-Systems (SoS) (Henshaw, Siemieniuch, Sinclair et al., 2013, S. 6f)

Gelenkte SoS zeichnen sich durch die Verwaltung der einzelnen Systeme über einen zentralen Operator aus. Die zugehörigen Systeme des SoS operieren dennoch unabhängig voneinander und verfolgen ein übergeordnetes Ziel. In einem *kollaborativen SoS* besitzt der zentrale Operator hingegen keine Berechtigung zur Beeinflussung des Betriebs einzelner Systeme. Im *virtuellen SoS* existiert kein zentraler Operator, somit wird kein gemeinsames Ziel verfolgt oder gesteuert. Die gemeinsamen Ziele in einem *anerkannten SoS* werden von allen beteiligten Operatoren respektiert, wenngleich Einzelziele, eigene Entwicklungsressourcen sowie unabhängiger Besitz vorhanden sein können. Der zentrale Operator fungiert als Verwaltungsinstanz über dedizierte Ressourcen. Vernetzte automobiler Fahrzeugsysteme (*engl. connected car*), die in Interaktion mit Internet, Apps und der Verkehrsinfrastruktur stehen, können als Beispiel eines anerkannten SoS betrachtet werden (Kurrle, 2017). Ansätze des Systems Engineering sind in Bezug zur Entwicklung von SoS von großer Relevanz (Hallerstede, Hansen, Holt et al., 2012). Die Spezifikation von Schnittstellen sowie das übergeordnete Verhalten des SoS sind hierbei von entscheidender Bedeutung (Albers & Lohmeyer, 2012), um den Herausforderungen im System-of-Systems Engineering (bspw. *connected car*) zu begegnen (Albers, Kurrle & Klingler, 2016). Insbesondere die unterschiedlichen Lebenszyklen der zugehörigen Systeme eines SoS sind hervorzuheben und zeigen, dass die Entwicklung eines SoS nie beendet ist. Neue Systeme werden hinzugefügt oder veraltete Systeme entfernt, sodass letztlich keine optimale Lösung des SoS existiert (Keating, Rogers, Unal et al., 2003).

A.1.2 Systematische Literaturanalyse von Funktionen technischer Systeme

Nachfolgend wird die systematische Literaturanalyse von Funktionen technischer Systeme beschrieben, die auf Publikation Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) beruht.

Studiendesign und -vorgehen

Der Fokus der strukturierten Untersuchung lag auf Definitionen, Formulierungsrichtlinien und möglichen Modellierungen von Funktionen in der Frühen Phase sowie der Erforschung

deren charakteristischer Besonderheiten. Zudem sollten die berücksichtigten Zusammenhänge und Schnittstellen zwischen Kunde/Anwender sowie Funktionsverständnis analysiert werden (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020). Im Leitfaden von Kitchenham & Charters (2007) werden die grundlegenden Schritte der Systematischen Literaturanalyse beschrieben: *Ziele identifizieren, Methoden definieren, Dokumente sammeln, Literatur kollationieren, Besonderheiten erforschen und Ergebnisse analysieren*. Die Methode stellt sicher, dass der Forscher möglicherweise kenntnisreichere und relevantere Forschungspfade und -fragen entwickeln kann. Die systematische, explizite und reproduzierbare Durchsicht und Analyse relevanter Forschungsbeiträge minimiert die subjektive Verzerrung bei der Auswahl in einer traditionellen Literaturanalyse. (Kitchenham & Charters, 2007; Massaro, Dumay & Guthrie, 2016; Vom Brocke, Simons, Niehaves et al., 2009; Webster & Watson, 2002)

Auf Basis des Leitfadens von Kitchenham & Charters (2007) wurde nachfolgendes Vorgehen in der Studie festgelegt (vgl. Abbildung A.4).



Abbildung A.4: Vorgehen im Zuge der systematischen Literaturanalyse (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

In Rahmen dieser systematischen Literaturanalyse wurde daher der folgende (englische) Suchstring verwendet (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020):

```
(function OR functional) AND product AND (development OR  
developing) AND early AND (stage OR phase) AND  
((definition OR defining) OR (formulation OR formulating) OR  
(model OR modeling) OR understanding)
```

Der Suchstring lieferte in der digitalen Datenbank SCOPUS⁸⁸ 1333 Dokumente (Datum: 15.01.2020, vgl. Abbildung A.5). Darin waren nur englischsprachige und Beiträge aus Peer-Reviews inkludiert, die zunächst kollationiert wurden. Um die Publikationen weiter einzugrenzen, wurden anschließend nur Beiträge betrachtet, die das Schlüsselwort *"Produktentwicklung"* enthielten. Dieser Schritt reduzierte die Anzahl weiter auf 206 Dokumente. Im letzten Schritt wurden Titel und Abstract verwendet, um die verbleibenden Quellen zu analysieren. Nach intensiver Lektüre jedes Abstracts wurde entschieden, ob die entsprechende Veröffentlichung das beabsichtigte Thema untersucht oder bspw. nur ausschließlich spezifisch für einzelne Methoden/Projekte/Fallbeispiele zutrifft. Im letzteren Fall wurde die Quelle exkludiert, sodass 43 relevante Quellen als Ergebnis übrigblieben (vgl. Abbildung A.5).

⁸⁸ Die digitale Datenbank ist unter folgender URL zu finden: <https://www.scopus.com>, letzter Aufruf: 30.11.2020.

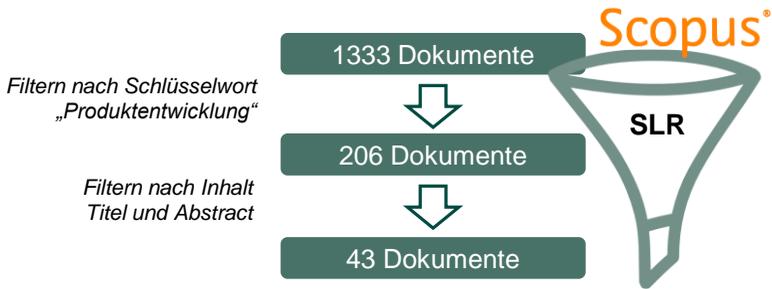


Abbildung A.5: Prozess der Filterung der Dokumente in der Systematischen Literaturanalyse (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 4)

Zusammengefasste Erkenntnisse der Systematischen Literaturanalyse

Die systematische Literaturanalyse von Fahl, Hirschter, Haag et al. (2020) führte zu aufschlussreichen Erkenntnissen. Bei der Analyse der wissenschaftlichen Publikationen zeigte sich, dass die meisten der ausgewählten Ergebnisse als Sekundärquellen lediglich auf einige wiederkehrenden Primärquellen verweisen. Der Schwerpunkt der Sekundärquellen lag in erster Linie auf der *Definition und dem Verständnis von Funktionen* und der *Funktionsmodellierung*, weniger jedoch auf der *Funktionsformulierung* in der Frühen Phase. Offenbar wird eine Funktion in der Literatur *primär aus der (etablierten) Perspektive des Produktentwickelnden* beschrieben, *selten jedoch aus einer Umwelt- oder Menschen-zentrierten Sicht*. Im letzteren Fall ermöglicht ein solches Funktionsverständnis jedoch erst die *Spezifikation eines Kunden- und Anwender-orientierten Zielsystems* in der Frühen Phase. In diesem Zusammenhang zeigt diese Studie auf, *welche funktionalen Zusammenhänge und Verflechtungen* in frühen Forschungs- und Entwicklungsphasen notwendig und unvermeidlich sind. Da das Verständnis des Funktionsbegriffs situations- und kontextabhängig ist, konnte eine *klare Unterscheidung* des Verständnisses zwischen *Frühen und späten Phasen der Produktentwicklung* identifiziert werden. Dabei ist die *Perspektive der Kunden und/oder Anwender* bei den zu entwickelnden mechatronischen Produkten insbesondere *in der Frühen Phase* zu berücksichtigen.

Unabhängig von der jeweiligen Betrachtung war der Funktionsbegriff in der Literatur stets mit Veränderung und Transformation verbunden. Die *Funktionen eines Gesamtproduktes* sollten dazu *lösungs offen* beschrieben werden. Die Beschreibung von Funktionen, die sich auf ihren Zweck in einem Produkt konzentrieren, könnte eine erste *Beurteilung der Erfüllung des Kunden- und/oder Anwendernutzens in der Frühen Phase* ermöglichen. Erden, Komoto, van Beek et al. (2008) identifizierten bspw. *18 verschiedene Notationen* des Begriffs. Basierend auf diesen Erkenntnissen unterscheidet Vermaas (2010) *drei archetypische Bedeutungen* des Begriffs: *beabsichtigtes Verhalten*, *erwünschte Wirkung* und *Zweck des Designs*. Vermaas (2010) argumentiert, dass die divergierenden Auffassungen von Funktion in der Entwicklungspraxis technischer Systeme gemeinsam haben, dass Funktionen als

eine *moderierende Ebene* zwischen den *Zielen eines Produkts* und der *physikalischen Struktur* angesehen werden können. Insgesamt betrachtet Vermaas (2010) Funktionen nach dem *teleologisch-normativen Konzept*. Börsting, Keller, Alink et al. (2008) argumentieren, dass Anforderungen beim Herausarbeiten von Funktionen (in der Frühen Phase) unterstützen können, da diese übergeordneten Begründungen für die Hauptfunktion liefern. Demnach hilft die Erstellung unterschiedlicher Funktionsstrukturen bei der Berücksichtigung unterschiedlicher Situationen bzw. Sichtweisen (Eckert, Alink, Ruckpaul et al., 2011). *Entscheidungen auf Managementebene* können so auf Grundlage der *Auswirkungen auf Stakeholder* (u.a. Kunden/Anwender) in der Frühen Phase transparent gemacht werden. Die Ergebnisse zeigen daher die *Notwendigkeit zur Differenzierung und Definition einer Funktion auf verschiedenen Systemebenen* (bspw. Supersystem [z.B. i.S.v. System-of-Systems], Subsysteme oder gar einzelne Systemelemente). Kunden und/oder Anwender nehmen eine Funktion des Gesamtproduktes dabei als Zusammenhang zwischen einem *auslösenden Ereignis* (vgl. Warkentin, Herbst & Gausemeier (2009)) und dem *gewünschten Ergebnis* wahr. Warkentin, Herbst & Gausemeier (2009) modellieren Funktionen im Kontext der *elektrisch/elektronischen Architekturentwicklung* und führt ein *funktionsorientiertes Produktmodell* ein (vgl. Abbildung A.6). (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

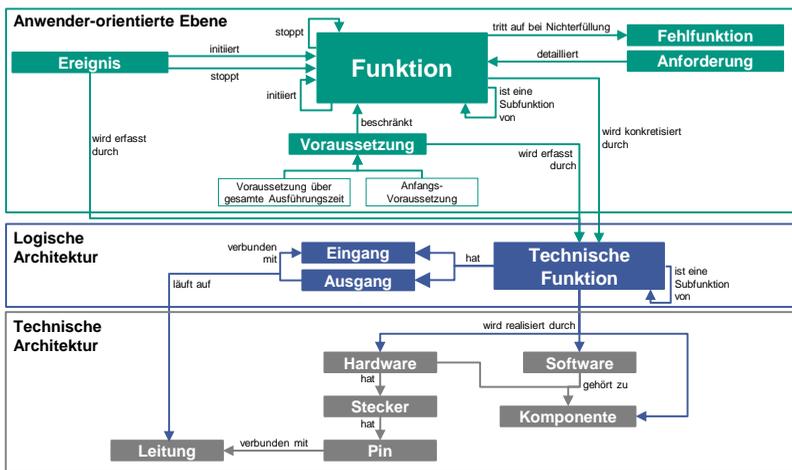


Abbildung A.6: Modellierung einer Funktion aus u.a. der Anwender-orientierten Perspektive in der Frühen Phase (Warkentin, Herbst & Gausemeier, 2009, S. 194)

Auf der abstraktesten Ebene, der *Anwender-orientierten Ebene*, werden die Vorteile insbesondere in der *Definition, Implementierung und Validierung der Funktion* in der Frühen Phase berücksichtigt. Die *lösungsoffene Modellierung* erfasst ein *Ereignis*, das die *Funktion* auslösen oder stoppen kann, sowie *Vorbedingungen*, die in bestimmten Kontexten zur *Ein-*

schränkung der Funktion führen. Das Modell berücksichtigt *Anforderungen*, die eine Funktion detailliert beschreiben sowie die *Fehlfunktion*, wenn diese Anforderungen nicht erfüllt sind. Die *logische Architektur* enthält die *technischen Funktionen* sowie deren Ein- und Ausgangsgrößen. Die technischen Funktionen erfassen einerseits die *übergeordneten Ereignisse* und *Prämissen* und andererseits konkretisieren sie die Funktionen der Anwenderorientierten Ebene. Insofern enthält die logische Architektur *Informationen über die technische Realisierung der Funktionen* durch den Produktentwickelnden. Die *technische Architektur* umfasst die Hardware und Software zur Umsetzung der technischen Funktionen im Rahmen der E/E-Architekturentwicklung. (Warkentin, Herbst & Gausemeier, 2009)

In der *späten Phase der Produktentwicklung* werden Funktionen *lösungsspezifisch als eindeutige Kohärenz zwischen Input und Output in Form von Stoff/Energie und/oder Information* aufgefasst. Auf diese Weise können *formulierte (technische) Funktionen* vom Produktentwickelnden *explizit physischen Elementen* eines Produktes *zugeordnet* werden. Eine *zielgerichtete Formulierung einer Funktion* schafft ein *wechselseitiges Verständnis* unter den beteiligten *Produktentwickelnden* und kann somit die *Transparenz* ebenso in der Frühen Phase der Entwicklung mechatronischer Produkte erhöhen. Es besteht übergreifender *Konsens* in der Literatur, dass eine *Funktion als Substantiv-Verb Kombination zu formulieren* ist – unabhängig der Produktentwicklungsphase. Breiing & Flemming (1993) argumentieren, dass für die Formulierung von Funktionen in der Praxis *aktive Vollverben* verwendet werden müssen, die sich in *Aktivitätsverben* (z.B. „trennen“) und *Aktionsverben* (z.B. „fließen“) unterteilen lassen. In einigen Fällen finden sich *verschiedene Konkretisierungen der Formulierung*, z.B. *über Adverbien oder andere Attribute*. Shimomura, Yoshioka, Takeda et al. (1998) formulieren Funktionen unter Verwendung der drei Elemente „*Funktionskörper*“, „*objektive Entität*“ und „*Funktionsmodifikator*“. Der „*Funktionskörper*“ charakterisiert die *Aktivität der Funktion*, die durch ein *Verb* beschrieben wird. In dieser Formulierung ist die „*objektive Entität*“ das *Objekt*, auf dem die Funktion auftritt, während der „*Funktionsmodifikator*“ die Funktion mit einem *Adverb* weiter spezifiziert. (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

Schließlich müssen der *zeitliche Einsatz und Umfang von Software-basierten Modellierungen* (vgl. u.a. Abschnitt 2.1.4) von Funktionen *projektspezifisch festgelegt* werden. Im Modell der „*Function Behavior Structure*“ (FBS) nach Gero & Kannengiesser (2004) wird eine Funktion als *Zweck* eines Systems beschrieben. Der Begriff „*Verhalten*“ (engl. behavior) wird von den Autoren verwendet, um sowohl das *tatsächliche Verhalten* als auch die *Erwartungen an das System* zu beschreiben, so dass dieses Modell insbesondere in der Frühen Phase geeignet ist. Die *hierarchische oder strukturelle Zerlegung* von Funktionen ist ein häufig verwendeter Modellierungsansatz, der den Produktentwickelnden im Kontext des *Verständnisses von Wechselwirkungen* und bei der *Beherrschung von Komplexität* unterstützt. Darüber hinaus ist es mit funktionalen Strukturen möglich, ein *Produkt auf einer abstrakten Ebene* darzustellen und damit die *Kreativität* in der Frühen Phase zu erhöhen, da man sich von *konkreten Lösungen löst* (Vermaas, 2013). Verschiedene *Abstraktionsebenen der Modellierung* können den Produktentwickelnden zudem bei der *Verknüpfung von lösungsoffenen und -spezifischen Elementen* unterstützen. In der Literatur beziehen sich die Funktionsmodelle vorwiegend auf die *Produktentwickelnden-Perspektive*, wobei auch *Kunden-/Anwender-orientierte Modelle* zu finden sind. Die *Berücksichtigung von Fehlfunktionen*

sowie *Anforderungen* sind weitere Elemente, die im Rahmen der Funktionsmodellierung verwendet werden können. Eine *vollständige Modellierung* scheint in der Frühen Phase jedoch *nicht realistisch* oder aufgrund beschränkter Ressourcen nicht vollumfänglich durchführbar. (Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

A.1.3 V-Modell zur systematischen Entwicklung mechatronischer Systeme

Das sogenannte *V-Modell* (vgl. Abbildung A.7) verfolgt das Ziel, etablierte, disziplinspezifische Leitfäden zusammenzuführen und eine Anwendbarkeit in Entwicklungsprojekten mit vernetzten Anteilen der Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik zu ermöglichen. Die VDI-Richtlinie 2206:2004-06 adaptiert auf Makroebene zunächst das *zyklische Vorgehensmodell aus der Softwaretechnik* und integriert einen *allgemeinen Problemlösungszyklus* nach Haberfellner & Daenzer, 2002 auf Mikroebene. Ergänzt wird das V-Modell um weitere Prozessbausteine zur Unterstützung wiederkehrender Arbeitsschritte (VDI-Richtlinie 2206:2004-06). Mit Beginn des Makrozyklus werden die Anforderungen und wesentlichen Wirkungsweisen des angestrebten Produkts sowie Testfälle zur späteren Absicherung der Eigenschaftsausprägungen im *domänenübergreifenden Systementwurf* definiert. Im Rahmen des *domänenspezifischen Entwurfs* wird die Gesamtfunktion in Teilfunktionen untergliedert, für die anschließend separate, spezifische Lösungskonzepte aus den drei Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik entwickelt werden. Die *Systemintegration* führt die Subsysteme der einzelnen Domänen wieder zu einem Gesamtsystem zusammen. Der einmalige Durchlauf des Makrozyklus mündet nicht zwangsläufig in einem fertigen Produkt, Zwischenprodukte (wie bspw. Vorserienfahrzeuge in der Automobilindustrie) können ebenfalls als Ergebnis aufgefasst werden. Aus diesem Grund können mehrere Makrozyklen mit zunehmender Produktreife durchlaufen werden (Gausemeier & Moehring, 2003).

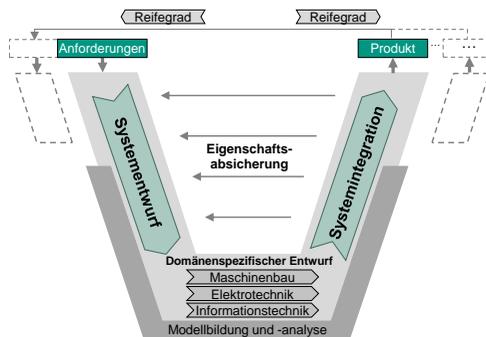


Abbildung A.7: V-Modell zur systematischen Entwicklung mechatronischer Systeme

Die Vorgehensweise im Makrozyklus der VDI-Richtlinie 2206:2004-06 werden in der Literatur aus mehreren Gesichtspunkten kritisiert. Nach Albers (2010) existiert zu Beginn eines

Entwicklungsprojektes zunächst ein vages Zielsystem mit teilweise lösungsoffenen Elementen, was einer vollumfänglichen Festlegung der Anforderungen zum Projektbeginn im V-Modell widerspricht. Gewonnene Erkenntnisse und Wissen entstehen erst im Zuge einer kontinuierlichen Validierung (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Die *Validierung* (vgl. Abschnitt 2.3.3) konkretisiert über den Projektverlauf das Zielsystem und sollte folglich nicht auf einzelne, abschließende Projektphasen eingeschränkt werden. Entsprechend der Logik des erweiterten ZHO-Modells (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) sollten iterative Kurations- und Validierungsschritte entlang des Produktentstehungsprozesses erfolgen (Albers, Burkart, Meboldt et al., 2005; Albers, 2010). Gausemeier & Plass (2014) führen daran anknüpfend aus, dass die Komplexität der Erzeugnisse in der Produktentwicklung bedingt, dass sich das Entwurfsgeschehen nicht durch stringentes Phasen-Meilenstein-Vorgehen beschreiben lässt. Im sogenannten *Entwurfsraum* lässt sich vielmehr ein dreidimensionales, iteratives Vorgehen „vom Abstrakten zum Konkreten“, „vom Generellen zum Detail“ sowie „durch Sichten bzw. Aspekte“ feststellen (Gausemeier & Plass, 2014, S. 27).

A.1.4 Interdisziplinäre Systemmodellierung

Die methodischen Ansätze des MBSE beschreiben, wie bei der Modellierung zur Bearbeitung definierter Problemstellungen vorgegangen werden soll. Die *CONSENS-Methode* (engl. *Akronym* Conceptual Design Specification Technique for Engineering of Complex Systems) wurde als Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipien selbstoptimierender Systeme entwickelt (Frank, 2006). Über sieben Partialmodelle (Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt, Verhalten) soll das System oder ein Produkt in seiner Konzeptphase ganzheitlich und disziplinübergreifend modellierbar sein. Die Wirkstruktur stellt in der CONSENS Spezifikationsstruktur das zentrale Element dar, das alle weiteren Systemelemente und ihre Relationen miteinander verknüpft (Gausemeier, Trächtler & Schäfer, 2014). Der systematische Aufbau ermöglicht eine einfache Integration der interdisziplinären Systemmodellierung in den Produktentstehungsprozess, schwächt jedoch in der fehlenden Betrachtung von Referenzen und der Vernetzung ausschließlich auf Grundlage der Partialmodelle (Munker, 2016). Weitere Beispiele von Modellierungsmethoden finden sich zudem in der SYSMOD-Methode (Weilkiens, 2006) oder dem FAS4M-Ansatz zur Unterstützung einer modellbasierten mechanischen Produktentwicklung (Moeser, Grundel, Weilkiens et al., 2016). Darüber hinaus sind einige Methoden in sogenannte *Modellierungsframeworks* oder *Architekturframeworks* integriert (ISO/IEC/IEEE 42010:2011(E)). Diese Frameworks beschreiben Ansätze zur Strukturierung der Modellerstellung nach den jeweiligen Methoden, um u.a. abstrakte methodische Ansätze für reale Anwendungsszenarien zu konkretisieren (Pohl, Hönninger, Achatz et al., 2012). Auf Grundlage des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206:2004-06 beschreibt das integrierte *RFLP-Modellierungsframework* (engl. *Akronym* Requirement, Functional, Logical, Physical) die Umsetzung eines Problemlösungszyklus im CAD-Werkzeug Dassault Systèmes Catia V6 (vgl. Abbildung A.8, Kleiner & Kramer (2013)).

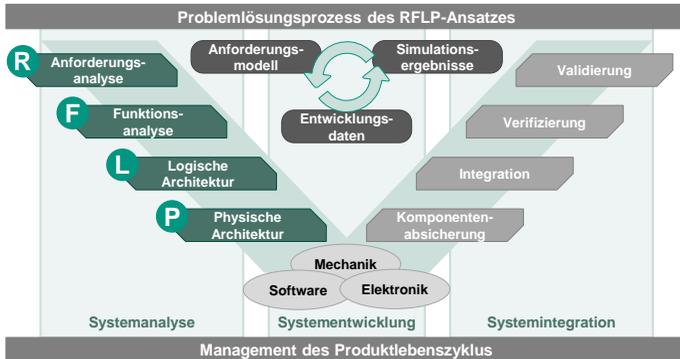


Abbildung A.8: Vorgehensmodell des RFLP-Modellierungsframeworks nach Kleiner & Kramer (2013, S. 95)

In der Systemanalyse (linker Ast im V-Modell) wird die Entwurfsphase fokussiert, in der eine Anforderungsdefinition (R), Analyse der Funktionen (F) sowie logischen (L) und physischen (P) Architektur durchgeführt wird (Kleiner & Kramer, 2013). Das Konkretisieren von Funktionen aus Anforderungen, aber ebenso das Abstrahieren von funktionalen Wirkzusammenhängen in Anforderungen, treibt die Spezifikation voran und erweitert im Sinne des Systems Engineering bspw. das Anforderungsmodell. Ein Vorteil des RFLP-Modellierungsframeworks liegt im präzisen Sprachraum und dem Verzicht auf Diagrammspezifikationen zur Vermeidung von Redundanzen (Eigner, Dickopf, Schulte et al., 2015). Gleichzeitig kann am eingeschränkten RFLP-Sprachraum kritisiert werden, dass einige Aspekte der Anwendung und Validierung unberücksichtigt bleiben (Munker, 2016). Weitere Modellierungsframeworks wie bspw. das *SPES Modeling Framework* gliedern das Systemmodell zweidimensional in vier Sichten (Anforderungen, funktional, logisch und technisch) sowie verschiedenen Hierarchieebenen (Pohl, Hönninger, Achatz et al., 2012; Pohl, Broy, Daembkes et al., 2016). Gleichermaßen strukturiert das *MagicGrid* oder *MBSE Grid* Modelle ebenfalls zweidimensional nach den Anwendungsgebieten der SysML (Anforderungen, Verhalten, Struktur und Parametrik) sowie über verschiedene Abstraktionsebenen (Black box, White box, Lösung) (Morkevicus, Aleksandraviciene, Mazeika et al., 2017; No Magic, n.d.).

A.2 Produktspezifikation in der Frühen Phase

A.2.1 Risiko- und Reifegradverständnis in der Produktentwicklung

In diesem Abschnitt finden sich weiterführende Erläuterungen zum Risiko- und Reifegradverständnis in der Produktentwicklung. Fokus liegt hierbei auf der Unterscheidung zwischen Wissen und Unsicherheit, der Erörterung der Kategorisierung von Entwicklungsrisiko sowie ausgewählter Produktreifegradmodelle.

Wissen und Unsicherheit in der PE

Aus der Unterscheidung nach McManus & Hastings (2005) (vgl. Tabelle A.1) sowie Muschik (2011) zwischen *Mangel an Wissen*⁸⁹ und einem *Mangel an Definition*⁹⁰ schließen Albers, Lohmeyer & Ebel (2011) auf ein *Unsicherheitsdilemma*. In diesem Zusammenhang erfordert das Schließen von Definitionslücken sowohl spezifisches Wissen und andererseits Definitionen, um Wissen zielgerichtet zu generieren.

Tabelle A.1: Ansätze zur Klassifizierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung nach Earl, Johnson & Eckert (2005), Reichwald, Meyer, Engelmann et al. (2007) und McManus & Hastings (2005)

Autor	Arten von Unsicherheit
Earl, Johnson & Eckert (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Unsicherheit in der Produktbeschreibung (<i>engl. uncertainties in the description</i>), Unsicherheit in vorhanden Daten (<i>engl. uncertainties in the data</i>) • Bekannte Unsicherheit (<i>engl. known uncertainties</i>), unbekannte Unsicherheit (<i>engl. unknown uncertainties</i>)
Reichwald, Meyer, Engelmann & Walcher (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Technologische Unsicherheit, marktliche Unsicherheit
McManus & Hastings (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Unsicherheit aus einer Wissenslücke (<i>engl. lack of knowledge</i>), Unsicherheit aus einer Definitionslücke (<i>engl. lack of definition</i>)

Eine frühe Reduktion von Unsicherheit im Produktentwicklungsprozess ist nach Verwon & Herstatt (2007) wesentlich für den Erfolg eines Entwicklungsprojekts. Eine *kontinuierliche Validierung* (vgl. Abschnitt 2.3.3) entlang des Produktentwicklungsprozesses ist nach Albers (2010) die zentrale Aktivität zum Schließen von Wissenslücken und zur Reduktion technologischer und marktlicher Unsicherheit. Flexible Entwicklungsprozesse (vgl. z.B. Lindemann & Lorenz (2008)) unterstützten nach dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) die kontinuierliche Reduktion von Unsicherheit in der Produktentwicklung. In diesem Zuge wird einerseits das Zielsystem und andererseits das Objektsystem durch iterative Validierungsaktivitäten kontinuierlich erweitert und konkretisiert sowie Unsicherheit reduziert (Albers, Reiß, Bursac et al., 2014; Albers, Revfi & Spadinger, 2018).

Entwicklungsrisiko

In der Fachliteratur werden mehrere Möglichkeiten zur *Kategorisierung des Entwicklungsrisikos* eines Produkts vorgeschlagen Unger & Eppinger (2009). In Anlehnung an den Fokus auf die Verfügbarkeit von Informationen differenziert ein prominenter Ansatz von Cross &

⁸⁹ d.h. notwendige Informationen, die noch nicht gesammelt, erzeugt oder in der Zukunft liegen

⁹⁰ d.h. Unsicherheit, die sich aus anstehenden Entscheidungen oder Spezifikationen ergibt

Sivaloganathan (2005) das Risiko nach der Quelle der zugrunde liegenden Unsicherheit. Dabei werden vier Haupttypen differenziert:

- *Technisches Risiko*: Unsicherheit bezüglich der technologischen Durchführbarkeit und Leistungsfähigkeit
- *Marktliches Risiko*: Unsicherheit hinsichtlich der Erfüllung der Kundenbedürfnisse bzw. -anforderungen
- *Zeitplanrisiko*: Unsicherheit hinsichtlich der Einhaltung des vorgegebenen Zeitrahmens
- *Finanzielles Risiko*: Unsicherheit hinsichtlich der Einhaltung des vorgegebenen Budgets und der Generierung von Erlösen

Eine besondere Bedeutung wird dem *technischen Risiko* bei der Entwicklung neuer Systeme zugeschrieben, das sich auf mangelndes Wissen in Bezug auf technologisch-naturwissenschaftliche Zusammenhänge bezieht (Herstatt, Buse & Napp, 2007). Im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses versucht man dem Risiko nach DIN ISO 31000:2018-10 mit „koordinierte[n] Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation“ (S. 7), dem sogenannten (*aktiven*) *Risikomanagement*, entgegenzutreten. Ziele des Risikomanagements sind nach Oehmen (2016) das Schaffen von Transparenz hinsichtlich Entwicklungsrisiken, die Unterstützung kritischer Entscheidungsprozesse durch Berücksichtigung von Risiken, das Reduzieren wirtschaftlicher Risikoauswirkungen und die Stärkung der Robustheit von Organisation und Produkt gegenüber verbleibender und unbekannter Risiken.

Einige der grundlegenden Konzepte des *Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung* (vgl. Abschnitt 2.2) beziehen sich auf die unterschiedliche Verfügbarkeit von Informationen und entsprechen daher der Berücksichtigung von Risiko in Verbindung mit Unsicherheit (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021)

Erstens seien hierbei die *Variationsarten im Modell der PGE* genannt. Produktentwickelnde streben in der Regel die Übernahme großer Anteile von Elementen (Übernahmevariation) aus früheren, bekannten Entwicklungsprojekten an, um den Neuentwicklungsaufwand und das daraus resultierende Risiko zu reduzieren (Albers, Bursac & Rapp, 2017; Eckert, Alink & Albers, 2010). Bei der Anwendung der Gestalt- (GV) und insbesondere der Prinzipvariation (PV) nehmen die verfügbaren Informationen und Erfahrungen ab und mögliche Probleme durch den Entwicklungsaufwand sowie das daraus resultierende Risiko zu (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Albers, Bursac & Rapp, 2017; Klingler, 2017).

Zweitens können *Charakteristika von Referenzsystem-Elementen* (RSE) durch unterschiedliche Mengen an verfügbaren Informationen differenziert werden. Ein Merkmal ist hierbei der *Reifegrad von RSE*. Innerhalb des Prozesses der Technologieidentifikation bis zur Integration in Produkte mit vorgesehenen Anwendungsfällen nimmt die Informationsmenge kontinuierlich zu und umgekehrt die Unsicherheit ab (Schimpf & Rummel, 2015). Ein weiteres relevantes Merkmal ist die *Herkunft von RSE*. Dieses Merkmal berücksichtigt die unterschiedliche Menge an verfügbaren Informationen je nach Organisation, die über um-

fassende Kenntnisse zu dem betrachteten RSE verfügt. Im Vergleich zu identischen Organisationen stellen unterschiedliche Organisationen, die das RSE und das in Entwicklung befindliche Produkt entwickeln, ein höheres Risiko dar, da weniger Informationen (z.B. in Bezug auf Ziele und Erfahrungen) zur Verfügung stehen (Albers, Haug, Heitger et al., 2016; Albers, Rapp, Birk et al., 2017). Darüber hinaus erhöht sich das Risiko bei unterschiedlichen Branchen der Organisationen aufgrund der reduzierten Übertragbarkeit von Wissen noch weiter (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). Albers, Rapp, Birk et al. (2017) haben hierzu einen Ansatz zur Unterstützung der Bewertung von Variationen bereits in der Frühen Phase entwickelt, der darauf basiert, dass sowohl *technische Neuheit* in Form von Gestalt- und Prinzipvariationsanteil als auch die *organisatorische Herkunft* von RSE tendenziell zu Entwicklungsrisiko führen. Die entwickelte Methodik visualisiert diese beiden Dimensionen im *Risiko-Portfolio im Modell der PGE* (Albers, Rapp, Birk et al. (2017), vgl. Abbildung A.9).

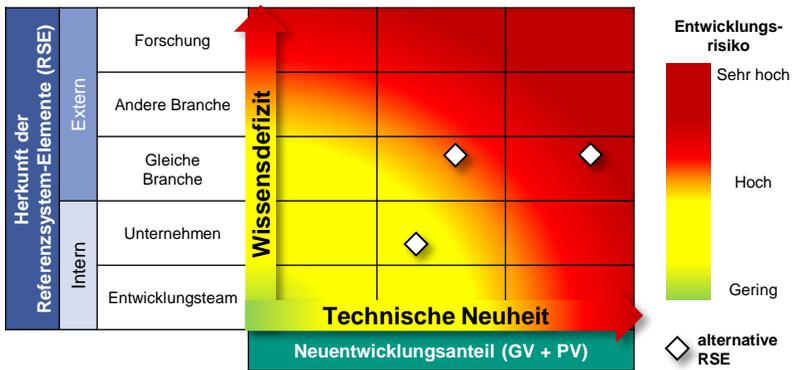


Abbildung A.9: Risiko-Portfolio zur Berücksichtigung von Neuentwicklungsanteil und Herkunft von Referenzsystem-Elementen (RSE) im Modell der PGE nach Albers, Rapp, Birk et al. (2017, S. 7)

Unter Zuhilfenahme des Risiko-Portfolios im Modell der PGE und der möglichen Auswirkungen von Variationen können Entwicklungsaktivitäten in der Realisierung priorisiert werden. Gladysz, Waldeier, Albers et al. (2018) haben hierzu ein Vorgehensmodell zur Priorisierung von Funktionsumfängen mittels der Variationsarten im Modell der PGE entwickelt, das den Zusammenhang von Identifikation und Ursachenanalyse von Fehlermechanismen in die Produktentwicklung einbezieht.

Drittens steht zu guter Letzt die *Validierung* (vgl. Abschnitt 2.3.3) in engem Zusammenhang mit der Verfügbarkeit von Informationen. Nach Albers (2010) wird nur durch Validierungsaktivitäten während der Produktentwicklung Wissen generiert und entwickelt. Die Aussagekraft der Validierung in Bezug auf die Verringerung der Unsicherheit hängt jedoch von der verwendeten *Validierungstechnik* ab (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018; Kandt, Picks-

haus, Fleischer et al., 2016). Dies ist auf die unterschiedliche *Wiedergabetreue* der Validierungsfälle im Vergleich zum beabsichtigten Kundenanwendungsfall zurückzuführen. Mit zunehmender Wiedergabetreue können komplexere Abhängigkeiten und Wechselwirkungen identifiziert werden, die eine zuverlässigere Beurteilung des Projektstatus bzw. Produktreifegrads (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) ermöglichen (Albers, Rapp, Birk et al., 2017).

Produktreifegrad

In der *Modellierung von Zielen* in der Frühen Phase lässt sich zudem feststellen, dass insbesondere das initiale Zielsystem von einem geringen *Härtegrad* bestimmt ist (Ebel, 2015). Der *Härtegrad* beschreibt hierbei die definierte Änderbarkeit eines Zielsystem-Elements und spiegelt nach Ebel (2015) damit den Willen beteiligter Akteure wider, an einem bestehenden Ziel festzuhalten. Ein geringer Härte- und Reifegrad führt in der Frühen Phase nach Lohmeyer (2013) zu einem *Unsicherheitsdilemma*: Die Steigerung des Härtegrads des Zielsystems erfordert problemspezifisches Wissen, das jedoch nur basierend auf definierten Zielsystem-Elementen – mit hohem Reifegrad – generiert werden kann. Eine *Entscheidungsmatrix* (vgl. Abbildung A.10, links) soll die Synthese neuer Zielsystem-Elemente unterstützen, indem sie Härte- und Reifegrad eines Ziels in Bezug zu verschiedenen Aktivitäten setzt (Ebel, 2015).

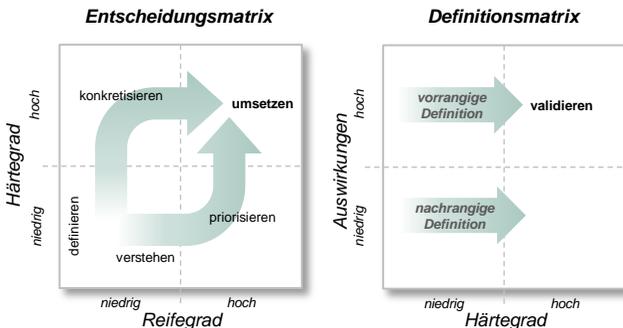


Abbildung A.10: Entscheidungs- und Definitionsmatrix nach Albers, Lohmeyer & Ebel (2011, S. 5f) und Ebel (2015, S. 109f)

Sofern der Reifegrad des initialen Zielsystems prozessbedingt gering ist, gilt gleiches für den Härtegrad der inhärenten Zielsystem-Elemente. Die Entscheidungsmatrix lenkt daher den bedarfsgerechten Fokus auf das *Verstehen*, *Definieren*, *Konkretisieren*, *Priorisieren* von *Zielsystem-Elementen* zur Erhöhung von Härte- und Reifegrad. Das initiale Zielsystem lässt sich weiterhin als nicht robust charakterisieren (Diez, 2006). Die *Robustheit* des Zielsystems beschreibt die Fähigkeit, möglichen Veränderungen der Randbedingungen standzuhalten (Wieland & Wallenburg, 2012) und lässt sich über die *Auswirkung* der Zielsystem-Elemente bewerten (Ebel, 2015). Darunter versteht man letztlich das Maß der antizipierten

Konsequenzen einer Zieldefinition oder -änderung und deren direkten und indirekten Abhängigkeiten zum Objektsystem, die bspw. in Aufwänden, Kosten und Verzögerungen resultieren. Da belastbare Aussagen über Auswirkungen von Zielen wegen fehlender Informationen und mangelndem Bewusstsein schwierig sind, stellt Ebel (2015) eine *Definitionsmatrix* (siehe Abbildung A.10, rechts) zur Verfügung, die den Produktentwickelnden leitet. Zielsystem-Elemente mit hoher Auswirkung sind stark vernetzt und daher durch eine Vielzahl von Änderungen beeinflussbar, wohingegen solche mit niedriger Auswirkung als *Änderungsabsorber* wirken (Eckert, Clarkson & Zanker, 2004). Heitger (2019) stellt fest, dass es in der Frühen Phase zu Szenarienbildung kommt, um eine Flexibilität des Zielsystems zu gewährleisten. (Ebel, 2015)

Eine vierte Beurteilungsdimension (vgl. Abbildung A.11) bezeichnet die *Beeinflussbarkeit* von Zielen (Ebel, 2015). Hierunter versteht man die Fähigkeit einer Organisationseinheit oder einzelner Akteure, ein bestimmtes Ziel zu definieren bzw. zu ändern. Eine *formelle* Beeinflussbarkeit ist hierbei an einen Akteur (bspw. aus dem Top-Management) gekoppelt, der formell zu den Veränderungen bestimmter Ziele autorisiert ist. Eine *informelle* Einflussnahme birgt dennoch das Risiko großen und intransparenten Einflusses auf die Zieldefinition oder -änderung. (Ebel, 2015)

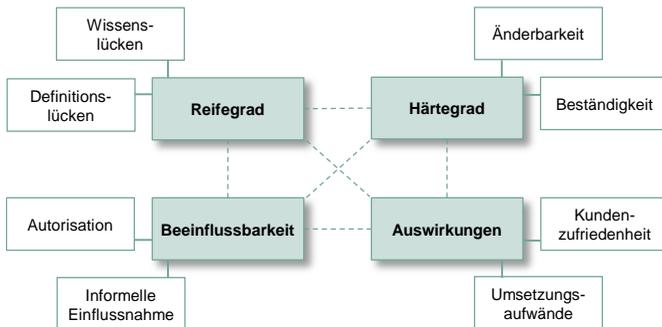


Abbildung A.11: Beurteilungsdimensionen von Zielen nach Ebel (2015, S. 107)

Die simultane Betrachtung und Berücksichtigung aller vier Beurteilungsdimensionen (vgl. Abbildung A.11) ist essenziell, um Wechselwirkungen zu berücksichtigen, die den Produktentwicklungsprozess und Produktreifegrad bestimmen (Albers, Lohmeyer & Ebel, 2011).

In der Literatur existieren eine Vielzahl verschiedener *Reifegradmodelle* zum Abgleich des Ist-Zustands mit einem Zielvorhaben sowie der Ableitung von möglichen Handlungsmaßnahmen (vgl. z.B. Becker, Knackstedt & Pöppelbuß (2009)). Christiansen & Gausemeier (2010) schlagen daher folgende Klassifizierung vor:

- Technologiebezogene Reifegradmodelle
- Produktbezogene Reifegradmodelle

- System- und organisationsbezogene Reifegradmodelle
- Prozess- und projektbezogene Reifegradmodelle
- Reifegradmodelle für hybride Wertschöpfung

In Wissenschaft und Praxis werden Reifegradmodelle folglich vorwiegend genutzt, um die jeweiligen Entwicklungsstände von Technologien, Produkten, Prozessen oder sogar Organisationen zu analysieren und deren Einsatzfähigkeit zu beschreiben (Schimpf & Rummel, 2015). Das verbreitete, technologiebezogene Reifegradmodell des *Technology Readiness Level* (TRL) dient der Quantifizierung von technologischer Entwicklungsreife bzw. Machbarkeit auf einer neunstufigen Skala (Mankins, 1995). Mit zunehmendem TRL für wachsende Reife nehmen Risiko und Unsicherheit analog ab (Shenhar, Dvir & Shulman, 1995; Smith, 2005). Das produktbezogene *Reifegradmonitoring* nach Pfeifer-Silberbach (2005) eignet sich als pragmatischer Ansatz zur Bewertung von Systemen oder deren konstruktiver Gestalt in der Konzept-/Konstruktionsphase der Produktentwicklung. Die Bewertung des Reifegrads erfolgt über Teilkennzahlen, welche sich aus definierten Projektschwerpunkten, deren -dokumenten und -workflows oder gar dem System selbst bestimmen lassen, um einen möglichst realen Entwicklungsreifegrad abzubilden (Pfeifer-Silberbach, 2005). Die *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) fasst eine Gruppe von Referenzmodellen zusammen, welche insbesondere die Verbesserung der Entwicklungsprozesse von technischen Systemen und Dienstleistungen unterstützen soll. Hierbei können drei Typen unterscheiden werden, deren Struktur und Zielsetzung jedoch identisch ist (Chrissis, Konrad & Shrum, 2009). CMMI priorisiert gelebte Prozesse statt deren Dokumentation, um Arbeitsweisen zu institutionalisieren. Die ISO/IEC 33001:2015-03 – bekannt unter dem Akronym *SPICE* (engl. Software Process Improvement and Capability Determination) – ist ein standardisiertes Modell zur Bewertung von Unternehmensprozessen (ursprünglich in der Softwareentwicklung). Das zugehörige Prozessframework in der ISO/IEC 33020:2019-11 bewertet über zwei Dimensionen einerseits *Leistungsfähigkeit* und andererseits *Durchführungsqualität der Prozessaktivitäten* (Hörmann, Dittmann, Hindel et al., 2006). Der Vorteil von SPICE liegt in der Unterscheidung in Prozessauswahl sowie in Prozessbewertung, sodass eine (domänen-)spezifische Anpassung möglich ist (van Loon, 2007).

A.2.2 Validierung im Produktentstehungsprozess

Validierungsansätze

Der Validierungsansatz *Model-in-the-Loop* (MiL) simuliert die zu spezifizierenden Funktionen sowie das Gesamtsystem – in das Software implementiert werden soll – als virtuelles Modell ohne jegliche Sensoren, Aktoren oder grundsätzlich mechanische (Sub-)Systeme (Hardware). Liegt die zu entwickelnde Software als Seriencodes vor und wird in einer simulierten Umgebung getestet, spricht man von der sogenannten *Software-in-the-Loop* (SiL). Analog MiL wird bei SiL keinerlei Hardware in die Validierung einbezogen. Der Validierungsansatz *Hardware-in-the-Loop* (HiL) hingegen testet entwickelte Software auf dem implementierten Betriebssystem im Zusammenspiel mit den Sensoren, Aktoren oder weiteren mechanischen Subsystemen im aktuellen Entwicklungsstadium. Nichtsdestotrotz erfolgt die Umgebungssimulation weiterhin über virtuelle Modelle. (Bringmann & Krämer, 2008)

Aufgrund der Verwurzelung der MiL-, SiL- und HiL-Validierungsansätze in der Softwareentwicklung lässt sich diese Denkweise und Einteilung nur bedingt auf die *mechatronische Systementwicklung* übertragen. Daher spricht man zur umfassenden Beschreibung und ganzheitlichen Kombination der Validierungsansätze vom sogenannten *X-in-the-Loop* (XiL). Das „X“ beschreibt hierbei das (Sub-)System bzw. sogenannte *System-in-Development* (SiD), das aus der Sicht eines Produktentwickelnden oder eines Entwicklungsteams im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität steht (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Hierbei liegt der Fokus des SiD primär auf der Funktions- bzw. Eigenschaftserfüllung. Der Validierungsansatz *IPEK-X-in-the-Loop* (IPEK-XiL) liefert eine durchgängige, methodische Unterstützung und Beschreibung von Validierungsaktivitäten (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Düser, Albers & Ott, 2008; Düser, 2010). Trotz des historischen Bezugs zur Fahrzeugentwicklung, kann der IPEK-XiL-Ansatz jedoch auf die Validierung jeglicher Art technischer Produkte übertragen werden (Matthiesen, Schaefer, Mangold et al., 2013). Da die Funktionsweise eines (Sub-)Systems nicht unabhängig vom Gesamtsystem validiert werden kann (Albers, Fischer, Klingler et al., 2014), werden mit dem SiD interagierende Systeme (*engl.* Connected Systems) berücksichtigt. Die Operationalisierung dieses Verständnisses erfolgt durch das *IPEK-XiL-Validierungsframework* nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) und unterstützt den Produktentwickelnden bei der Entwicklung und Dokumentation von Validierungsumgebungen (vgl. Abbildung A.12).

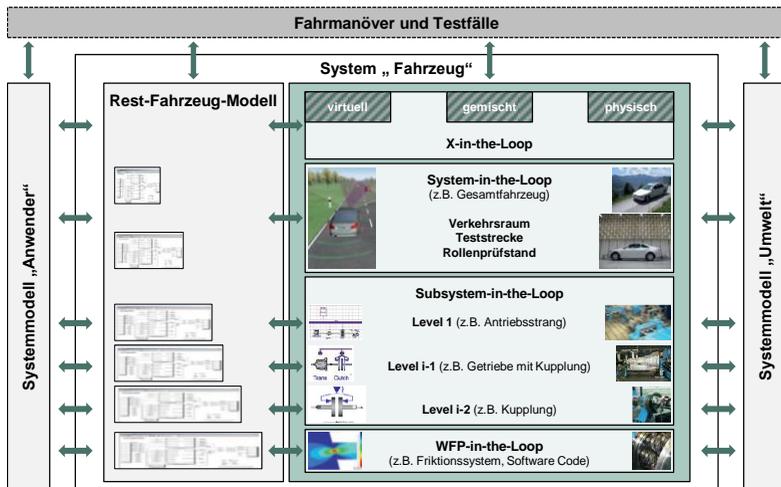


Abbildung A.12: IPEK-XiL-Validierungsframework am Beispiel eines Fahrzeugs nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016, S. 560)

In Abhängigkeit von Validierungsziel und abgeleiteten Testfällen kann der Validierungsingenieur die relevanten und zu berücksichtigenden Wechselwirkungen im IPEK-XiL-Framework über Connected Systems und über verschiedene Ebenen des SiD beschreiben. In der

Regel handelt es sich bei den Connected Systems um ein SiD-verkürzendes Modell des Restsystems, ein Systemmodell des Anwenders und diejenigen Teile der Umgebung eines Systems (Systemmodell der Umwelt), die einen Einfluss auf die Validierungsergebnisse haben könnten. Die hierarchische Gliederung des SiD erfolgt je nach Validierungsaufgabe auf einer beliebigen Systemebene, vom Gesamtsystem bis hin zum einzelnen Wirkflächenpaar (C&C²-Ansatz, vgl. Abschnitt 2.1.3.4). Die Systeme der Validierungsumgebung, das SiD sowie die unterschiedlichen Connected Systems können jeweils *physisch*, *virtuell* oder *gemischt physisch virtuell* ausgeprägt sein. (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Albers, Reinemann, Fahl et al., 2019; Reinemann, 2021)

B. Erläuterung empirischer und Literatur-basierter Methoden in dieser Forschungsarbeit

In diesem Abschnitt erfolgt die detaillierte Darstellung und Erläuterung der relevanten empirischen und Literatur-basierten Methoden, die in dieser Forschungsarbeit verwendet wurden und als Ergänzung zu Abschnitt 3.2.2.

B.1 Teilnehmende Beobachtung

Eine *teilnehmende Beobachtung* (vgl. Abbildung B.1) eignet sich in Langzeitprojekten besonders, um ein tieferes Verständnis für Ablauf und Aktivitäten realer Entwicklungsprojekte empirisch zu analysieren. Eine Erhebung von dichten, kontextuell eingebetteten, aber auch widersprüchlichen und ambivalenten Daten ist in der teilnehmenden Beobachtung möglich. Daher ist diese Forschungsmethode besonders ergebnisstark in multidimensionalen Untersuchungsumgebungen – wie bspw. der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklungspraxis. (Marxen, 2014)

Steckbrief Forschungsmethode: Teilnehmende Beobachtung 	
<ul style="list-style-type: none">■ Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen■ Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen■ Langzeitprojekte, welche Einblicke in Entwicklungsprozesse und -aktivitäten ermöglichen, in denen die Datenquelle eine soziale Gruppe ist – Forscher wird gleichermaßen Mitglied der sozialen Gruppe	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">■ Direkte Datensammlung, da der Beobachter ein Teil der Datenquelle ist■ Ergebnisstark besonders in multidimensionalen Untersuchungsumgebungen■ Erhebung von dichten, kontextuell eingebetteten, widersprüchlichen und ambivalenten Daten möglich	<ul style="list-style-type: none">■ Beobachtung kann die Entwickler von den Aktivitäten ablenken, wodurch die natürlichen Abläufe innerhalb eines Teams gestört werden■ Gefahr der Unehrlichkeit, um sich in einem guten Licht dazustellen, wenn den Team-Mitgliedern bewusst ist, dass der Forscher unter ihnen ist

Abbildung B.1: Steckbrief der Forschungsmethode: Teilnehmende Beobachtung nach Marxen (2014, S. 82)

In der vorliegenden Forschungsarbeit werden teilnehmende Beobachtungen in der DS-I im Rahmen der Analyse von Prozessen, Methoden und Artefakten der funktionalen Produktspezifikation (vgl. Abschnitt 4.2), zwei Studien zu den Mustern aus Funktionsicht bei der Variation von physischen Elementen (vgl. Abschnitt 4.4.3) sowie zu den Phänomenen der Variation von Funktionen (vgl. Abschnitt 4.4.4) durchgeführt. In der DS-II wird zur Evaluation der Systematik in der automatisierten Produktentwicklungspraxis ebenfalls eine teilnehmende Beobachtung umgesetzt. Der Autor dieser Forschungsarbeit war gleichermaßen Mitglied der sozialen Gruppe unter Beobachtung.

B.2 Inhaltsanalyse von Prozessen, Methoden und Artefakten

Die *Inhaltsanalyse* (vgl. Abbildung B.2) eignet sich, um reale Entwicklungsprozesse und -aktivitäten sowie dabei genutzte Methoden und erzeugte Artefakte empirisch zu untersuchen. Die Erforschung der Entwicklungsmethodik (i. S.v. Wissenschaft und Lehre von Methoden) fokussiert sich hierbei auf die Beziehung und Wechselwirkungen zwischen Entwicklungsinhalt und -prozess. Die über eine Inhaltsanalyse gesammelten, realen Daten sind somit nicht verfälscht und bleiben vom Beobachter oder unnatürlichen Situationen unberührt. Insbesondere in der prozessorientierten Produktentwicklungsforschung können bspw. dokumentierte Kommunikationsflüsse über eine qualitative Inhaltsanalyse oder vorhandene Artefakte mithilfe statistischer Operatoren und Verfahren quantitativ ausgewertet werden. (Marxen, 2014)

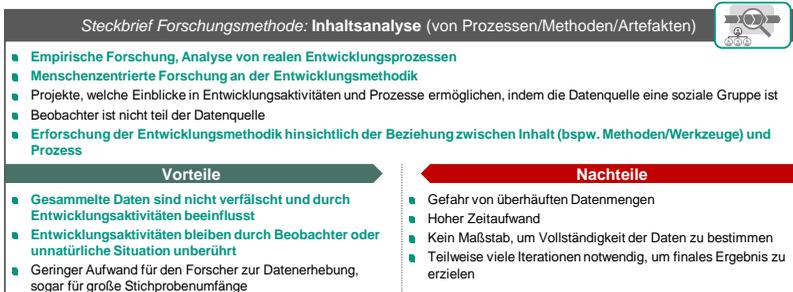


Abbildung B.2: Steckbrief der Forschungsmethode: Inhaltsanalyse nach Marxen (2014, S. 94)

Eine qualitative Inhaltsanalyse von Prozessen, genutzten Methoden und erzeugten Artefakten erfolgt in Abschnitt 4.2 der DS-I in der automatisierten Produktspezifikation aus Funktionsicht im größeren Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung (vgl. Anhang B.1) des Autors.

B.3 Fragebogen-gestützte Umfrage

Umfragen sind eine empirische Forschungsmethode, die darauf abzielt, die Wahrnehmung der befragten Menschen zu einer bestimmten Situation oder einem Prozess anhand von vordefinierten Fragen zu erheben. Die Anwesenheit eines Interviewers ist hierbei nicht erforderlich, wenn die Personen mithilfe von Fragebögen (in physischer oder digitaler Form) an der Umfrage teilnehmen. Ein *Fragebogen* (vgl. Abbildung B.3) setzt sich aus geschlossenen Fragen zusammen, deren Antwortmöglichkeiten häufig vorgegeben sind, um eine quantitative Auswertung zu ermöglichen. Die Skalierbarkeit der Antwortmöglichkeiten kann man in *Nominalskalen*, *Ordinalskalen* und *Kardinalskalen* abstufen. In nominale Skalen können die verschiedenen Antwortmöglichkeiten in keine Reihenfolge gebracht werden (Beispiel: männlich, weiblich), daher lässt sich nur die Häufigkeit (Modus) auswerten. Lässt sich auf einer Skala eine Rangfolge (Beispiel: klein, mittel, groß) ohne vorliegende Definition der Abstände zwischen den Antwortmöglichkeiten bilden, so lässt sich auf diesen sogenannten Ordinalskalen Modus und Median untersuchen. Kardinalskalierte Variablen erlauben die Bestimmung des Modus, Medians sowie ihres Mittelwerts, da eine Bestimmung des Abstands der Antwortmöglichkeiten quantifizierbar ist (Beispiel: 1 Jahr, 2 Jahre, 3 Jahre). Zum Zweck der direkten Erfassung persönlicher Meinungen und Einschätzungen wird in Fragebogen-gestützten Umfragen häufig die *Likert-Skala* verwendet. In diesem Verfahren werden Aussagen vom Likert-Typ formuliert zu denen die Befragten mit ordinalskalierten Antwortmöglichkeiten den Grad der Zustimmung/Zufriedenheit oder Ablehnung/Unzufriedenheit ausdrücken können (Beispiel: ich stimme vollkommen zu, stimme eher zu, stimme eher nicht zu, stimme überhaupt nicht zu). (Hollenberg, 2016; Marxen, 2014)

Steckbrief Forschungsmethode: Fragebogen-gestützte Umfrage	
<ul style="list-style-type: none"> Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen Felder der Entwicklungsmethodik, in der entweder die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation bzw. einem Prozess oder die Wahrnehmung verschiedener Gruppen (bspw. Management vs. Entwickler) von Interesse ist 	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Direkte Datenerfassung von Meinungen der Befragten Einfacher Zugang zu großen Auswahlgruppen bzw. Stichproben, vor allem mit online Umfragen Es steht eine große Anzahl an Online-Umfrage-Tools zur Verfügung 	<ul style="list-style-type: none"> Forscher kann nicht eingreifen Fragen müssen präzise und eindeutig formuliert werden Missverständnisse durch die Teilnehmer können die komplette Studie ruinieren

Abbildung B.3: Steckbrief der Forschungsmethode: Fragebogen nach Marxen (2014, S. 106)

In dieser Forschungsarbeit werden Fragebogen-gestützte Umfragen in der DS-I in Abschnitt 4.3.2 zur Bedarfsanalyse der Entwicklungsunterstützung sowie zur Generierung alternativer Lösungsvorschläge in Abschnitt 4.3.3 herangezogen. Darüber hinaus wird in Abschnitt 6.3 eine Umfrage auf Basis von Fragebögen zur Evaluation der entwickelten Systematik im Live-Lab (vgl. Abschnitt B.7) IP – Integrierte Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 3.2.3.3) eingesetzt.

B.4 Delphi-Methode

Die *Delphi-Methode* (vgl. Abbildung B.4) ist ein empirisches Verfahren zur Erhebung von Experteneinschätzungen. Die Forschungsmethode zeichnet sich durch eine Befragung in mehreren Stufen aus, d.h. eine Befragungsrunde wird zunächst ausgewertet und aggregiert, um diese Ergebnisse denselben oder einer anderen Gruppe von Experten in einer nächsten Iteration der Befragung zur Einschätzung bereitzustellen. Dieses Vorgehen kann wiederholt werden, bis eine gewünschte Stabilität der Ergebnisse erreicht ist. Die Delphi-Befragung ist so flexibel, dass in den einzelnen Befragungsstufen über unterschiedliche qualitative oder quantitative empirische Methoden Daten erhoben werden können. Dazu lassen sich beispielsweise Umfragen oder Experteninterviews mit Fragebögen kombinieren. (Häder, 2019; Linstone, Turoff & Helmer, 2002)

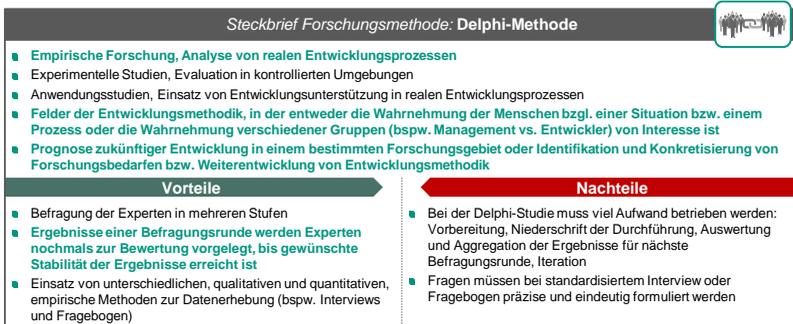


Abbildung B.4: Steckbrief der Forschungsmethode: Delphi-Studie (Häder, 2019; Linstone, Turoff & Helmer, 2002)

Zur Generierung alternativer Lösungen wird in Abschnitt 4.3.3 eine zweistufige Delphi-Befragung durchgeführt. In einer ersten Befragungsstufe wird dabei eine Fragebogen-gestützte Umfrage mit einem semistrukturierten Experteninterview innerhalb einer Gruppe bzw. eines Workshops in der zweiten Stufe kombiniert.

B.5 Experteninterview

Eine *Interviewstudie* zählt zu den verbreitetsten, empirischen Methoden der Erhebung persönlicher Meinungen, Einschätzungen und implizitem Wissen von insbesondere Experten eines Fachgebietes. Hierbei spricht man von sogenannten *Experteninterviews* (vgl. Abbildung B.5). Quantität und Qualität der Datenerhebung hängt wesentlich von einer präzisen und eindeutigen Formulierung der Interviewfragen ab. Grundsätzlich sollten die Interviewfragen möglichst knapp, konkret und sachbezogen in neutraler Sprache formuliert sein. Damit wird verhindert, dass gewünschte oder antizipierte Antworten in der Frage impliziert sind. Interviewstudien können über den Strukturierungsgrad der im Vorfeld des Interviews

festgelegten Fragen kategorisiert werden. Man unterscheidet hierbei zwischen *strukturierten*, *semistrukturierten* und *unstrukturierten Interviews*. Strukturierte Interviews geben meist Reihenfolge und ggf. Antwortmöglichkeiten festgesetzter Interviewfragen vor, wohingegen bei unstrukturierten Interviews häufig nur das Thema definiert ist. In semistrukturierten Interviews werden vorab zwar die Interviewfragen festgelegt, Reihenfolge und Antwortmöglichkeiten können in der Durchführung jedoch flexibel gestaltet werden. In diesem Fall kann der Interviewer die Fragen dem Verlauf des Interviews anpassen und so besser auf gegebene Antworten eingehen. (Atteslander, 2010; Heiser, 2018; Marxen, 2014)

Steckbrief Forschungsmethode: Experteninterview	
<ul style="list-style-type: none"> ■ Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen ■ Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen ■ Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Entwicklungsprozessen ■ Felder der Entwicklungsmethodik, in der entweder die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation bzw. einem Prozess oder die Wahrnehmung verschiedener Gruppen (bspw. Management vs. Entwickler) von Interesse ist 	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ■ Direkte Datenerfassung der Gedanken von Menschen oder Gruppen ■ Zugänglichkeit von Erfahrungswissen der Befragten ■ Individuelle thematische Präferenzen der Befragten können bei nicht-standardisiertem Interview aufgenommen werden 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wissenschaftliche Akzeptanz ■ Viele Quellen der Voreingenommenheit – Befragte können ungenaue oder unvollständige Daten liefern ■ bei jedem Interview muss viel Aufwand betrieben werden: Vorbereitung, Niederschrift der Durchführung, Dokumentation der Interpretation ■ Fragen müssen bei standardisiertem Interview präzise und eindeutig formuliert werden

Abbildung B.5: Steckbrief der Forschungsmethode: Experteninterview nach Marxen (2014, S. 104)

In der zweiten Stufe der Delphi-Befragung zur Generierung alternativer Lösungsvorschläge methodischer Entwicklungsunterstützung (vgl. Abschnitt 4.3.3) wird ein semistrukturiertes Experteninterview innerhalb eines Workshops auf dem Expertenforum re:work Smart Requirements Engineering (vgl. Abschnitt 3.2.3.4) umgesetzt. Darüber hinaus wurden im Rahmen aller teilnehmenden Beobachtungen in der DS-I und DS-II jeweils kontinuierlich unstrukturierte oder semistrukturierte Interviews mit Experten der automobilen Produktentwicklung bzw. Sportwagenentwicklung geführt.

B.6 Fallstudie

Eine *Fallstudie* (vgl. Abbildung B.6) ist eine empirische Forschungsmethode zum Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen, um insbesondere die Anwendbarkeit und den Nutzen einer Entwicklungsunterstützung zu evaluieren. Darüber hinaus eignen sich Fallstudien jedoch ebenso zur Analyse realer Entwicklungsprozesse und damit der Identifikation von Hypothesen oder Falsifizierung von Theorien. Vorteil ist die holistische Betrachtungsweise einer Fallstudie, die den individuellen Kontext berücksichtigt. Fallstudien bieten die Möglichkeit eines Praxisanschlusses von wissenschaftlicher bzw. theoretischer Forschung. (Marxen, 2014)

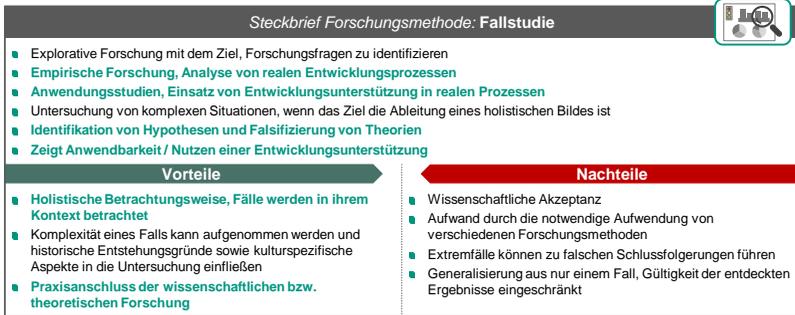


Abbildung B.6: Steckbrief der Forschungsmethode: Fallstudie nach Marxen (2014, S. 98)

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden in der DS-I zunächst in den Abschnitten 4.4.3 und 4.4.4 zwei Fallstudien in der automobilen Produktentwicklungspraxis betrachtet. Die Entwicklungsunterstützung dieser Arbeit wird in der DS-II über mehrere Fallstudien bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG evaluiert (vgl. Abschnitt 6.2).

B.7 Live-Lab

Ein *Live-Lab* (vgl. Abbildung B.7) schafft für einen begrenzten Zeitraum das Modell eines realen Anbieter-Ökosystems, in dem gezielt ausgewählte Phasen eines Prozesses oder einzelne Methoden und Fragestellungen empirisch untersucht werden können.

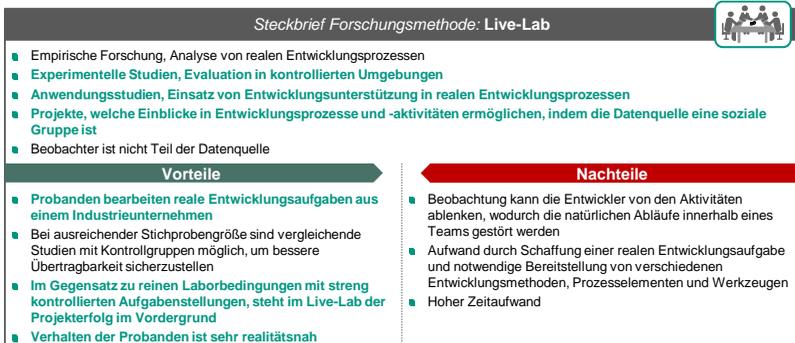


Abbildung B.7: Steckbrief der Forschungsmethode: Live-Lab (Albers, Walter, Wilmsen et al., 2018; Walter, Albers, Haupt et al., 2016)

Einblicke in die realen Entwicklungstätigkeiten und Verhalten der Probanden eines Live-Labs können über (teilnehmende) Beobachtungen der Forscher offenbart werden. Im Gegensatz zu reinen Laborbedingungen mit streng kontrollierten Randbedingungen, bearbeiten die Probanden im Live-Lab die reale Entwicklungsaufgabe eines Industrieunternehmens, sodass der Projekterfolg im Vordergrund steht. Die Anzahl der Probanden ist zudem tendenziell höher als in einer Feldstudie. Auf diese Weise können Methoden und Prozesse differenzierter analysiert werden. Hiermit geht zudem eine hohe externe Validität einher, die sicherstellt, dass die Randbedingungen realitätsnah sind und große Ähnlichkeit zu Entwicklungsumgebungen eines Anbieters in der Praxis aufweisen. (Albers, Walter, Wilmsen et al., 2018; Walter, Albers, Haupt et al., 2016)

Das Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 3.2.3.3) des Jahrgangs 2018/2019 wird in Abschnitt 4.3.2 zunächst für die Untersuchung des Unterstützungsbedarfs beim Spezifizieren aus Funktionssicht genutzt. Ausgewählte Inhalte der entwickelten Systematik werden in der DS-II im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung 2019/2020 (vgl. Abschnitt 6.3) in die Praxis umgesetzt und evaluiert.

C. Deskriptive Studie I: Ergänzungen zu den empirischen Untersuchungen zur Spezifizierung von Produktkonzepten aus Funktionssicht

In diesem Abschnitt finden sich Ergänzungen zu zwei Studien im Rahmen der Deskriptiven Studie I dieser Forschungsarbeit. Zunächst wird die *Branchen-übergreifende Generierung alternativer Lösungen zur Entwicklungsunterstützung des Spezifizierens aus Funktionssicht* (vgl. Abschnitt 4.3.3) vertieft. Anschließend wird die *Analyse von Phänomenen der Variation von Funktionen am Beispiel von alternativen Wankstabilisierungssystemen in der Sportwagenentwicklung* (vgl. Abschnitt 4.4.4) ergänzt.

C.1 Unterstützungsbedarf und Lösungsansätze zum Spezifizieren von Funktionen des Gesamtproduktes

C.1.1 Branchen-übergreifende Generierung alternativer Lösungen zur Entwicklungsunterstützung des Spezifizierens aus Funktionssicht

Kern der Untersuchung bildet ein Workshop i.S.v. *semistrukturierten Experteninterviews* (vgl. Abschnitt B.5) in einer Gruppe. Basierend auf dem Mehrwert, der durch die Vernetzung kollektiven Wissens generiert wird, steigen die Teilnehmer aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Perspektiven somit in gezielte und konstruktive Diskussionen zu fokussierten Themen ein. Die *fünf durchgeführten Einzelsessions à 45 Minuten* werden dabei um einen *Fragenbogen* ergänzt, der vorab mit den Teilnehmern durchgeführt wurde, um die verschiedenen Standpunkte im Vorfeld quantitativ zu erfassen. Das

Konzept zur Erhebung der Erkenntnisse im Workshop ist an die *Delphi-Methode* angelehnt. Erarbeitete Ergebnisse werden wiederum umgehend einem (neuen) Expertenkreis veranschaulicht, um die Feststellungen zu diskutieren und noch gezielter weitere Probleme einzugrenzen sowie alternative Lösungen zu finden. Die fünfte Gruppe beantwortete folglich alle fünf Fragen, wohingegen die erste Gruppe nur zur ersten Fragestellung befragt wurde. Die *fünf Fragestellungen* wurden vorab auf Basis von teilnehmender Beobachtung in der Automobilindustrie, Expertengesprächen und der Literaturrecherche formuliert und durch unabhängige Moderatoren des Forums ausgewählt.



Abbildung C.1: Verteilung der Befragten nach Industriesektor und Unternehmensgröße [Mitarbeitende] (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 6)

Die Firmen der Teilnehmer sind hauptsächlich im Bereich des Maschinenbaues (22%), Consulting (21%) sowie der Informationstechnologie (13%) tätig. Die Befragten aus den 13 Branchen waren heterogen verteilt, was sicherstellt, dass anhand der Studie eine Branchenübergreifende Meinung ermittelt werden kann. Die Automobilindustrie war, mit nur einem Vertreter (2%), deutlich in der Minderheit vertreten (vgl. Abbildung C.1, links). Der Abbildung C.1 kann auf der rechten Seite ebenfalls entnommen werden, dass der größte Teil der Befragten (47%) großen Unternehmen mit mindestens 5.000 Mitarbeitern (MA) zugeordnet werden kann. Gleichzeitig sind kleine Unternehmen und Start-Ups (<250 MA) mit annähernd einem Fünftel ebenso ausreichend vertreten. Das arithmetische Mittel liegt bei 16.248 Mitarbeitern. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)



Abbildung C.2: Verteilung der Befragten nach Berufserfahrung [Jahre] und Herkunftsland (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020, S. 7)

Die Teilnehmer des Workshops haben im arithmetischen Mittel 14,39 Jahre Berufserfahrung, fast drei Viertel haben mehr als 10 Jahre Berufserfahrung, wohingegen nur 7% als Berufseinsteiger (<2 Jahre) gelten (vgl. Abbildung C.2, links). Die Teilnehmer kamen größtenteils aus Deutschland bzw. deutschsprachigen EU-Ländern (vgl. Abbildung C.2, rechts).

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass eine hohe Anzahl von leitenden Angestellten aus bedeutenden Unternehmen (hinsichtlich der Unternehmensgröße) der D/A/CH-Region teilgenommen haben. Neben dem arithmetischen Mittel wurde der Median und das gestutzte Mittel mit $\alpha = 5\%$ berechnet, um den Einfluss von Ausreißern zu bereinigen. Da ein Vergleich der Werte keine signifikante Abweichung aufzeigt, werden die Daten nicht durch die Extremwerte verfälscht (Fahrmeir, Heumann, Künstler et al., 2016). Zu Gunsten der Übersichtlichkeit werden die Mittel zu Unternehmensgröße und Berufserfahrung ausschließlich mithilfe des arithmetischen Mittels angegeben. (Fahl, Hirschter, Maier et al., 2020)

C.2 Bewertung und Tragweitenanalyse von Funktionsverständnis und -abbildung in der Frühen Phase der Produktentwicklung

Die wissenschaftlichen Ergebnisse in diesem Abschnitt C.2 sind insbesondere in kooperativer Zusammenarbeit im Rahmen der Promotionsvorhaben des Autors der vorliegenden Arbeit und Tobias Hirschter (vgl. Hirschter (vsl. 2023)) unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers entstanden.

C.2.1 Vertiefende Analyse von Phänomenen der Variation von Funktionen am Beispiel von alternativen Wankstabilisierungssystemen in der Sportwagenentwicklung

Erläuterung der Wankstabilisierungssysteme

Technisch realisiert wird die Wankstabilisierung in der Regel durch elastische Drehstäbe, die Radträger und Achse verbinden und damit bei Kurvenfahrt die Seitenneigung des Fahrzeugs begrenzen. In der Entwicklung und Abstimmung eines Fahrzeugs kann über das Merkmal der Stabilisatorhärte an Vorder- und Hinterachse des Fahrzeugs die Radlastverteilung (bei der dynamischen Kurvenfahrt) und folglich das Eigenlenkverhalten beeinflusst werden. Demgegenüber wirkt sich bspw. das Überfahren von einseitigen Fahrbahnebenheiten über das Stabilisierungssystem direkt auf das Federungsverhalten aus, da Kräfte ebenso auf die gegenüberliegende Seite übertragen werden. Die Gestaltung der elastischen Drehstäbe zielt folglich auf einen Kompromiss zwischen möglichst geringer Seitenneigung (für hohe Fahrdynamik) und wertigem Federungsverhalten (für hohen Fahrkomfort). Diesen Zielkonflikt können *aktive Wankstabilisierungssysteme* (Erzeugung aktiver Kräfte an Stabilisatoren durch Aktuatoren) auflösen und Seitenneigung – je nach Ausprägung des technischen Lösungsprinzips – nahezu gänzlich kompensieren. Gleichmaßen lässt sich das Eigenlenkverhalten aktiv beeinflussen. (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2016)

Das ursprüngliche Wankstabilisierungssystem der mechanischen **Passiven Wankstabilisierung** (nachfolgend kurz PWS) wird durch eine *elastische Drehstabfeder* realisiert, die über *Pendelstützen* mit den *Radträgern* einer Achse verbunden ist (vgl. Abbildung 4.23, links). Hierdurch kann eine *passive Begrenzung bzw. Reduzierung* der *Fahrer-induzierten*

Wankneigung des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt umgesetzt werden. Bei *einseitigen Fahrbahnanregungen* folgt jedoch bei dieser Variante des RSE das sogenannte *Wankkopieren*. Als Resultat der Komprimierung von Tragfedern zum Fahrzeugaufbau wird ein Wankmoment erzeugt, der die Torsion des Stabilisatorsystems (Drehstabfeder & Pendelstütze) und damit einen Moment in gleicher Richtung zur Folge hat. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Die **hydraulische Aktive Wankstabilisierung** (nachfolgend kurz hAWS) ersetzt in Bezug zur PWS die Pendelstütze durch *aktiv verstellbare Differentialzylinder* (vgl. Abbildung 4.23, Mitte). Der Differentialzylinder verbindet daher den jeweiligen Radträger mit der Drehstabfeder. Die Vorspannung der Drehstabfeder kann durch eine *elektronisch gesteuerte Druckregelung des Hydrauliköls im Differentialzylinder* beeinflusst werden. Durch die individuelle Ansteuerung der hydraulischen Aktuatoren je nach Fahrsituation kann das *Eigenlenkverhalten* positiv beeinflusst werden. Die zusätzliche Unterstützung der *Wankdämpfung* führt zu einer *aktiven Reduzierung der Fahrbahn-induzierten Wankneigung* (Wankkopieren) und damit letztlich zur Erhöhung der Fahrzeugstabilität. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Die dritte Lösungsalternative ist die **elektromechanische Aktiven Wankstabilisierung** (nachfolgend kurz eAWS). Der grundlegende Aufbau besteht aus einem *elektromechanischen Aktuator* (Bürstenloser Gleichstrommotor und dreistufiges Planetenradgetriebe), der zwischen den *zwei geteilten Hälften der Drehstabfeder* sitzt. Die Drehstabfederhälften sind analog der PWS über eine *Pendelstütze* mit den jeweiligen Radträgern einer Achse verbunden. Die *elektromechanische Aktuierung* und Regelung des Wankstabilisierungssystems ermöglicht durch die *hohe Stelldynamik* (ca. -30% Reaktionszeit ggü. hAWS) eine *nahezu vollständige, aktive Kompensation der Wankneigung*. Über die hAWS hinaus kann die eAWS *Störeinflüsse* auf die Wankdämpfung *absorbieren* oder *entkoppeln* und somit das *Wankkopieren quasi gänzlich verhindern*. Weiterer technischer Vorteile ist, dass dauerhaft die volle Leistungsfähigkeit der eAWS zur Verfügung steht. Die Hydraulikpumpe der hAWS wird hingegen meist über die Verbrennungskraftmaschine des Fahrzeugs betrieben und hat damit Nachteile bei niedrigen Motordrehzahlen. Die höhere Flexibilität aus Sicht der Systemintegration und Wartungsfreiheit der eAWS bedingt dadurch teils niedrigere Systemkosten als das Hydrauliksystem und kann zudem niedrigeren Energieverbrauch aufgrund des *Power-on-Demand Prinzips* fördern. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Use-Cases

Zu den vier „*Extremfällen*“ in der Anwendung wurden kontextabhängig die relevanten, *statischen Zustände*⁹¹ des Systems definiert. Aus den insgesamt *vier relevanten Use-Cases* für das Wankstabilisierungssystem wurden einerseits die *Fahrer-induzierte Wankbewegung*

⁹¹ Ein *Zustand* beschreibt nach Thau (2013, S. 82) „*eine beliebig lange Zeitspanne, in der eine unveränderte Anzahl an Funktionen wirkt*“, der immer dann neu beginnt, wenn ein Wirkflächenpaar (WFP) oder eine Leitstützstruktur (LSS) bzw. eine entsprechende Funktion hinzukommt oder wegfällt oder sich die Eigenschaften der Gestaltfunktions-elemente in einem funktionsrelevanten Umfang ändern.

(über Connector Anwender C_A) bzw. die *Fahrbahn-induzierte Wankbewegung* (über Connector Fahrbahn C_F) für die weitere Betrachtung selektiert (vgl. Abbildung C.3).



Abbildung C.3: Übersicht der betrachteten Use-Cases und deren relevante Zustände (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 8; Hirschter, vsl. 2023)

Ein repräsentatives Beispiel der *Fahrer-induzierten Wankbewegung* des Fahrzeugs ist bspw. das *Ausscheren bei einem Ausweichmanöver* oder eine *schlagartige Einleitung der Kurvenfahrt* (Zustand 1.1). Durch Krafteinwirkung am Fahrzeugaufbau in Form von Querbeschleunigungen wird ein Wankmoment durch die Zentrifugalkraft (angreifend am Fahrzeugschwerpunkt) induziert und trifft darüber auf das Radführungssystem (Feder, Dämpfer, Querlenker, etc.), den Radträger, das Rad und schließlich auf die Fahrbahn (Koletzko, 2007). Die Lastwechselreaktion (Zustand 1.2) wird nicht weiter betrachtet, da diese einer Umkehrung der Lenkrichtung durch den Fahrer entspricht und den identischen Effekt⁹² hat. Eine *einseitige Fahrbahnunebenheit* – bspw. Bordsteinauffahrt/Schlagloch-Austritt (Zustand 2.1) oder Fahrbahnabsenkung/Schlagloch-Eintritt (Zustand 2.2) – charakterisiert eine *Fahrbahn-induzierte Wankbewegung*. Hierbei erfolgt eine Krafteinwirkung am Rad in Form von Normalkraftänderungen durch asymmetrische Fahrbahnunebenheiten. Durch den einseitigen Fahrbahnimpuls über Rad, Radträger und Radführungssystem wird schlussendlich ein Wankmoment in das Karoseriesystem induziert (Koletzko, 2007). In Fahrzeugen kann heutzutage häufig die Regelung aktiver Wankstabilisierungssysteme über eine Verststellung des Fahrprogramms (über Connector Anwender C_A) beeinflusst werden (Koletzko, 2007). In einem „Sport“-Modus liegt die Priorisierung bspw. zumeist auf hohe, fahrdynamische Ausprägung des Gesamtfahrzeugverhaltens, im „Komfort“-Modus hingegen eher auf dem

⁹² Der *Effekt* bezeichnet nach Zingel (2013, S. 145) „eine naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeit zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen Inputs und Outputs in Wirkflächenpaar (WFP) und Leitstützstruktur (LSS) unter Einbezug ihrer relevanten Merkmale und Eigenschaften“.

Fahrkomfort. Da in diesem Fall kein Vergleich zur passiven Wankstabilisierung (keine Beeinflussung über Fahrprogramm möglich) gezogen werden kann, wird der *Use Case 3 vernachlässigt*. Eine Wankbewegung des Fahrzeugs kann gleichermaßen durch die Umwelt (Connector Witterung C_w) bzw. aerodynamische Kräfte mit einer Komponente in y-Richtung des Fahrzeugs induziert werden, bspw. bei einer Brückenüberfahrt bei windiger Witterung. Größter Einflussfaktor hierbei ist die seitliche Fahrzeuggrundfläche, auf die bspw. eine Wind-Böe trifft. Da die drei Wankstabilisierungssysteme aktuell nicht in einer Produktvariante eingesetzt werden, bei der man alle weiteren Einflussfaktoren gleichhalten könnte, ist hier kein direkter Vergleich möglich. *Use-Case 4* wird ebenso *nicht weiter betrachtet*. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Logische und physische Systemstruktur

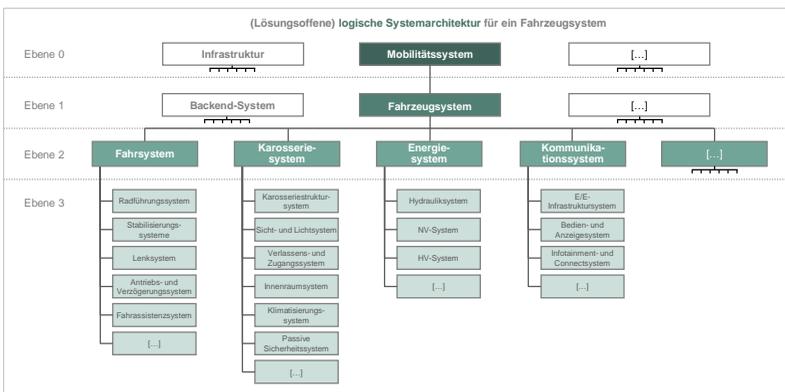


Abbildung C.4: Ausschnitt der verwendeten (lösungs offenen) logischen Systemarchitektur für ein Fahrzeugsystem in der Studie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 10; Hirschter, vsl. 2023)

Das *Fahrzeugsystem* ist in der Realität selbst Teil eines Supersystems, das bspw. als *Mobilitätssystem* beschrieben werden kann. In Kombination mit der Infrastruktur kann dies als ein *System-of-System* (vgl. Abschnitt 2.1.1.3) charakterisiert werden. Das Fahrzeugsystem wird in der definierten, logischen Systemarchitektur zunächst auf *Ebene 2* in die vier Systeme *Fahrsystem*, *Karosserie-system*, *Energie-system* und *Kommunikationssystem* untergliedert. Das *Stabilisierungssystem*, das in dieser Studie im Fokus steht, ist auf *Ebene 3* als *Subsystem des Fahrsystems* veranschaulicht. Weitere Subsysteme der Ebene 3, die über Schnittstellen und Wechselwirkungen mit dem Stabilisierungssystem verbunden sind, wurden ebenfalls in Abbildung C.4 musterhaft dargestellt. Der relevante Ausschnitt der verwendeten (lösungsspezifischen) physischen Systemarchitektur für die Ebenen 4, 5 und 6 sowie die jeweils alternativen RSE der Wankstabilisierungssysteme (PWS, hAWS, eAWS) ist in Abbildung C.5 veranschaulicht. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Deskriptive Studie I: Ergänzungen zu den empirischen Untersuchungen

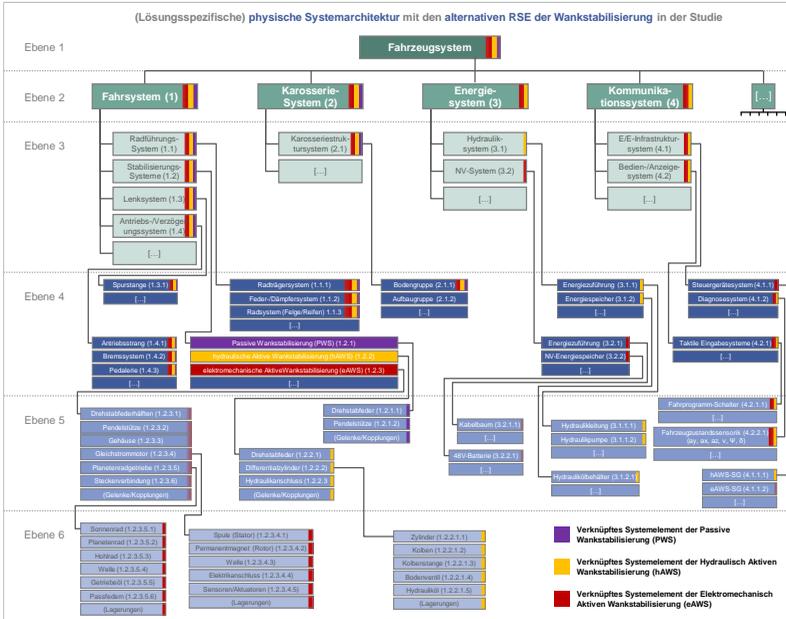


Abbildung C.5: Ausschnitt der verwendeten (lösungsspezifischen) physischen Systemarchitektur für die Ebenen 4,5 und 6 in der Studie (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 11; Hirschter, vsl. 2023)

Wirkdiagramme

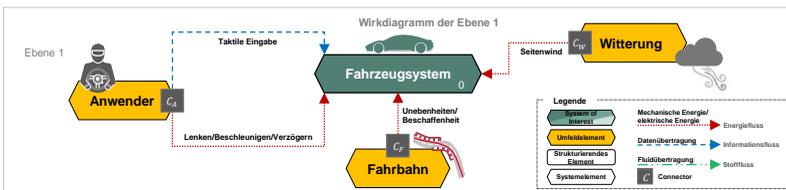


Abbildung C.6: Wirkdiagramm der Ebene 1: Fahrzeugsystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 12; Hirschter, vsl. 2023)

Auf das Fahrzeugsystem wirken in Ebene 1 drei Umfeldelemente Anwender, Fahrbahn und Witterung ein (vgl. Abbildung C.6). Der Seitenwind wirkt in Form eines Energieflusses über den Connector C_W ein (Use-Case 4), die Unebenheiten und Beschaffenheit der Fahrbahn

fließt als Energiefluss über den Connector C_F ins Fahrzeugsystem (Use-Case 1). Der Anwender kann einerseits über das *Lenken*, *Beschleunigen* und *Verzögern* (Energiefluss in Use-Case 2) und andererseits über einen Informationsfluss durch *taktile Eingaben* (Datenübertragung in Use-Case 3 – nur bei hAWS/eAWS möglich) durch den Connector C_A auf das Fahrzeugsystem einwirken. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

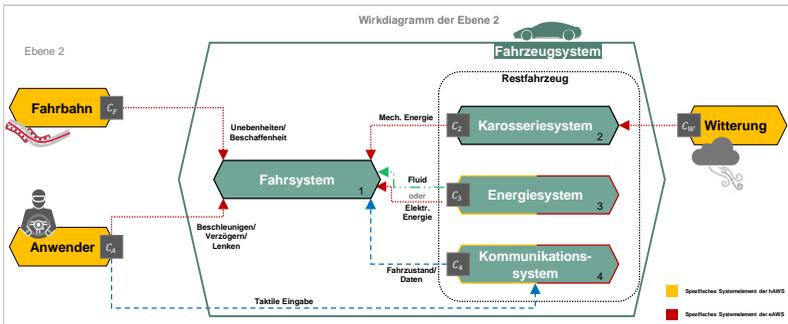


Abbildung C.7: Wirkdiagramm der Ebene 2: Fahrzeugsystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 12; Hirschter, vsl. 2023)

In der konkreteren *Ebene 2* (vgl. Abbildung C.7) wird ersichtlich, dass die *Witterung* über C_W direkt auf das *Karoseriesystem* und die *Fahrbahn* über C_F auf das *Fahrsystem* wirkt. Der *Anwender* beeinflusst über C_A durch *Fahrbefehle* (*Beschleunigen*, *Verzögern*, *Lenken*) einerseits das *Fahrsystem* und durch *taktile Eingaben* das *Kommunikationssystem* des Fahrzeugs bei den zwei alternativen RSE der hAWS und eAWS. Innerhalb des *Fahrzeugsystem* fließt vom *Karoseriesystem* *mechanische Energie* (über C_2) und vom *Energiesystem* *Fluid (hAWS) oder elektrische Energie (eAWS)* (über C_3) ins *Fahrsystem*. Das *Kommunikationssystem* schickt bedarfsgerecht bei Eingabe des *Anwenders* *Informationen* bspw. zu *Fahrzustand* oder *gewählten Fahrprogramm* (nur bei hAWS/eAWS) über den *Connector* C_4 ins *Fahrsystem*. Da das *Fahrsystem* und die *Interaktionen* mit *Fahrbahn* und *Anwender* im *Fokus* stehen, werden die drei *Systemelemente* *Karosserie*-, *Energie*- und *Kommunikationssystem* in dem *Wirkdiagramm* unter dem „*Restfahrzeug*“ *gruppiert*. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

C&C²-Modellierung und Funktionsstrukturen

Die *Ergebnisse der C&C²-Analyse der mechanischen, Passiven Wankstabilisierung (PWS)* auf *Ebene 4* sind in *Abbildung C.8* dargestellt. Die *PWS* setzt sich aus der *Drehstabfeder (LSS_{1.2.1.1})* und zwei *Pendelstützen (LSS_{1.2.1.2})* zusammen. Die *Gelenke/Kopplungen* an den *Verbindungen* werden zur *Vereinfachung* in dieser *Studie* *vernachlässigt*. Innerhalb der *PWS* gibt es jeweils ein *WFP* *zwischen Drehstabfeder und den Pendelstützen* *rechts und links (WFP_{1.2.1.1 – 1.2.1.2})*. An der *Systemgrenze* ist die *PWS* einerseits über die *Drehstabfeder*

im *Connector* $C_{2,1.1}$ an die Bodengruppe im Karosseriestruktursystem sowie über die Pendelstützen im *Connector* $C_{1,1.1}$ an die Radträger rechts und links angebunden. Die Informationen aus den interagierenden Systemen, die bspw. in Form von mechanischer Energie in die Connectoren der PWS fließen, werden ebenfalls in Abbildung C.8 aufgezeigt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

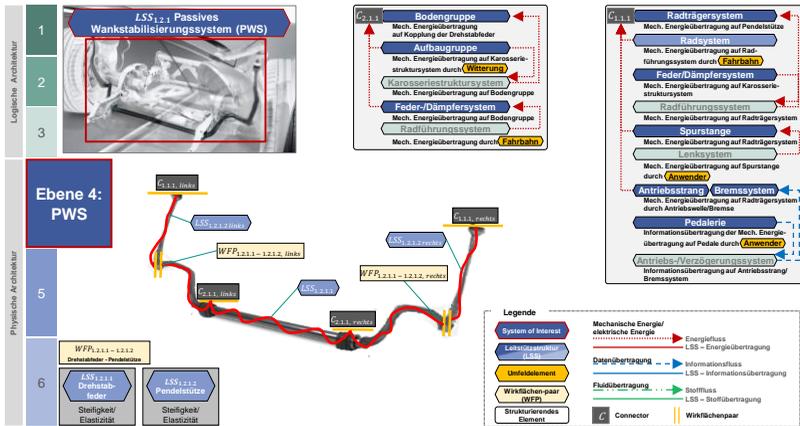


Abbildung C.8: C&C²-Modell der Ebene 4: Passive Wankstabilisierung (PWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 14; Hirschter, vsl. 2023)⁹³

Die *Hauptfunktion*, die das System der passiven Wankstabilisierung im Gesamtfahrzeug ausführen soll, ist die *passive Reduzierung der durch einen Lenkimpuls verursachte Fahrer-induzierten Wankneigung* (vgl. Abbildung C.9). Zu diesem Zweck wurde die Hauptfunktion in weitere Subfunktionen untergliedert, um die beteiligten und funktionsrealisierenden LSS und WFP der Funktionsstruktur der PWS zuzuordnen. Zur passiven Reduzierung der Fahrer-induzierten Wankneigung werden bspw. *Federdifferenzen der Räder zur dynamischen und belastungsabhängigen Radlastverteilung im Gesamtfahrzeug durch die Torsion der Drehstabfeder (LSS 1.2.1.1) auf Ebene der technischen Funktionen* ausgeglichen. Zur Ermöglichung der *Drehbewegung der Drehstabfeder um die y-Achse* ist diese, wie beschrieben, einerseits über Kopplungen ($C_{2,1.1}$) gelagert und leitet die Kraft über das $WFP_{1,2.1.1} - 1.2.1.2$ in die Pendelstütze bzw. nimmt vom Radträger bzw. $C_{1,1.1}$ kommende Kräfte auf. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

⁹³ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

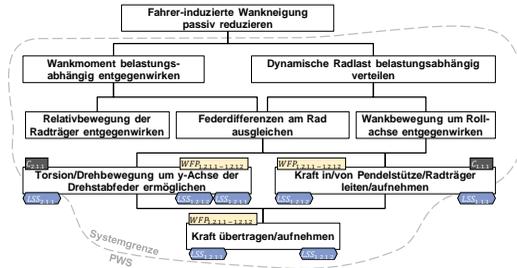


Abbildung C.9: Funktionsstruktur des passiven Wankstabilisierungssystems (PWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 15)

Im weiteren Verlauf wurden auf Basis der Funktionsstruktur der PWS die *resultierenden Eigenschaften des Systems und Gesamtfahrzeugs* analysiert. Dabei konnte zunächst festgestellt werden, dass nur die *konstituierenden Ausprägungen der Merkmale einer gewünschten/beabsichtigten Eigenschaft* (hier bspw. Wankwinkel und -beschleunigung) in der Produktentwicklung *beeinflussbar* sind. Am Beispiel der PWS ist innerhalb der Systemgrenzen bspw. der maximale Verdrehwinkel der Drehstabfeder über deren Merkmale *Material* oder *geometrische Abmessungen* direkt beeinflussbar. Eine *Versteifung der Drehstabfeder* reduziert folglich bspw. den Wankwinkel und *erhöht* damit die *querdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs*. Eine solche, versteifte Drehstabfeder führt bei Anregung durch bspw. Fahrbahnebenheiten zu einer schnelleren bzw. direkter Kraftübertragung in die Karosserie und *fördert damit das ungewünschte Wankkopieren*. Der Anwender nimmt in diesem Fall eine *Verschlechterung des Fahrkomforts* wahr. Die Variation der Merkmalsausprägungen der Eigenschaften des Wankstabilisierungssystems, aber ebenso des Gesamtsystems können folglich festgestellt und beschrieben werden. Der Einsatz der mechanischen PWS stellt den Produktentwickelnden folglich vor einen *nicht auflösbaren Zielkonflikt zwischen Fahrkomfort und Fahrdynamik*. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

In Abbildung C.10 sind die *Ergebnisse der C&C²-Analyse der hydraulischen Aktiven Wankstabilisierung (hAWS)* abgebildet. Die hAWS „ersetzt“ die Pendelstützen der PWS durch *Differentialzylinder (LSS_{1.2.2.2})* und wird zusätzlich um einen *Hydraulikanschluss (LSS_{1.2.2.3})* ergänzt. Die Drehstabfeder (LSS_{1.2.2.1}) bleibt identisch. Bei der hAWS existiert daher jeweils ein *WFP zwischen Drehstabfeder und den Differentialzylindern* rechts und links (WFP_{1.2.2.1-1.2.2.2}). Analog der PWS gibt es an der *Systemgrenze* die Kopplungen der Drehstabfeder über den *Connector C_{2.1.1}* an die Bodengruppe im Karosseriestruktursystem. Die Differentialzylinder sind im *Connector C_{1.1.1}* über Gelenke/Kopplungen ebenso an die Radträger angebunden. Darüber hinaus existiert im Vergleich zur PWS jeweils ein zusätzliches *WFP_{1.2.2.2-1.2.2.3}* zwischen Differentialzylinder und Hydraulikanschluss. Über den *Connector C_{3.1.1}* erfolgt die Verbindung zum *Energiezuführungssystem*, über den die *Fluidübertragung* (Hydrauliköl) aus dem *Hydrauliksystem* stattfindet. Die detaillierten Zusammenhänge und Informationsvererbung mit den interagierenden Systemen über die Connectoren der hAWS sind in Abbildung C.10 dargestellt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

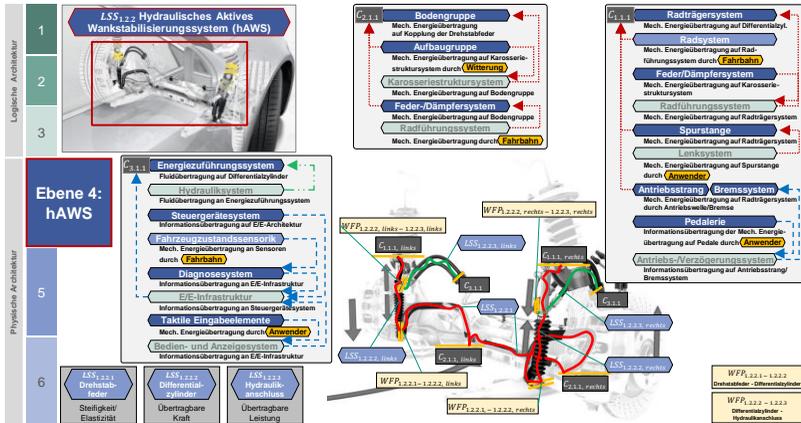


Abbildung C.10: C&C²-Modell der Ebene 4: hydraulisch-Aktive Wankstabilisierung (hAWS) (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 17; Hirschter, vsl. 2023)⁹⁴

Die grundlegende Funktionalität der PWS auf Gesamtfahrzeugebene („Fahrer-induzierte Wankneigung (passiv) reduzieren“) wird bei der hAWS zunächst sozusagen in ihrer Ausprägung variiert, d.h., die durch bspw. einen Lenkimpuls herbeigeführte Wankneigung des Fahrzeugs kann „aktiv“ reduziert werden (vgl. Abbildung C.11). Dem Wankmoment kann bedarfsgerecht entgegengewirkt und die dynamischen Radlasten situationsabhängig verteilt werden (beides ebenfalls Variationen der funktionale Ausprägung ggü. PWS). Durch die Regelung des Hydraulikdrucks (in $C_{3.1.1}$) kann über das $WFP_{1.2.2.1 - 1.2.2.2}$ eine Längenänderung des Differentialzylinders ($LSS_{1.6.3.4}$) ermöglicht werden, um der Radträgerbewegung bedarfsgerecht mit einem Moment entgegenzuwirken. Fahrzeuge, die mit entsprechender Sensorik zur Positionsermittlung (bspw. Lenkwinkelsensor, Längs- und Querschleunigungssensoren) ausgestattet sind, können durch die entsprechende Informationsübertragung und -verarbeitung nahezu präventiv eingreifen und die Fahrer-induzierte Wankneigung aktiv reduzieren. Darüber hinaus erfüllt die hAWS eine zweite Hauptfunktion zur Reduzierung einer Fahrbahn-induzierten Wankneigung bzw. des Wankkopierens (bspw. bei einseitigen Fahrbahnebenenheiten). Im Gegensatz zur Übertragung des einseitigen Fahrbahnimpulses über das Radführungs-system in das Karosseriesystem – verstärkt über das Moment der tordierten Drehstabfeder in die gleiche Richtung (wie bei PWS) – kann die Bewegung des Radträgers gezielt über eine Verringerung des Hydraulikdrucks im Differentialzylinder (i.S.v. einer „aktiven Verweichung der Pendelstütze“ über $WFP_{1.2.2.2 - 1.2.2.3}$) zugelassen und damit eine Wankdämpfung im Gesamtfahrzeug unterstützen. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

⁹⁴ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

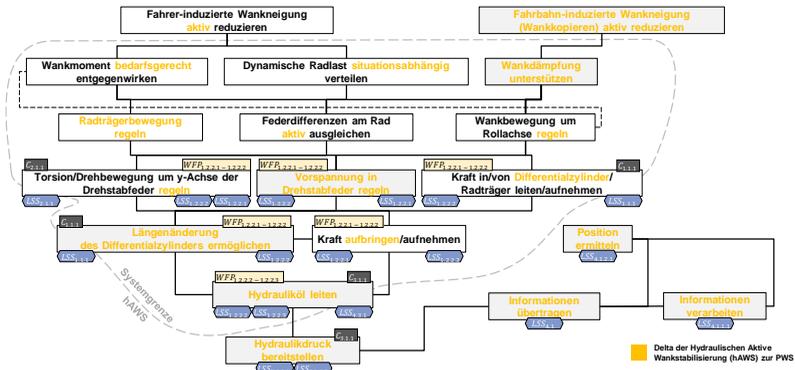


Abbildung C.11: Funktionsstruktur des hydraulischen Aktiven Wankstabilisierungssystems (hAWS) im Vergleich zur PWS (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 18)

Aufbauend auf der funktionalen Analyse wurden die *beeinflussbaren Merkmale und daraus resultierenden Eigenschaften* der hAWS und des Gesamtsystems untersucht. Die *geometrischen Abmessungen* von Kolbenstange und -zylinder des Differentialzylinders oder die *Viskosität des Hydrauliköls* sind Merkmale, die der Produktentwickelnde direkt durch Festlegung beeinflussen kann. Hierdurch werden folglich Eigenschaften wie die *übertragbare Leistung durch das Fluid* oder *übertragbare Kräfte im Differentialzylinder* bestimmt. Auf Gesamtfahrzeugebene sorgt die hAWS sowohl für eine *situationsabhängige Regelung des Wankwinkels* bei Fahrer-induzierter Wankneigung sowie für eine *Verringerung des Wankkopierens* bei Fahrbahn-induzierter Wankneigung. *Vorher konfliktbehaftete Ziele* wie bspw. *Fahrdynamik* und *-komfort* auf Gesamtfahrzeugebene können durch die hAWS folglich *gleichermaßen positiv beeinflusst* werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Neben den beeinflussbaren Eigenschaften wie bspw. dem *Reibmoment* durch Festlegung des Merkmals „*Spiel zwischen Lager und Drehstabhälfte*“ kann der Produktentwickelnde *Eigenschaften des Gleichstrommotors und Planetenradgetriebes* beeinflussen. Die Merkmale *Windungszahl* oder *Drahtdurchmesser* im Gleichstrommotor oder die *Getriebeabstufung* können definiert werden. Auf Gesamtfahrzeugebene beeinflusst die eAWS die gleichen Eigenschaften wie die hAWS, *verbessert durch die technische Lösung allerdings die Ausprägungen der Eigenschaften positiv*. Dies zeigt sich bspw. in der *höheren Stelldynamik* durch Reglungszeiten von teilweise 0,2 ms in der die eAWS bis zu 1200 Nm pro Rad bereitstellen kann (Koletzko, 2007). Durch bspw. lange Hydraulikleitungen und den drehzahlabhängigen Betrieb der Hydraulikölpumpe über die Verbrennungskraftmaschine ist die hAWS der eAWS technisch unterlegen. Darüber hinaus kann die eAWS die Wankneigung durch eine Störtenkopplung vollumfänglich kompensieren und nicht nur reduzieren (hAWS). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Zur tiefgreifenden Analyse wurden darüber hinaus ausgewählte Subsysteme der hAWS und eAWS weiter mit dem C&C²-Ansatz auf der Systemebene 5 untersucht, um die Phänomene der Variation von Funktionen und Eigenschaften zu beobachten und die *Informationsvererbung über die Systemebenen* hinweg zu veranschaulichen. Für detaillierte Erläuterung der Zusammenhänge im *C&C²-Modell des bürstenlosen Gleichstrommotors auf Ebene 5* wird an dieser Stelle auf die Publikation Albers, Hirschter, Fahl et al. (2022) verwiesen. Das Beispiel des C&C²-Modells des Bürstenlosen Gleichstrommotors der eAWS zeigt, dass über die Informationen in den Connectoren die Energieflüsse, ausgehend von den Umfeldelementen, bis zur mechanischen Energieübertragung über das Gehäuse auf die Spule (Stator) bzw. über das Planetenradgetriebe auf die Welle des Bürstenlosen Gleichstrommotors rückverfolgt werden können. Diese Rückverfolgbarkeit ist ebenso in den vorangehenden Darstellungen der alternativen RSE des Wankstabilisierungssystems auf Ebene 4 gewährleistet (vgl. Abbildung C.8, Abbildung C.10 und Abbildung 4.25). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Analyse der Phänomene bei Variation der ausgewählten RSE des Wankstabilisierungssystems aus Funktionssicht

Im Folgenden werden aufgrund des Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit nur die Ergebnisse aus Funktionssicht erläutert und in Bezug zur Eigenschaftssicht auf Hirschter (vgl. 2023) verwiesen.

Zur Betrachtung einer **Übernahmevariation (ÜV)** wird in der Fallstudie angenommen, dass das *mechanische, Passive Wankstabilisierungssystem* (vgl. Abbildung C.8) als RSE in eine Produktgeneration G_n übernommen wird.⁹⁵ Das *zu Grunde liegende Lösungsprinzip der PWS* aus dem Referenzsystem wird bei der ÜV im Inneren unverändert (hinsichtlich Anzahl und Gestalt der WFP) *übernommen* und *Anpassungen* durch den Produktentwickelnden dürfen nur *entsprechend den Anforderungen der Systemintegration* und den *Randbedingungen an den Schnittstellen zu anderen Systemelementen* vorgenommen werden (Albers, Bursac & Rapp, 2016). Folglich ist *lediglich eine Veränderung in den Connectoren der PWS bei einer ÜV zulässig*. Dazu könnte bspw. das Material des Radträgersystems verändert werden, was sich auf die mechanische Energieübertragung zwischen Radträger und Pendelstütze auswirken würde (Connector $C_{1.1.1}$). In der *Funktionalen Sicht* sind bei der Übernahmevariation *keinerlei Veränderungen feststellbar*. Grund hierfür sind die *gleichbleibenden WFP und LSS*, die für die funktionale Realisierung der Reduzierung der Wankneigung im Gesamtfahrzeug notwendig sind.⁹⁶ Betrachtet man die *Funktionsstruktur der PWS* (vgl. Abbildung C.9), so bleiben die Hauptfunktion („*Fahrbahn-induzierte Wankneigung passiv reduzieren*“) sowie alle weiteren Subfunktionen unverändert und werden ebenso aus dem

⁹⁵ Anmerkung: Gleichermaßen könnte ebenso die Abbildung der RSE von hAWS und eAWS durch Übernahmevariation in die Produktgeneration betrachtet werden.

⁹⁶ Anmerkung: Die Nutzung der PWS zu einem anderen Zweck als der Wankstabilisierung des Fahrzeugs wird in dieser Fallstudie vernachlässigt.

Referenzsystem in die neue Produktgeneration G_n übernommen. Mit den gleichen Begründungen lassen sich ebenfalls aus *Eigenschaftssicht keine Änderungen* der Eigenschaften innerhalb der Systemgrenzen feststellen (vgl. Hirschter (vsl. 2023)). Dennoch lassen sich im Gesamtfahrzeug Veränderungen von Eigenschaften identifizieren, die sich bis zu den Connectoren des Wankstabilisierungssystems vererben und auswirken können. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Im nächsten Schritt erfolgt die Analyse der **Gestaltvariation (GV)** eines RSE des Wankstabilisierungssystems aus Funktionssicht. In der Fallstudie wird dazu bspw. die *hydraulische Aktive Wankstabilisierung* aus dem Referenzsystem in eine neue Produktgeneration G_n übertragen und bspw. die *Gestalt der Drehstabfeder partiell variiert*. Das zu Grunde liegende Lösungsprinzip der hAWS wird beibehalten (Albers, Bursac & Rapp, 2016). Im Beispiel wurde dazu der *Querschnitt der Drehstabfeder sowie deren Material* verändert. Weitere Beispiele der GV wären hier denkbar. Betrachtet man die *Funktionsstruktur der hAWS* (vgl. Abbildung C.11) im Fall der Gestaltvariation, so lässt sich analog der Übernahmevariation *weder eine Veränderung der Hauptfunktionen* („*Fahrer-induzierte Wankneigung aktiv reduzieren*“ und „*Fahrbahn-induzierte Wankneigung (Wankkopieren) reduzieren*“) *noch deren Subfunktionen* feststellen. Ebenso bleibt die *Ausprägung der Stoff-/Energie- oder Informationsflüsse in Eingangs- und Ausgangsgrößen identisch* (bspw. „*Torsion/Drehbewegung um y-Achse der Drehstabfeder regeln*“). Aufgrund des veränderten Querschnitts der Drehstabfeder verändert sich zwar der *Wirkungsbereich der Funktion* in der Drehstabfeder, der sich in diesem Beispiel *nur auf Gestalteigenschaften⁹⁷ (zulässiges Torsionsmoment) auswirkt, nicht aber auf Ausprägung oder Prinzip der Funktion*. Da sich bei der Gestaltvariation im Modell der PGE die Anzahl von vorhanden WFP und LSS des RSE nicht ändert, sondern nur deren individuelle Gestalt und Anordnung (ohne WFP/LSS hinzuzufügen und zu entfernen), können folglich *keine neuen Funktionen* identifiziert werden. Die Gestaltvariation löst mit der gleichen Argumentation *keine prinzipiell neuen Eigenschaften* innerhalb des Wankstabilisierungssystems hervor (vgl. Hirschter (vsl. 2023)). Nichtsdestotrotz lösen *geänderte Merkmale wie bspw. Querschnitt oder Material der Drehstabfeder Veränderungen der Ausprägung von vorhandenen Eigenschaften* aus. Entgegen der ÜV sind diese Veränderungen nicht nur in den Connectoren, sondern an den inhärenten WFP und LSS des Wankstabilisierungssystems feststellbar. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

Abschließend wird die **Prinzipvariation (PV)** eines RSE hinsichtlich der Phänomene aus Funktionssicht untersucht. In der Fallstudie wird dazu die *Variation zwischen einer mechanischen Passiven Wankstabilisierung und der elektromechanischen Aktiven Wankstabilisierung* betrachtet. In der Prinzipvariation wird ein System durch *Hinzufügen und Entfernen inhärenter Elemente und Verknüpfungen im Inneren eines Lösungsprinzips des RSE neu entwickelt* – damit geht immer auch die Gestaltvariation einher. Dadurch wird folglich ein

⁹⁷ *Gestalteigenschaften* sind nach Thau (2013, S. 134) die Eigenschaften der Gestalt einer Wirkfläche oder Leitstützstruktur, quantifizieren die Gestaltfunktionselemente aus geometrischen und stofflichen Aspekten und bestimmen die Wirkungs- bzw. Funktionseigenschaften.

neues Lösungsprinzip realisiert (Albers, Bursac & Rapp, 2016). Betrachtet man die Funktionsstrukturen von PWS (vgl. Abbildung C.9) und eAWS (vgl. Abbildung 4.26), so kann man im Vergleich zunächst eine prinzipiell neue, zweite Hauptfunktion („Fahrbahn-induzierte Wankneigung (Wankkopieren) aktiv kompensieren“) feststellen. In der Konsequenz wurden in der Funktionsstruktur eine Reihe neuer Subfunktionen wie bspw. „Wankdämpfung unterstützen“ oder „Drehstabhälften entkoppeln“ hinzugefügt, die zur Maxime der Hauptfunktion beitragen. Gleichmaßen zeichnen sich diese Funktionen durch neue Input-Output Wirkbeziehungen aus. Interessante Auswirkungen der Prinzipvariation von PWS auf eAWS sind in der ersten Hauptfunktion festzustellen. Das zu Grunde liegende Funktionsprinzip der PWS („Fahrer-induzierte Wankneigung passiv reduzieren“) wurde nicht vollends variiert, sondern es hat nur eine Variation der Ausprägung dieser Funktion stattgefunden. Dies ist an dem Teil der Formulierung im Adverb „aktiv“ (bzw. „passiv“ bei der PWS) feststellbar, welches das Verb „reduzieren“ (i.S.v. zugrundeliegendes Lösungsprinzip der Funktion) hinsichtlich der Ausprägung konkretisiert. Die PV führt ebenso aus Eigenschaftssicht aufgrund des neuen Lösungsprinzip (bzw. hinzugefügten/entfernten WFP und LSS) zu sowohl prinzipiell neuen Eigenschaften als auch Veränderungen in den Ausprägungen von vorhandenen Eigenschaften (vgl. Hirschter (vgl. 2023)). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

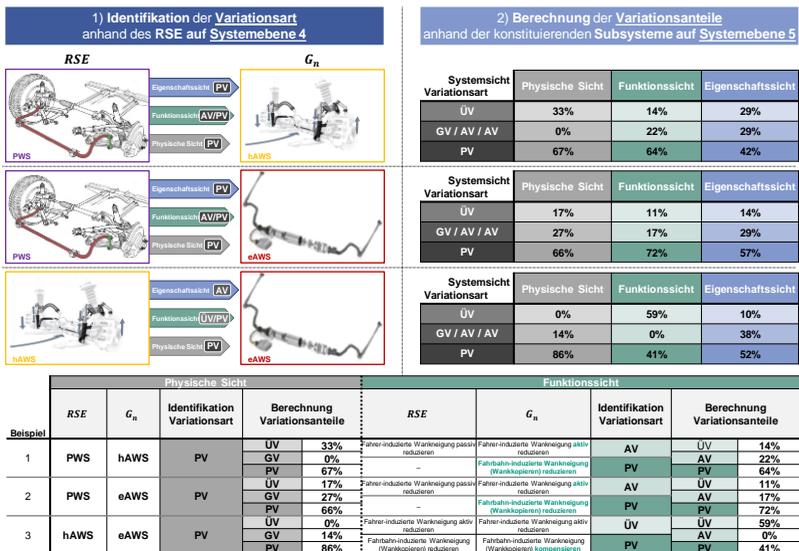


Abbildung C.12: Vergleich von Variationsart der drei alternativen Referenzsystem-Elemente (RSE) auf Ebene 4 und der Variationsanteile der konstituierenden Subsystem-Elemente (Ebene 5) des Wankstabilisierungssystem (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022, S. 24; Hirschter, vsl. 2023)⁹⁸

⁹⁸ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

Die Identifikation der Variationsarten des RSE zeigt in allen Kombinationen der drei Varianten des Wankstabilisierungssystems aufgrund der Anwendung verschiedener Lösungsprinzipien auf der *makroskopischen Ebene 5 eine Prinzipvariation* an (vgl. Abbildung C.12). Werden jedoch die Variationsarten der konstituierenden Subsysteme aus physischer Sicht in Relation gesetzt, ergeben sich verschiedene Verteilungen auf die Variationsarten. Von der PWS zu hAWS können auf Ebene 5 ungefähr 33% über ÜV und 67% über PV abgebildet werden. Zwischen PWS und eAWS sinkt der Anteil von ÜV (17%) und es werden 27% über GV realisiert. Grund hierfür ist die GV der Drehstabfeder, die geteilt wird. Zwischen hAWS und eAWS liegen 14% GV und 86% PV, d.h., obwohl beide Varianten Aktive Wankstabilisierungssysteme darstellen, sind die Lösungsprinzipien (hydraulisch und elektromechanisch) so unterschiedlich, dass kein Subsystem gänzlich übernommen werden kann und die PV den mit Abstand größten Anteil darstellt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

In einem nächsten Schritt wurden die Variationen der Hauptfunktionen zwischen den drei alternativen RSE verglichen. Hier zeigte sich, dass zwischen der PWS und sowohl hAWS als auch eAWS jeweils die erste Hauptfunktion („*Fahrer-induzierte Wankneigung passiv/aktiv reduzieren*“) in ihrer Ausprägung variiert wird, die zweite Hauptfunktion („*Fahrbahn-induzierte Wankneigung (Wankkopieren reduzieren/kompensieren)*“) im Vergleich zur PWS jeweils eine PV darstellt. Zwischen hAWS und eAWS wird die erste Hauptfunktion durch ÜV übertragen, die zweite Hauptfunktion stellt jedoch eine PV dar, da das Wankkopieren bei der hAWS „*reduziert*“ und bei der eAWS „*kompensiert*“ wird – diese stellen *zwei prinzipiell verschiedene Funktionsprinzipien* dar. Vergleicht man die Subfunktionen der drei Systeme anhand der Funktionsstrukturen (vgl. Abbildung C.9, Abbildung C.11 und Abbildung 4.26), so ergeben sich folgende, fraktale Variationsanteile der Subfunktionen bzw. der Ausprägung der übergeordneten Hauptfunktionen. Zwischen PWS und hAWS werden 14% der Subfunktionen durch ÜV, 22% durch AV und 64% durch PV realisiert. Die Anteile zwischen PWS und eAWS sind vergleichbar (ÜV: 11%, AV:17%, PV:72%). Vergleicht man die Funktionsstrukturen von hAWS und eAWS, so kann man 59% ÜV und 41% PV feststellen. Die detaillierte Erläuterung zu den Eigenschaften und deren Variationsanteilen finden sich in Hirschter (vgl. 2023). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2022)

D. Präskriptive Studie: Ergänzungen zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE

Im Folgenden werden ausgewählte Elemente der Präskriptiven Studie dieser Forschungsarbeit ergänzt. Dazu wird zunächst Abschnitt 5.1 bzw. das *Verständnis und die Abbildung von (Produkt-)Funktionen im Modell der PGE* ergänzt. Anschließend werden die zentralen Entwicklungsaktivitäten des *generischen Referenz-Produktmodells zum Spezifizieren einer Produktgeneration* aus Abschnitt 5.2 erläutert. Der letzte Teil konkretisiert und detailliert den *Referenzprozess und die methodische Unterstützung des Produktentwickelnden beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen* aus Abschnitt 5.3.

D.1 Verständnis und Abbildung von (Produkt-) Funktionen im Modell der PGE

D.1.1 Referenzsystem-Elemente (RSE) im Modell der PGE

Die Beispiele möglicher Elementtypen des Subsystems „*Bremse*“ in Abbildung D.1 stellen die unterschiedlichen Sichten und jeweils darin erzeugten Artefakte dar. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021)

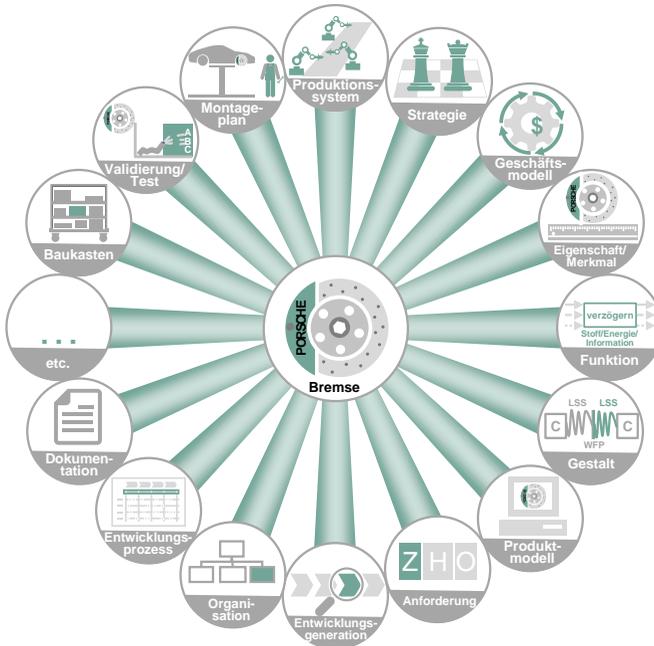


Abbildung D.1: Beispielhafter Auszug der Klassifizierung verschiedener Elementtypen des Referenzsystems bzw. einer neuen Produktgeneration im Modell der PGE (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021, S. 879) – Darstellung nach Hirschter (vgl. 2023)

Im Referenzsystem im Modell der PGE kann zum Beispiel der *Baukasten*, aus dem das Bremsen-Subsystem stammt, als ein RSE betrachtet werden. Der Baukasten kann für eine neue Produktgeneration über Variationen bspw. erweitert werden. Im Kontext des Gesamtsystems „*Fahrzeug*“ lassen sich dem Subsystem „*Bremse*“ teilweise spezifische, sicherheitsrelevante *Tests* zuordnen, über die abgesichert oder Kunden- und/oder Anwenderanforderungen *validiert* werden. Testfälle/Validierungen können sowohl auf Basis des Referenzsystems als auch den Wechselwirkungen zu *Anforderungen* und *Gestalt* geplant

und in Generationen variiert werden. In der Entwicklung des Produktionssystems einer Produktgeneration oder des Subsystems „*Bremse*“ werden bspw. *Montagepläne* in Bezug zu Instandhaltung bzw. Wartung betrachtet und variiert. Darüber hinaus werden in der Automobilindustrie bspw. strategische Quoten der Übernahmevariation von Subsystemen geplant, um die Wirtschaftlichkeit von ein oder mehreren Produktgenerationen zu optimieren. In diesem Zusammenhang kann die Variation der *Strategie* bei der Entwicklung des Referenzsystems stattfinden. Da das Subsystem „*Bremse*“ ein Verschleißteil des Fahrzeugs in Benutzung darstellt, lässt sich ebenso die Variation des Geschäftsmodells beschreiben, sofern ein Anbieter dem Kunden bspw. kostenlose Wartungen anbietet. Eine weitere, denkbare Möglichkeit ist die Variation der *Systemmodelle* (bspw. CAD-Modell), das durch die physische Variation des Subsystems „*Bremse*“ beeinflusst wird. Zudem kann eine Variation aufgrund von Veränderungen in der Tool-Kette, Verkürzungsfaktor oder Software-Lösung zustande kommen. Gleichermaßen kann analog zur Produktgeneration auch die Variation einer *Entwicklungsgeneration* festgestellt werden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Die *Organisation* eines Anbieters bildet die Verantwortlichkeiten über den *Entwicklungsprozess* ab, deren Variation sich bspw. in veränderten, organisatorischen Zuordnungen von Problemlösungsteams niederschlägt. Im Sinne der *Fraktalität* haben Subsysteme wiederum eigene, spezifische Entwicklungsprozesse, sodass in der Bremsenentwicklung bspw. variierte Referenz-, Soll- und Ist-Prozesse festgestellt werden können. Die *Dokumentation* des Subsystems „*Bremse*“ wird bspw. über die enthaltenen Anforderungen bzw. Veränderungen in Systemstruktur oder der Stakeholder variiert. Werden *Anforderungen* variiert (bspw. Reduzierung von Bremsenquietschen), hat dies oftmals eine Variation der *Eigenschaften bzw. Merkmalen, Funktion und Gestalt* zur Folge. Hierbei wird deutlich, dass alle Sichten bzw. möglichen *Elementtypen* eines Systems oder des Referenzsystems stark vernetzt und in mehr oder minder starker Wechselwirkung miteinander stehen. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

D.1.2 Mengenverständnis von Elementen im Modell der PGE

Zur Projektinitiierung einer Produktgeneration G_n ist die entsprechende **Menge des Referenzsystems** $R_n(t = 0) = \emptyset$ leer und muss durch den Produktentwickelnden aktiv modelliert und befüllt werden. Die Modellierung der **Referenzsystem-Menge** $R_n(t)$ sollte dabei nach dem Modellverständnis (vgl. Abschnitt 2.1.2.1) zweckgebunden, pragmatisch und verkürzend erfolgen. Durch das Referenzsystem wird insbesondere das Innovationspotenzial und Entwicklungsrisiko der Produktgeneration beeinflusst. Die Modellierung und der Aufbau des Referenzsystems durch den Produktentwickelnden ist eine höchst kreative Aktivität (bspw. Synthese der Erkenntnisse aus Anwenderstudien, Recherche, Verifikation und Validierung von RSE) mit maßgeblichen Auswirkungen auf die Produktentwicklung. Anhand der Aktivitäten wird deutlich, dass einerseits ausreichend Wissen des Produktentwickelnden notwendig ist und andererseits das Wissen personengebunden ist. Durch die Integration weiterer Produktentwickelnden in das Problemlösungsteam kann Wissen, i.S.v. angewandeter Information aus der Erkenntnisgewinn folgt, dem Referenzsystem zugeführt werden. In der schematischen Abbildung D.2 wird jegliche Art von Systemelementen (eben auch Wechselwirkungen) mit einem Kreuz dargestellt. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

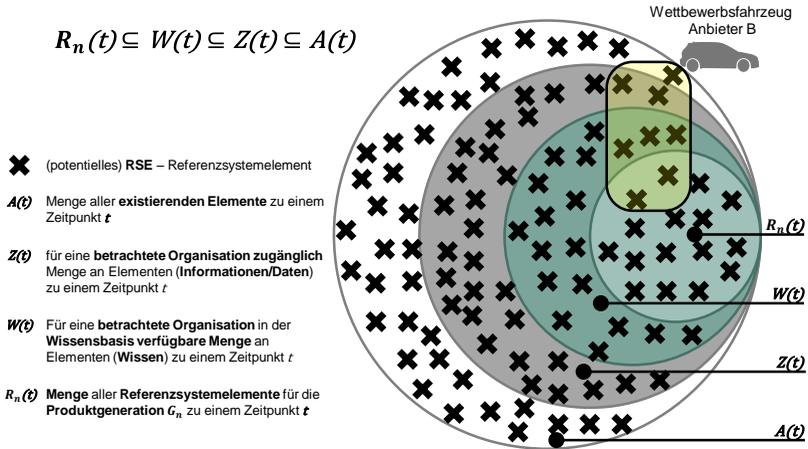


Abbildung D.2: Mengenverständnis von Elementen im Modell der PGE (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021, S. 880) – Darstellung nach Hirschter (vgl. 2023)

Eine intensive, wechselseitige Wettbewerbsanalyse ist insbesondere in der automobilen Produktentwicklung gängige Praxis. Zu diesem Zweck werden Fahrzeuge der konkurrierenden Anbieter erworben, um diese tiefgreifend zu analysieren (bspw. durch Zerlegen der physischen Gestalt in seine Subsysteme). Anhand dieses Beispiels wird nachfolgende das Mengenverständnis im Zusammenhang zu (potenziellen) Referenzsystem-Elemente musterhaft erörtert (vgl. Abbildung D.2). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Ein Anbieter A entwickelt eine neue Produktgeneration G_n und hat im Referenzsystem R_n eine spezifische Grauguss-scheibenbremse mit dem Durchmesser von 13,8" eines konkurrierenden Anbieters B modelliert. In einer Analyse des realen Wettbewerbsfahrzeugs von Anbieter B (vgl. Abbildung D.2) wurde aber bspw. festgestellt, dass die verwendete Bremse in Relation zum zulässigen Gesamtgewicht verhältnismäßig klein ausgeprägt ist. Die Produktentwickler von Anbieter A haben aus ihrer Analyse durch teilweise Rekonstruktion des Zielsystems des Wettbewerbsfahrzeugs synthetisiert, dass eine prinzipiell neue Funktion „Fahrzeugenergie rekuperieren“ die hydraulisch-mechanische Bremse entlastet und damit kleiner dimensioniert werden kann. In diesem Fall kann bei dieser angewendeten Information von *Wissen* davon ausgegangen werden, dass dieser Zusammenhang Bestandteil der **Wissensbasis W(t)** des Problemlösungsteams ist. Die Wissensbasis ist unabhängig der Produktgeneration G_n , da diese ebenso für Produktgenerationen weiterer Produktlinien des Produktportfolios von Anbieter A genutzt werden kann. Allein durch eine bewusste Entscheidung des Produktentwickelnden dieses Wissens-Element in der neuen Produktgeneration G_n zu berücksichtigen und letztlich zu variieren, gelangt das Element als RSE in das Referenzsystem R_n . (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Nicht nur durch den Kauf eines Wettbewerbsfahrzeugs liegen dem Anbieter A Informationen vor, sondern eine Vielzahl der *Informationen* aus bspw. Produktdatenblättern, Presseberichte oder Bedienungsanleitungen sind *zugänglich* und können dort entnommen werden. Zu dieser **Menge an zugänglichen Informationen** $Z(t)$ liegt jedoch noch kein (Kontext-) Wissen vor. Der Produktentwickelnde kann die Information über den optimalen Bremsweg bei standardisierten Bedingungen bspw. aus dem Produktdatenblatt entnehmen. Nichtsdestotrotz muss der Produktentwickelnde die Information relativ zur Produktgeneration beschreiben, um durch einen notwendigen Erkenntnisgewinn *Wissen für $W(t)$* zu generieren. Anbieter A muss den Bremsweg folglich in Relation zu internem Wissen stellen und bspw. die technischen Maßnahmen des konkurrierenden Anbieters B analysieren. Ein Vorhandensein von Information in der Organisation reicht demnach nicht aus, um dies als Element in das Referenzsystem zu überführen. Die strikte Trennung von Information und Wissen verdeutlicht die außerordentliche Leistung und gewissermaßen Kreation bei der Modellierung des Referenzsystems durch den Produktentwickelnden. Die Anwendung von Informationen bspw. aus Marktforschung (Anbieter C ist Technologie-Vorreiter) müssen im Systemkontext berücksichtigt werden, da sie ggf. Bedarfe oder Begründungen für die Modellierung im Referenzsystem darstellen. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Nicht alle Informationen müssen für Anbieter A in betrachtetem Beispiel verfügbar sein, d.h., die realen Zielsystem-Informationen des konkurrierenden Anbieters B *existieren* zwar, sind allerdings *nicht allgemein zugänglich*. Durch eine (teilweise) Rekonstruktion des Zielsystems könnte Anbieter A versuchen, diese Informationen für sich zu erheben. Die **Menge aller existierenden Elemente** $A(t)$ ist demnach die beschränkte Menge aller Informationen, die für eine Organisation durch Aktivitäten (bspw. Recherche, Rekonstruktion des Zielsystems, etc.) zugänglich sein könnten, es zum **Zeitpunkt t** jedoch noch nicht sind. Im Beispiel der Technologieentwicklung könnte Anbieter A versuchen zu rekonstruieren, warum Anbieter C Technologie-Vorreiter ist (Zielsystem-Element von Anbieter C). (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

D.1.3 Generischer Variationsoperator im Systemkontext im Modell der PGE

Definition 11: Übernahmevariation (ÜV) eines Systemelements im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung (Albers, Rapp, Fahl et al. (2020); Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021), vgl. Abbildung D.3)

Die **Übernahmevariation (ÜV)** ist ein *Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung zur Übernahmeentwicklung eines Systemelements einer neuen Systemgeneration, bei der das zu Grunde liegende Lösungsprinzip von einem Referenzsystem-Element (RSE) aus dem Referenzsystem in eine neue Systemgeneration im Inneren unverändert (hinsichtlich der Ausprägung) übernommen wird und Anpassungen entsprechend den Anforderungen der Systemintegration und den Randbedingungen nur an den Schnittstellen zu anderen Systemelementen vorgenommen werden.*

In der automobilen Produktentwicklung lässt sich die Übernahmevariation (ÜV) bspw. an der Übernahme des Subsystems „Bremse“ aus einem Baukasten verdeutlichen. Das zu Grunde liegende Lösungsprinzip der Scheibenbremse liegt z.B. als Referenzsystem-Element (RSE) vor und wird in der Gestalt bzgl. Wirkflächenpaaren (WFP) und Leitstützstrukturen (LSS) unverändert in die neue Systemgeneration übernommen. Nichtsdestotrotz kann die ÜV eines physischen Elements Anpassungen in den Connectoren (C) entsprechend den Anforderungen der Systemintegration oder veränderten Randbedingung an der Schnittstelle zu anderen Systemelementen – wie bspw. der Radnabe – erfordern. Im Sinne der Systemtheorie kann hier ebenso die ÜV der Funktion „*Fahrzeug verzögern*“ und die unveränderte Übernahme der funktionalen Ausprägung (i.S.v. Subfunktionen bzw. Haupt-/Nebenfunktionen, vgl. Abschnitt 5.1.5.1) beschrieben werden.

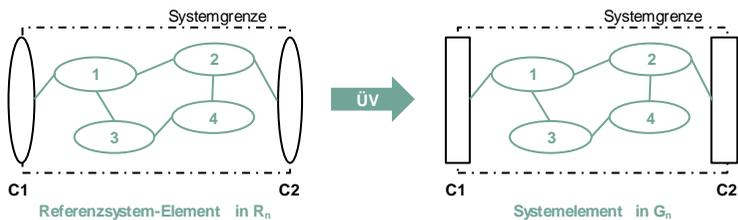


Abbildung D.3: Übernahmevariation (ÜV) eines Referenzsystem-Elements (RSE) im Modell der PGE in Anlehnung an Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vgl. 2023)

Definition 12: Prinzipvariation (PV) eines Systemelements im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung (Albers, Rapp, Fahl et al. (2020); Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021), vgl. Abbildung D.4)

Die **Prinzipvariation (PV)** ist ein *Bündel aus Aktivitäten der Produktentstehung zur Neuentwicklung eines Systemelements einer neuen Systemgeneration*, bei der das zu Grunde liegende Lösungsprinzip von einem *Referenzsystem-Element (RSE)* aus dem *Referenzsystem* auf eine neue Systemgeneration durch *Hinzufügen und/oder Entfernen inhärenter Elemente und Verknüpfungen im Inneren* übertragen und *variiert* wird. Dadurch wird ein gegenüber dem Referenzsystem-Element (RSE) *neues Lösungsprinzip* realisiert.

Eine Prinzipvariation (PV) geht immer mit einer *Ausprägungsva-riation (AV)* einher – man spricht auch von einer Neuentwicklung eines Systems, beginnend mit der Prinzipvariation (beeinflussbar durch Produktentwickelnden).

Die Prinzipvariation nutzt ein Lösungsprinzip eines RSE als Ausgangsbasis zum Hinzufügen und/oder Entfernen von Subsystem-Elementen (inkl. deren inhärenter Wechselwirkungen), um daraus ein elementar neues Lösungsprinzip zu erzeugen. Wird in einer neuen Systemgeneration eines Fahrzeugs bspw. der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor substituiert, so wird eine prinzipiell unterschiedliche technische Lösung realisiert. Das Lösungsprinzip kann mitunter in anderen Systemkontexten einen diversifizierten Output erfüllen. Eine Suche nach alternativen Lösungsprinzipien kann bspw. durch Kreativitätstechniken oder die Verwendung von Roadmaps (vgl. Abschnitt 2.3.1.2) unterstützt werden.

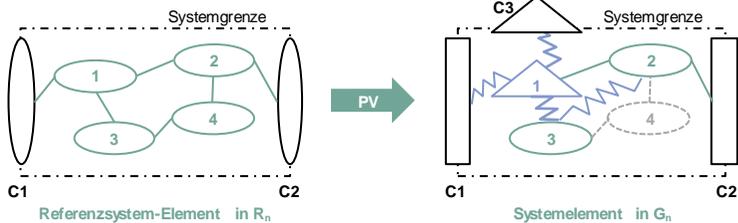


Abbildung D.4: Prinzipvariation (PV) eines Referenzsystem-Elements (RSE) im Modell der PGE in Anlehnung an Albers, Fahl, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vgl. 2023)

D.1.4 Technische Funktionen im Modell der PGE

In Anlehnung an Arbeiten von Zingel (2013), Thau (2013) und Alink (2010) kann auf Basis des generischen Funktionsverständnisses in der KaSPro ebenso das spezifische Verständnis der **technischen Funktion** (vgl. Definition 13 und Abbildung D.5) abgeleitet und definiert werden.

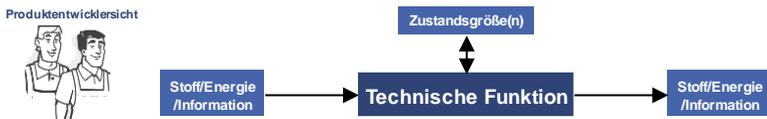


Abbildung D.5: Technische Funktion in der KaSPro nach Definition 13

Definition 13: Technische Funktion in der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung

Eine **technische Funktion** in der Produktentwicklung ist die *Funktion* eines *physischen Elements*, anhand der sich eine *lösungsspezifische Wirkbeziehung* zwischen einer Menge von (initiiierenden) *Eingangsgrößen* und (resultierenden) *Ausgangsgrößen* in Form von *Stoff, Energie und/oder Information* sowie den (inhärenten) *Zustandsgrößen* aus einer *Produktentwickelnden-Sicht* beschreiben lässt. Die *Ausprägung einer technischen Funktion* wird *fraktal* durch die *Wirkflächenpaare* (WFP), *Leitstützstrukturen* (LSS) und *Connectoren* (C) des physischen Elements bestimmt.

Eine **technische Funktion** (vgl. Definition 13 und Abbildung D.5) bezeichnet die *Funktion* eines *physischen Elements*, das von *materieller* (Hardware) bzw. *immaterieller* (Software) Beschaffenheit sein kann. Die technische Funktion lässt sich anhand einer *lösungsspezifischen Wirkbeziehung* beschreiben, die durch die technische Nutzung *physikalischer und chemischer Auswirkungen* (Ausgangsgrößen) bestimmt wird, die als Reaktion auf eine bestimmte Anzahl an *Ursachen* (Eingangsgrößen in Form von Energie, Stoff, Information) ablaufen (Zingel, 2013). Der Vorgang und das Resultat einer lösungsspezifischen Wirkung wird bestimmt durch die in der Produktentwicklung gewählten *Wirkprinzipien* und die von den Interaktionspartnern eingebrachten Energien, Stoffe und Informationen (Zingel, 2013).

Die *Produktentwickelnden-Sicht* fokussiert sich dabei auf die technische Lösung des einer Funktion zu Grunde liegenden Problems und führt einerseits unterschiedlichste Disziplinen, andererseits die Schnittstellen zum operativen Management, zum Wissensmanagement sowie zu Verbesserungsprozessen zusammen (Deigendesch, 2009). Innerhalb dieses Rahmenwerks muss der Produktentwickelnde in seinem Tun eine Vielzahl von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.1.3.2), die häufig nicht expliziert sind (Deigendesch, 2009). Eine *Zustandsgröße* der technischen Funktion ist eine *makroskopische physikalische Größe*, die ggf. in Zusammenspiel mit anderen Zustandsgrößen den Zustand eines physikalischen Systems beschreibt, aber im Rahmen der lösungsspezifischen Betrachtung als *Variable* angesehen wird (Klauder Jr., 1968). Sofern die Zustandsgrößen der technischen Funktion *zeitlich konstant* bleiben, so befindet sich das System im *thermodynamischen Gleichgewicht* oder in einem *stationären Fließgleichgewicht* (Thau, 2013). Den Zustandsgrößen einer technischen Funktion gegenüber stehen *Prozessgrößen*, wie bspw. Arbeit und Wärme, über die der Verlauf einer Zustandsänderung beschrieben werden kann (Klauder Jr., 1968). Eine Zustandsänderung findet immer dann statt, wenn sich die *Eigenschaften der Gestalt-Funktions-Elemente* im *Connector* der Funktion ändern (Thau, 2013). Die *Ausprägung einer technischen Funktion* wird *fraktal* durch die *Wirkflächenpaare* (WFP), *Leitstützstrukturen* (LLS) und *Connectoren* (C) des physischen Elements bestimmt und kann über den C&C²-Ansatz (vgl. Abschnitt 2.1.3.4) modelliert werden.

D.2 Generisches Referenz-Produktmodell zum Spezifizieren einer Produktgeneration

Zentrale Entwicklungsaktivitäten des erweiterten ZHO-Modells

Die Aktivität der **Objektanalyse** leistet einen wesentlichen Beitrag zur **Validierung** der Produktgeneration und ermöglicht es dem Produktentwickelnden, sowohl Elemente des *Referenz-Objektsystems* (z.B. erworbene Wettbewerbssysteme) als auch *bereits entwickelte Objekte bzw. Teilergebnisse der Produktgeneration* (z.B. erste virtuelle/physische Prototypen aus vorangegangenen Analyse-/Syntheseschritten) zu analysieren. Durch die Berücksichtigung verschiedener Stakeholder (u.a. Kunde, Anwender oder Anbieter) im *Handlungssystem* ist der Produktentwickelnde in der Lage zu validieren. Die *Validierung* kann jedoch nur dann effizient und effektiv sein, wenn die *Wissensbasis* des Produktentwickelnden durch die – auf wesentliche Elemente reduzierte – *Objektanalyse* spezifiziert wird. In diesem Zuge *bewertet* der Produktentwickelnde die Analyseergebnisse gegenüber der *Stakeholder-Wahrnehmung* bzw. im Vergleich zu den bereits gebildeten Elementen des Zielsystems. Sofern die *Stakeholder-Erwartungen* ausreichend *objektiviert* sind, kann der Produktentwickelnde die Zielsystem-Elemente während des Entwicklungsprozesses kontinuierlich *verifizieren* und die *Wissensbasis im Handlungssystem erweitern*. Die *Bewertung* der Elemente des *Objektsystems* führt zur Erweiterung der individuellen Erkenntnisse eines Produktentwickelnden. Darüber hinaus müssen technische Konflikte im Objektsystem identifiziert und durch Anpassung der Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen der Produktgeneration oder durch die folgenden *Synthese-/Analyseschritte* unter Berücksichtigung des Handlungssystems aufgelöst werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Durch die Aktivität der **Zielsynthese** werden mit der *Wissensbasis im Handlungssystem* Elemente im *Zielsystem* der Produktgeneration unter Berücksichtigung analysierter *Objektsystem-Elemente* und des *Referenzsystems* – bspw. über den IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (vgl. Abschnitt 2.3.3.3) – validiert. Konkret heißt dies, dass bspw. Eigenschaften im Zielsystem konkretisiert oder aufgrund von unauflösbaren Zielkonflikten angepasst werden. Die *Validierung* im Entwicklungsprojekt liefert kontinuierlich Informationen, die im Zielsystem der Produktgeneration G_n berücksichtigt werden. Informationen über *interne*, aber auch *externe (potenzielle) Referenzsystem-Elemente (RSE)* (modelliert im *Referenz-Zielsystem* aus der Menge aller *existierenden* $A(t)$ aller *zugänglichen* $Z(t)$ oder *in der Wissensbasis verorteten* $W(t)$ Elemente *zum Zeitpunkt* t , vgl. Abschnitt 5.1.2) sind von entscheidender Bedeutung für das *Synthetisieren* von *Zielsystem-Elementen*. Einerseits können so Zielsysteme anderer Produktgenerationen, die sich bspw. noch in der Entwicklung befinden, und andererseits externe, nicht explizite, aber rekonstruierbare Informationen bei der Bildung des Zielsystems der Produktgeneration G_n berücksichtigt werden. Das *Referenzsystem* fördert damit die Zielsynthese des Produktentwickelnden, unterstützt die Berücksichtigung des Nutzens der Stakeholder und erweitert die *Validität der Validierung*. Die Zielsynthese wird durch *Referenz-Strukturen im Handlungssystem* bspw. in Form von Referenz-Prozessen oder –Methoden, die in anderen Produktgenerationen verwendet werden oder wurden, unterstützt. Die Vielzahl von synthetisierten Zielen, Anforderungen und Randbedingungen, die

zum Teil in unterschiedlicher Granularität vorliegen, werden im generischen Referenz-Produktmodell nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) über die Sichten und Ebenen systematisch strukturiert, priorisiert und die Produktgeneration für den *Kreationsschritt* bzw. die *Zielanalyse* vorbereitet. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Die Aktivität der **Zielanalyse** stellt die Grundlage zur **Kreation** der Produktgeneration dar und ermöglicht es dem Produktentwickelnden, sowohl Elemente des *Referenz-Zielsystems* (z.B. kommunizierte Zieleigenschaften von Wettbewerbern) als auch bereits gebildete Ziele der Produktgeneration (z.B. erste Soll-Eigenschaften oder Produktfunktionen aus vorangegangenen Analyse-/Syntheseschritten) zu analysieren. Durch die Berücksichtigung verschiedener Stakeholder (u.a. Kunde, Anwender oder Anbieter) im Handlungssystem ist der Produktentwickelnde in der Lage, **validierungsgetrieben zu kreieren** (vgl. z.B. Albers, Reinemann, Hirschter et al. (2019) und Reinemann, Hirschter, Mandel et al. (2018)). Die *Kreation* kann jedoch nur dann effizient und effektiv sein, wenn der Lösungsraum des Produktentwickelnden durch die, auf wesentliche Elemente reduzierte, *Zielanalyse* spezifiziert wird. In diesem Zuge *bewertet* der Produktentwickelnde die Analyseergebnisse gegenüber der *Stakeholder-Wahrnehmung* bzw. im Vergleich zu den bereits gebildeten Elementen des Objektsystems. Sofern die *Stakeholder-Erwartungen* ausreichend *objektiviert* sind, kann der Produktentwickelnde die Objektsystem-Elemente während des Entwicklungsprozesses kontinuierlich *verifizieren* und den *Lösungsraum im Handlungssystem einschränken*. Die *Objektivierung* der Elemente des Zielsystems führt zur Einschränkung des individuellen Interpretationsspielraums eines Produktentwickelnden und unterstützt die Vereinheitlichung unterschiedlicher mentaler Modelle der beteiligten Akteure. Darüber hinaus müssen Zielkonflikte im Zielsystem identifiziert und durch Anpassung der Ziele der Produktgeneration oder durch die folgenden *Synthese-/Analyseschritte* unter Berücksichtigung des Handlungssystems aufgelöst werden. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

Durch die Aktivität der **Objektsynthese** werden im Rahmen des *ingeschränkten Lösungsraums im Handlungssystem* Elemente im Objektsystem der Produktgeneration unter Berücksichtigung analysierter *Zielsystem-Elemente* über die Variationsarten (ÜV, AV, PV) auf Basis des Referenzsystems im Modell der PGE kreiert. Konkret heißt dies, dass bspw. physische Elemente im *Objektsystem* der Produktgeneration in *Prinzip und Gestalt modelliert* werden. Die Kreation im Entwicklungsprojekt erzeugt eine große Anzahl von Modellen und Teilergebnisse (z.B. Prototypen), die im Objektsystem der Produktgeneration berücksichtigt werden. (Teil-)Ergebnisse von *internen*, aber auch *externen (potenziellen) Referenzsystem-Elementen (RSE)* (abgebildet im *Referenz-Objektsystem*) sind von entscheidender Bedeutung für das *Synthetisieren* von *Objektsystem-Elementen*. Einerseits können so Objektsysteme anderer Produktgenerationen, die sich bspw. noch in der Entwicklung befinden, und andererseits externe, explizite (Teil-)Ergebnisse bei der Entwicklung des Objektsystems der Produktgeneration G_n berücksichtigt werden. Das *Referenzsystem* fördert damit die Objektsynthese des Produktentwickelnden, unterstützt die Realisierung des Nutzens der Stakeholder, ohne die Kreativität einzuschränken. Die Objektanalyse wird durch *Referenz-Strukturen im Handlungssystem* bspw. in Form von Referenz-Prozessen, -Methoden oder -Entwicklungswerkzeugen, die in anderen Produktgenerationen verwendet werden oder

wurden, unterstützt. Die Vielzahl von synthetisierten Objekten, die zum Teil in unterschiedlicher Granularität vorliegen, werden im generischen Referenz-Produktmodell nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) analog über die Sichten und Ebenen systematisch strukturiert, priorisiert und die Produktgeneration für den *Validierungsschritt* bzw. die *Objektanalyse* vorbereitet. (Albers, Hirschter, Fahl et al., 2020)

D.3 Referenzprozess und methodische Unterstützung des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen

D.3.1 Abstraktionsgrad der Produktvariante des Produktportfolio im Modell der PGE

Definition 14: Produktvariante im Modell der PGE nach Fahl, Hirschter, Kamp et al. (2019, S. 5) basierend auf Peglow, Powelske, Birk et al. (2017, S. 3)

Eine **Produktvariante** ist die *Variante eines technischen Produktes*, die eine *geringfügig variierte Ausprägung* einer *übergeordneten Ausgangs-Produktgeneration innerhalb einer Produktlinie* beschreibt. Die Produktvariante unterscheidet sich somit *geringfügig*, aber dennoch *merklich* bspw. auf Ebene der Produkteigenschaften, -funktionen und/oder physischen Elementen von ihrer Ausgangs-Produktgeneration und *realisiert teilweise variierten Kunden-/Anwender- bzw. Anbieternutzen*.

Die **Produktvariante** (vgl. Definition 14) beschreibt die unterschiedlichen Varianten, i.S.v. *geringfügig variierte Ausprägung*, einer übergeordneten Ausgangs-Produktgeneration innerhalb einer Produktlinie. Ein Beispiel dafür sind die Produktvarianten des Porsche 911. Die „*Einsteiger*“-Produktvariante Carrera des Typ 992 unterscheidet sich dabei merklich von der „*Top*“-Produktvariante Turbo S des Typ 992 – bspw. in den Fahrleistungen (u.a. Beschleunigung 0-100 km/h), dem Funktionsumfang (z.B. der Fahrzeugaerodynamik) oder den Proportionen der Außenhaut (physische Elemente). (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019; Peglow, 2021)

D.3.2 Produktlinien-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen

Das Produktlinien-übergreifende Spezifizieren berücksichtigt insbesondere die *Anbieterstrategie*, analysiert ebenso die strategische Entwicklung des Produktportfolios und plant damit die Variationsarten von Produktfunktionen über Generationen. Der Impuls zur Spezifikation einer Produktfunktion aus Produktlinien-übergreifender Sicht kann mehrere Ursachen haben. Anbieter mit einer langen Tradition können bspw. aufgrund ihrer „*Anbieter-DNA*“ die Entwicklung bestimmter Produktfunktionen forcieren. Beispielsweise versucht ein Sportwagenhersteller neue Produktfunktionen zur Verbesserung der Fahrdynamik zu ent-

wickeln. Darüber hinaus kann ebenso die Analyse *heutiger und zukünftig relevanter Produkteigenschaften* (vgl. Marthaler, Stehle, Siebe et al. (2020)) – insbesondere aus Kunden- und Anwendersicht – die Spezifikation einer neuen oder weiterentwickelten Produktfunktion auslösen. In Zukunft kann so bspw. das *Bedürfnis der Kunden und Anwender* nach einem höheren Level des *Automatisierten* oder gar *Autonomen Fahrens* die Entwicklung von neuen Produktfunktionen zur Fahrerassistenz initiieren. Gleichermaßen kann ein *Wettbewerber*, der innovative Produktfunktionen am Markt einführt, andere Anbieter dazu veranlassen, ähnliche Funktionalitäten auszuarbeiten. Im Gegenzug ist es ebenso denkbar, dass neue, verfügbare *Technologien* Auslöser für Produktfunktionen oder Weiterentwicklung von bestehenden Generationen sind. Im Sinne eines „*Technologie-Pulls*“ kann ein neues Lösungsprinzip zur Abstandsmessung zu vorausfahrenden Fahrzeugen zur Weiterentwicklung der Produktfunktion „*Fahrzeuggeschwindigkeit Abstands-abhängig regeln*“ führen. In einem längerfristigen Horizont sind auch Veränderungen von *Märkten* und *Gesetzen* eine relevante Größe, die neue Produktfunktionen hervorrufen oder sogar erfordern. Nicht zuletzt kann ein Anbieter Produktfunktionen auf Basis verschiedener *Trends* oder *Szenarien* in Betracht ziehen. Der Anbieter definiert somit auf Grundlage der genannten Auslöser sein übergreifendes „*Produktfunktions-Portfolio*“, aus dem sich einzelne Produktgenerationsentwicklungen (analog der Baukastenentwicklung physischer Elemente) zu jedem Zeitpunkt bedienen können (vgl. Abbildung 5.19).

D.3.3 Produktfunktions-spezifisches Spezifizieren

Die *Funktionsbeschreibung* erörtert die lösungsoffene Wirkbeziehung aus Sicht des Kunden oder Anwender, wie man sie z.B. in einem Online-Konfigurator finden würde. Die Beschreibung enthält darüber hinaus auch Informationen über die Zuordnung der Produktfunktion zu bestimmten Produktvarianten und gibt Auskunft über die entsprechende Setzung als Serien- oder Sonderausstattung. Hinsichtlich dem *Projektmanagement* wird der Produktfunktion ein verantwortlicher Entwicklungsfachbereich zugeordnet, der funktionale Entwicklungsprozess detailliert und terminiert sowie der angestrebte Soll-Reifegrad der Produktfunktion über Entwicklungsgenerationen definiert. Die *Funktionsanforderungen* erläutern, welche Anforderungen sich aus dem definierten Kundennutzen und den zugeordneten Produkteigenschaften für die Produktfunktion ergeben. Darüber hinaus werden Anwendungsfälle aus Kunden- und Anwendersicht abgegrenzt und Anforderungen von und an andere Produktfunktionen aufgezeigt. Über die *lösungsoffene Funktionsarchitektur* wird die Produktfunktion auf logischer Ebene mit ihren Sub- und/oder Haupt- bzw. Nebenfunktionen logischen Systemen der Produktgeneration zugeordnet und die Schnittstellen detailliert aufgezeigt. In ähnlicher Weise werden bei der *lösungsspezifischen Funktionsarchitektur* die funktionsrealisierenden physischen Elemente definiert und den einzelnen Sub- und/oder Haupt- bzw. Nebenfunktionen zugeordnet. Die *Anforderungen an Funktionsverifikation und -validierung* umfasst die Planung und Koordination der Entwicklungsgenerationen und der erforderlichen Testfälle/Erfüllungsnachweise sowie ggf. virtuellen Erprobung. Darüber hinaus spezifizieren *Anforderungen an Funktionsfreigabe* die erforderlichen Freigabebedingungen zur Markteinführung für die Produktfunktion. Diese Aktivitäten finden während der Zielsystembildung in der Frühen Phase statt (Albers, Heitger, Haug et al., 2018).

D.3.4 Phase 1: Detaillierung der Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n)

Subphase 1.1: Analyse von Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung

In dieser Subphase wurde insgesamt über eine Situationsanalyse und anschließende Problemeingrenzung die Bedürfnissituation neuer Produktfunktionen unter der Berücksichtigung von Anbieterprämissen, Marktumfeld und auf Grundlage von Vorausschau bzw. Szenarien in Bezug zu Kunde und Anwender (oder weiteren Stakeholdern) eingegrenzt.

1.1.1 – Analyse heute und zukünftig relevanter Produkteigenschaften

In einem ersten Schritt wird nach der Initiierung des Funktionsprojektes die Zukunftsrobustheit und das Inventionspotenzial der Produkteigenschaften (vgl. Marthaler, Stehle, Siebe et al. (2020)) im Produktportfolio des Anbieters aus strategischer Perspektive analysiert. Die Verknüpfung von Zukunftsrobustheit und Inventionspotenzial ermöglicht die Ableitung einer zeitlichen Priorisierungssequenz im Hinblick auf die Befriedigung der zukünftigen Stakeholder-Erwartungen (insbesondere Kunde und Anwender) an (die Ausprägung von) Produkteigenschaften (Schuh, Lenders & Bender, 2009). Diese Informationen können genutzt werden, um Empfehlungen für den zeitlichen Horizont (bzgl. der Markteinführung) der Variation von Produkteigenschaften zu treffen (Marthaler, Stehle, Siebe et al., 2020). Die Unterscheidung zwischen keiner, früher, mittelfristiger und später Variation kann in einer Produktportfolio-übergreifenden Entwicklungsroadmap aus Eigenschaftssicht zur Unterstützung des Produktentwickelnden aggregiert werden (vgl. Abbildung D.6).

		Produkteigenschaft		Gewichtetes Relevanz		Gewichtetes Inventionspotenzial		Keine Variation	Frühe Variation (5 Jahre)	Mittelfristige Variation (10 Jahre)	Späte Variation (15 Jahre)	
		Totalwert	Rang	Totalwert	Rang							
Heutige relevante Produkteigenschaften	1	Langzeitqualität und -zuverlässigkeit	60	1	25	23		Gering				
	2	Witterungs- und Wegetauglichkeit	58	3	19	31		Gering				
	3	Level des automatisierten Fahrens	50	2	14	36		Mittel				
	4	Variabilität und Sitzigkeit	53	8	16	34		hoch				
	5	Nutzungsflexibilität	52	11	33	17			Gering			
	6	Nutzungskosten	36	30	39	11				Mittel		
	7	Längsdynamik	40	26	20	30					Gering	
	8	Transportverhalten	30	35	11	38						Mittel
		[--]	[--]	[--]	[--]	[--]			[--]	[--]	[--]	[--]
	28	Energieverbrauch	50	16	43	7			Mittel			
29	Entertainmentisenzionierung	48	20	36	13			Gering				
30	Robustheit der Reichweite	24	39	16	35						Gering	
Zukünftig relevante Produkteigenschaften	31	Schutz der Privatsphäre	49	19	42	8			Hoch			
	32	Aktive Fahrzeugsicherheit	47	21	37	12			Hoch			
	33	Anwenderunterstützung durch künstliche Intelligenz	55	6	54	1			Gering			
	34	Interaktionsverhalten mit anderen Verkehrsteilnehmer	45	24	52	2			Hoch			
	35	Konnektivität am digitalen Fahrerplatz	41	25	26	22						Mittel
		[--]	[--]	[--]	[--]	[--]			[--]	[--]	[--]	[--]

Abbildung D.6: Beispielhafte Entwicklungsroadmap aus Eigenschaftssicht nach Marthaler, Stehle, Siebe et al. (2020, S. 8)

Das Beispiel einer Entwicklungsroadmap in der Abbildung D.6 zeigt musterhaft, wie Produkteigenschaften auf Basis ihrer Zukunftsrobustheit (kombinierte Betrachtung der gewichteten Relevanz und Standardabweichung einer Produkteigenschaft) hinsichtlich ihres heutigen oder zukünftigen Beitrags zur Kunden-/Anwenderzufriedenheit kategorisiert werden können. Darüber hinaus sind Totalwert und Rang von jeweils der gewichteten Relevanz und gewichtetem Inventionspotenzial (gewichtetes, Umfeld-spezifisches Inventionspotenzial und Standardabweichung der Produkteigenschaft) zur Ableitung der Empfehlung des Variationshorizonts dargestellt. Die Größe der mittleren Standardabweichung von Inventionspotenzial & Zukunftsrobustheit ist darüber hinaus über die Angabe auf einer diskreten Skala [gering; mittel; hoch] angegeben. (Marthaler, Stehle, Siebe et al., 2020; Marthaler, 2021)

Die Analyse der heute und zukünftig relevanten Produkteigenschaften ermöglicht somit die Fokussierung auf Produkteigenschaften, für die es sich auf Grundlage deren Zukunftsrobustheit und des Inventionspotenzial lohnt, Funktionsidee(n) zu generieren.

Optional: 1.1.2 – Evaluation Stakeholder-Wahrnehmung (der aktuellen Generation der Produktfunktion am Markt) und Explizieren Stakeholder-Erwartungen an weitere Generationen oder die Stilllegung

Sofern bereits eine Generation der Produktfunktion – die über neue Funktionsidee(n) weiterentwickelt oder gar stillgelegt werden soll – am Markt eingeführt ist, kann an dieser Stelle optional die Stakeholder-Wahrnehmung bzw. Nutzung ebendieser Produktfunktion evaluiert werden. Daraus können strategische Schlüsse über heutige und zukünftige Stakeholder-Erwartungen an weitere Generationen der Produktfunktion bzw. die Stilllegung expliziert werden. Zu diesem Zweck kann an dieser Stelle die Bewertung der Eigenschaftserfüllung einer Produktfunktion erhoben werden. Der Erfüllungsgrad von Soll-Vorgaben der Ausprägung von Produkteigenschaften kann in Entwicklungsgenerationen (bspw. Simulationsmodelle oder Prototypen) oder aber Produktgenerationen am Markt erfolgen.

Die im Produktprofil definierten Eigenschaften einer Produktgeneration können über Eigenschaftsprofile (vgl. Abschnitt 2.2.5) anhand von Referenz-Strukturen weiter heruntergebrochen werden. So lässt sich bspw. die kundenerlebbare Produkteigenschaft „*Fahrdynamik*“ in „*Längsdynamik*“, „*Querodynamik*“, usw. strukturell herunterbrechen. In einem ersten Schritt müssen nur die zu bewertenden Produktfunktionen mit ihren entsprechenden Produkteigenschaften verknüpft werden. Anschließend wird die Produktfunktion mit dem Eigenschaftsprofil und seinen Dimensionen Relevanz, Wettbewerbspositionierung und Veränderung gegenüber Referenzprodukt verknüpft. Der Erfüllungsgrad der Produkteigenschaft (einer Produktfunktion) kann zu diesem Zeitpunkt relativ und absolut bewertet werden. Die relative Bewertung setzt die Eigenschaftserfüllung einer Produktfunktion auf einer negativ/positiven Skala in Relation zur Bewertung der Vorgänger-Produktgeneration (oder einem anderen gewählten Referenzprodukt). Die absolute Bewertung orientiert sich an einem Index, der anhand von definierten Kriterien und Kategorien eine „*Pseudo-Objektivierung*“ in dem Zuweisen eines entsprechenden Zahlenwertes ermöglicht. Über dieses Vorgehen kann die subjektive Soll-Wahrnehmung des Stakeholders in einem vergleichbaren Zahlenwert erfasst werden. (Hirschter, vsl. 2023)

Die Evaluation der Stakeholder-Wahrnehmung kann dem Anbieter helfen, Schlüsse über die zukünftigen Erwartungen der Stakeholder (insbesondere Kunde und Anwender) zu ziehen. Diese gilt es dann in den Eigenschaftsprofilen zukünftiger Produktgenerationen im Produktportfolio zu Explizieren, indem die Anforderungen an Stakeholder-Relevanz, Wettbewerbspositionierung und der Veränderung gegenüber dem Referenzprodukt entsprechend adaptiert werden. Dies kann ebenso bedeuten, dass eine neue Produkteigenschaft der Eigenschaftsstruktur hinzugefügt wird, um zukünftig relevanten Produkteigenschaften Rechnung zu tragen. Gleichmaßen kann über das skizzierte Vorgehen eine Beurteilung der Stakeholder-Erwartungen an die Stilllegung einer Produktfunktion konkretisiert werden.

1.1.3 – Eingrenzung Anbieter- und Marktprämissen

Zur Untersuchung des strategischen Gestaltungsspielraums in der Funktionsentwicklung werden sowohl das Handlungs- und Ressourcensystem des Anbieters als auch die prognostizierte Marktsituation über Prämissen eingegrenzt. Zur Planung und Steuerung eines effizienten Ressourceneinsatzes muss ein Anbieter in vielen Dimensionen kreativ analysieren, um daraus die Entwicklungspfade von Produkten/Dienstleistungen des Produktportfolios zu leiten. Zur strukturierten Bewertung von Entwicklungspfaden in einem bestimmten Handlungsfeld können Roadmaps dienen (vgl. Abschnitt 2.3.1.2). Die Visualisierung in einer Roadmap stellt die Ergebnisse von systematischer Zusammenführung von Expertenwissen und gruppendynamischer Bewertung dar. In Anlehnung an EIRMA (1997) wird eine Multi-Layer-Roadmap zur Verknüpfung und Eingrenzung der Anbieter- und Marktprämissen über die Ebenen Produkteigenschaften, Produktportfolio, Produktfunktions-Portfolio, Technologien und Ressourcen entwickelt werden (vgl. Abbildung D.7).

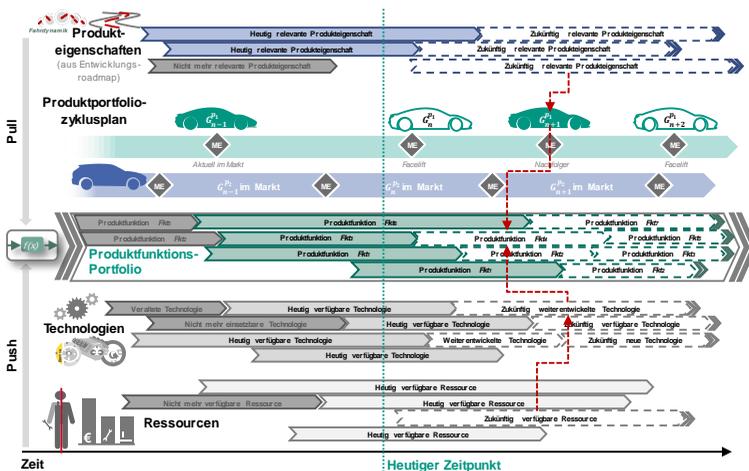


Abbildung D.7: Multi-Layer Roadmap aus Produkteigenschaften, Produktportfolio, Produktfunktionen sowie Technologien und Ressourcen in Anlehnung an EIRMA (1997)

Die dargestellte Multi-Layer-Roadmap beabsichtigt, den Lösungsraum für Funktionsidee(n) bzw. spätere Produktfunktionen transparent zu visualisieren. In der obersten Ebene in Abbildung D.7 können die in Phase 1.1.1 analysierten heute und zukünftig relevanten Produkteigenschaften in einen zeitlichen Bezug zueinander gesetzt werden. Anknüpfend daran kann der strategische Produktportfolio-Zyklusplan dargestellt werden. Dieser visualisiert, welche zukünftigen Produktgenerationen verschiedener Produktlinien ebengenannte zukünftig relevante Produkteigenschaften zur Erfüllung der Stakeholder-Erwartungen befriedigen müssen. Das bedeutet, dass aus dieser Kombination von Informationen Wissen generiert werden kann, darüber, welche Produktgeneration im Produktportfolio bspw. in 10 Jahren Anforderungen des autonomen Fahrens erfüllen muss. Aus diesen Anforderungen bzw. Produkteigenschaften können folglich im Sinne eines „Market-Pulls“ Produktfunktionen ausgelöst werden, die zur Realisierung notwendig sind (vgl. abwärtsgerichtete, rote Pfeile zum Produktfunktions-Portfolio). Auf der anderen Seite können die Informationen aus Technologie-Roadmaps (vgl. Abschnitt 2.3.1.2) oder der strategischen Entwicklung des Ressourcensystems (vgl. bspw. Arslan, Bursac, Killer et al. (2018)) den aufwärtsgerichteten „Technology-Push“ auf das *Produktfunktions-Portfolio* abbilden (vgl. Abbildung D.7). Über diesen beschriebenen Weg (vgl. aufwärtsgerichtete, rote Pfeile) kann illustriert werden, wie bspw. zukünftig verfügbare Ressourcen oder Technologien die Spezifikation und Entwicklung von Produktfunktionen initiieren können.

Die Verknüpfung der verschiedenen Ebenen in der Multi-Layer-Roadmap stellt eine nutzbringende Methode dar, über die Produktentwickelnde fehlende Ideen für Produktfunktionen zur Erfüllung von zukünftig relevanten Produkteigenschaften identifizieren können. Zudem können zeitliche Inkonsistenzen zwischen Produktfunktionen und deren zur Umsetzung notwendigen Technologien sowie Ressourcen transparent visualisiert werden. Des Weiteren werden die Informationen in den Zusammenhang mit dem strategisch geplanten Produktportfolio gesetzt. Zusammenfassend kann so abgeleitet werden, ob neue Produktfunktionen oder weiterentwickelte Produktfunktionen zur Ergänzung des Produktfunktions-Portfolios erforderlich sind (vgl. Abbildung 5.19 und Abschnitt 5.1.5.2 bzgl. der Anwendung des generischen Variationsoperators auf Funktionen).

1.1.4 – Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse des Produktfunktions-Portfolios

Die Verknüpfung zwischen der strategischen Ausrichtung bzw. den alternativen Szenarien des zukünftigen Produktportfolios wird über eine Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse mit dem Produktfunktions-Portfolio verknüpft. Die spezifische Ebene des Produktfunktions-Portfolios in der vorangehenden Multi-Layer Roadmap (vgl. Abbildung D.7) kann analog zur Technologie und den Produktgenerationen in einer sogenannten *Produktfunktions-Roadmap* aggregiert und organisiert werden (vgl. Abbildung D.8). Die Produktfunktions-Roadmap ist als eine Art „*funktionaler Baukasten*“ zu verstehen, in dem alle Produktfunktionen des gesamten Produktportfolios eines Anbieters gebündelt werden. In der Roadmap werden die in Generationen entwickelten Produktfunktionen – nach Produkteigenschaften gruppiert – dargestellt. Dazu zählen alle Produktfunktionen, die auf dem Markt eingeführt sind oder waren, sich in der Entwicklung befinden oder in Form von Funktionsidee(n) erst für die

Zukunft geplant sind – unabhängig davon, ob diese bereits einer oder mehrerer Produktgenerationen des Produktportfolios zugeordnet wurden. Dementsprechend können Produktfunktionen oder Funktionsidee(n) aufgrund ihres lösungsoffenen Charakters unabhängig von spezifischen Produktgenerationen spezifiziert werden (vgl. Abschnitt 5.3.2.1). (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020; Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

In der Deskriptiven Studie I wurden mehrere Faktoren identifiziert, die die Entwicklung einer Produktfunktion auslösen können (vgl. Abschnitt 4.2). Grundsätzlich kann man bei diesen Einflussgrößen *endogene* (z.B. Innovationen/Technologie, Strategie oder Anbieter-DNA) sowie *exogene Faktoren* (z.B. Trends/Szenarien, Märkte und Kunden, Wettbewerb und Gesetze) differenzieren (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020). Wie in Abbildung D.8 dargestellt, wird rechts neben der *Bezeichnung einer Produktfunktion* die aktuelle Generation ebendieser in der Entwicklung angegeben. Dies ist in Übereinstimmung mit der vorgestellten Nomenklatur in Abschnitt 5.3.1 jeweils die Generation der Produktfunktion Fkt_n , die als nächstes in den Markt eingeführt wird (heutiger Zeitpunkt). Zusätzlich können bereits generierte und priorisierte Funktionsideen in der Roadmap abgebildet werden. Die Informationen aus der Technologie- und Ressourcen-Roadmap werden in den Spalten rechts daneben mit der jeweiligen Produktfunktion verknüpft. Dabei kann zwischen *optional* und *erforderlichen Technologien/Ressourcen* unterschieden werden. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

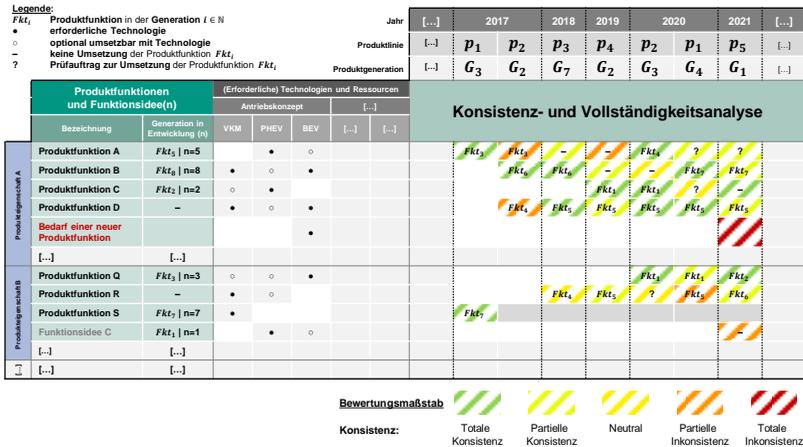


Abbildung D.8: Produktfunktions-Roadmap als Instrument zur Konsistenz- und Vollständigkeitsanalyse (Fahl, Hirschter & Albers, 2021, S. 8)

Die mitunter wichtigste Verknüpfung in der Produktfunktions-Roadmap stellt die Vernetzung spezifischer Generationen der Produktfunktion mit den einzelnen *Produktgenerationen des Produktportfolios* dar. Dabei ist es essenziell, dass alle Produktgenerationen aller Produktlinien erfasst werden, die sich aktuell am Markt oder der Entwicklung befinden oder geplant

sind. Nach eigenem Ermessen kann ein Anbieter im Sinne der Vollständigkeit und Transparenz ebenso vergangene Produktgenerationen in die Produktfunktions-Roadmap aufnehmen. Es bietet sich dabei an, die Produktgenerationen zeitlich nach ihrem Markteinführungszeitpunkt zu sortieren (vgl. Abbildung D.8). In den einzelnen Zellen, die jeweils eine Produktfunktion mit einer spezifischen Produktgeneration verknüpfen, kann dementsprechend die explizite Generation der Produktfunktion angegeben werden, die umgesetzt wird oder werden soll. In der Entwicklungspraxis hat sich gezeigt, dass gerade in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklung aufgrund von Unsicherheiten das Produkt noch nicht vollumfänglich spezifiziert ist, weshalb die Markierung von sogenannten funktionalen „Prüfaufträgen“ über ein „?“ dargestellt werden kann. Aktive Entscheidungen gegen die Umsetzung einer Generation können darüber hinaus mit einem „–“ hinterlegt und dokumentiert werden. Über eine *Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse* (in Anlehnung an Gausemeier (2013)) kann über die Einfärbung der Zelle gemäß des in Abbildung D.8 erläuterten *Bewertungsmaßstabes* die bestimmte Konsistenz zwischen der (Generation der) Produktfunktion und Produktgeneration indiziert werden. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Die *Produktfunktions-Roadmap* kann nicht nur als *Planungs- und Steuerungswerkzeug* des *funktionalen Portfolios eines Anbieters* genutzt werden, sondern ermöglicht durch ihren Aufbau die *Analyse der Vollständigkeit sowie Konsistenz zwischen Produktfunktion und Produktgeneration*. Basierend auf den Produktprofilen (bspw. in Form von Eigenschaftsprofilen) der jeweiligen Produktgeneration kann der Beitrag zur Erreichung der Ziel-Ausprägung von Produkteigenschaften durch die Produktfunktion analysiert werden. In diesem Sinne kann entsprechend bewertet werden, wie konsistent bspw. die Produktfunktion „*Fahrzeugverdeck öffnen*“ in der dritten Generation zu einer Produktgeneration passt, die innerhalb einer SUV-Produktlinie (Sport Utility Vehicle) in fünf Jahren auf den Markt kommen soll. Würden sich diese Kombination auf Basis des Eigenschaftsprofils und der darin vorgenommenen Positionierung bspw. aus Anbieter-Sicht ausschließen, so kann über rotes Einfärben der entsprechenden Zelle (gemäß dem Bewertungsmaßstab) in der Produktfunktions-Roadmap eine „*Totale Inkonsistenz*“ ausgedrückt werden. In diesem Fall sollte der Anbieter die Umsetzung der Produktfunktion in dieser spezifischen Produktgeneration hinterfragen und ggf. streichen. Umgekehrt kann über die dunkelgrüne Einfärbung eine „*Totale Konsistenz*“ zwischen Eigenschaftspositionierung und geplanter (Generation der) Produktfunktion ausgedrückt werden. Die drei Bewertungen zwischen den beiden Extrema erlauben eine granulare Darstellung von partieller Konsistenz bzw. Inkonsistenz sowie einer neutralen Beurteilung. Insgesamt kann über die Konsistenzanalyse auch der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Begeisterungsattribute eines Produktes aufgrund von sich verändernden Bedürfnissen der Stakeholder (insbesondere Kunden und Anwender) mit der Zeit zu Leistungs- und letztendlich Basisattributen degradieren (Bailom, Hinterhuber, Matzler et al., 1996). (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Ferner kann die Bedürfnissituation über eine *Vollständigkeitsanalyse* weiter eingegrenzt werden. Durch den kontinuierlichen Vergleich der Produktprofile bzw. Eigenschaftsprofile des Produktportfolios können *zeitliche Diskrepanzen* zwischen zukünftig geplanten Produktgenerationen und dem Produktfunktions-Portfolio identifiziert werden. Das heißt, dass durch diesen Abgleich „*funktionale Lücken*“ bzw. explizite Bedarfe an Produktfunktionen

identifiziert werden können. Ergibt die Analyse der Ziel-Eigenschaften einer Produktgeneration, die in bspw. 10 Jahren auf dem Markt eingeführt werden soll, dass die Ausprägung der Produkteigenschaft „Automatisiertes Fahrverhalten“ Level 4 gemäß der SAE-Norm J3016:2018-06 gefordert wird, so kann die Analyse der Vollständigkeit des Produktfunktions-Portfolios einen Bedarf von funktionaler Prinzip- oder Ausprägungsvariation aufdecken. (Fahl, Hirschter & Albers, 2021)

Subphase 1.2: Finden alternativer Funktionsprofile zur Bedürfnissituation

Im Rahmen der Alternativen Lösungssuche wurden in dieser Subphase alternativer Funktionsprofile generiert, die Erwartungen und Bedürfnisse der relevanten Stakeholder (insbesondere Kunde und Anwender) befriedigen.

1.2.1 – Konkretisierung des Kunden-/Anwender- und Anbieternutzens der identifizierten Bedürfnissituation in alternativen Funktionsprofilen

Zum Zweck der weiteren Konkretisierung von Kunde-, Anwender- und Anbieternutzen der identifizierten Bedürfnissituation kann an dieser Stelle eine Verbindung zur Umfeldvorschau einer bestimmten Produkteigenschaft hergestellt werden. Basierend auf dem Vorgehen der Szenariotechnik nach Gausemeier & Plass (2014) können entwickelte Zukunftsszenarien zur Herleitung spezifischer, zukünftiger Umfeldler in Bezug auf eine Produkteigenschaft qualitativ hergeleitet werden (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Zur tieferen Beleuchtung kann daraufhin bspw. die *Persona-Methode* (Beck, Eichstädt, Schweibenz et al., 2005) in Expertenworkshops angewandt werden, um unterschiedliche Kunden- und Anwendergruppen zu visualisieren und deren Bedürfnisse gezielt zu spezifizieren (Walter, Albers, Haupt et al., 2016). Neben den Projektionen der priorisierten Szenarien können aus Anbietersicht zudem interne und extern Referenzsystem-Elemente sowie die Ergebnisse und Erkenntnisse aus Märkte- und Gesetzesanalysen in einem *Umfeldsteckbrief* zum Finden alternativer Funktionsprofile aggregiert werden (vgl. Abbildung D.9).

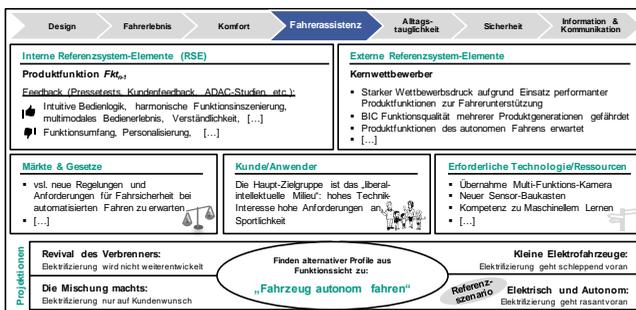


Abbildung D.9: Umfeldsteckbrief einer Produkteigenschaft als Grundlage zum Finden alternativer Funktionsprofile zur identifizierten Bedürfnissituation in Anlehnung an Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018, S. 12)

Da die Profilverfindung ein kreativer Prozess ist und jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell ist (Albers, 2010), kann das Vorgehen in diesem Schritt variieren und muss sich den verfügbaren Organisationsstrukturen und Ressourcen des Anbieters anpassen. Das in Abbildung D.9 dargestellte Beispiel eines *Umfeldsteckbriefs* beschreibt die Ergebnisse der Umfeldvorausschau in Bezug zur Produkteigenschaft „*Fahrerassistenz*“. Ein *internes Referenzsystem-Element* (RSE) – wie bspw. eine Vorgänger-Generation einer Produktfunktion – kann auf Basis von Presseauswertungen und Kundenfeedbacks analysiert werden. Darüber hinaus können konkurrierende Anbieter und deren Wettbewerbsprodukte (*externe RSE*) untersucht werden. Im Beispiel ist von einem stärkeren Wettbewerbsdruck auszugehen, da man vermutet, dass der Anbieter in naher Zukunft Produktfunktionen des autonomen Fahrens am Markt einführen wird. Angereichert mit den Informationen zu prognostizierten *Markttransformationen* oder neuen, *gesetzlichen Regelungen*, den konsolidierten Ergebnissen der Persona-Methode und *erforderlichen Technologien/Ressource*, kann der „*funktionale Lösungsraum*“ abgesteckt und eingegrenzt werden. Das bedeutet, dass im Referenz-Szenario (bspw. „*Elektrisch und Autonom*“) das Finden alternativer Funktionsprofile zu „*Fahrzeug autonom fahren*“ erforderlich ist (Fink, 2019).

1.2.2 – Lösungsoffene Suche der beeinflussten (Produkt-)Eigenschaften & 1.2.3 – Lösungsspezifische Suche der technologischen Prämissen bzw. Lösungsalternativen von Prinzip und (physischer) Gestalt

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Umfeldvorausschau im Hinblick auf eine Produkteigenschaft, werden im nächsten Schritt *alternative Funktionsprofile* konkretisiert. Zunächst werden dabei die weiteren, beeinflussten (Produkt-)Eigenschaften der zukünftigen Produktfunktion unabhängig der technischen Lösung (*lösungsoffen*) gesucht (vgl. Subphase 1.2.2). Im nächsten Schritt kann dann *lösungsspezifisch* nach den technologischen Prämissen und Lösungsalternativen von Prinzip und (physischer) Gestalt gesucht werden (vgl. Subphase 1.2.3). Da sich das Vorgehen der lösungsoffenen und lösungsspezifischen Suche nach kreativen Lösungen und im Sinne des *Mengenverständnisses im Modell der PGE* (vgl. Abschnitt 5.1.2) gleicht, werden die zwei Subphasen im Text der vorliegenden Forschungsarbeit zur Vereinfachung zusammengefasst.

Mit dem Ziel, die zukünftige Produktfunktion in seinen grundlegenden Elementen samt zugehörigen Anwendungsfällen und Technologien zu konkretisieren, werden Lösungsvorschläge im zuvor abgesteckten Lösungsraum generiert. Die Lösungsvorschläge für Produktfunktionen werden hinsichtlich der identifizierten Bedürfnissituation unter Berücksichtigung der Ziele, Anforderungen bzw. Produkteigenschaften und Randbedingungen relevanten Stakeholder analysiert und konkretisiert. Die Lösungsvorschläge können dann jeweils in einem *Funktionsideensteckbrief* (FISB) – wie in Abbildung D.10 dargestellt – beschrieben und strukturiert dokumentiert werden. Dieser Funktionsideensteckbrief kann sowohl für die Profil- als auch Ideenfindung in der nächsten Subphase 1.3 genutzt werden.

Die Profilverfindung ist ein höchst kreativer Denkprozess, der nicht vollumfänglich planbar ist, daher können *Kreativitätstechniken* die Lösungsfindung unterstützen. Man differenziert

hierbei *recherchierende, intuitive* und *diskursive Methoden*. In vielen Fällen enthält die Informationsbasis aus Situationsanalyse und Problemeingrenzung bereits den Schlüssel zu vielen Vorschlägen von Funktionsprofilen. Aus diesem Grund sollten insbesondere die *Multi-Layer-Roadmap* (vgl. Abbildung D.7) sowie die *Umfeldsteckbriefe* der Produkteigenschaften (vgl. Abbildung D.9) an dieser Stelle reflektiert werden. Zu guter Letzt zeigt die Erfahrung in der Entwicklungspraxis, dass die Lösungssuche im Team allgemein die Anzahl an Lösungsvorschlägen erhöht. Daher können *Expertenworkshops* die intuitive Erahrung ganzheitlicher Lösungskonzepte, das Finden einzelner Lösungselemente oder die gedankliche Kombination dieser Elemente zu einem Gesamtkonzept unterstützen. Im Rahmen solcher Workshops kann dann bspw. die SCAMPERR-Methode angewendet werden. Die *SCAMPERR-Methode* (Michalko, 2006) ist eine diskursive Kreativitätstechnik, die sieben Aktivitäten zur Verfügung stellt: **S**ubstitute (Ersetzen), **C**ombine (Kombinieren), **A**dapt (Abändern), **M**agnify (Vergrößern), **M**odify (Maßstab steigern oder vermindern), **P**ut to another use (Weitere Verwendungen finden), **E**liminate (Entfernen), **R**earrange (Umstellen) und **R**everse (Umkehren). Die sieben Aktivitäten können als Anfangspunkt dienen, um die inhärenten Systemelemente einer Produktfunktion in einem kreativen Prozess zu verändern und dadurch neue Lösungen zu finden.

Funktionsidee		Initiiierende Produkteigenschaft	Ansprechpartner	$G_1^{a,P_1,D}$	$G_2^{a,P_2,D}$	$G_3^{a,P_3,D}$	$G_4^{a,P_4,D}$...	Anvisierte Markteinführung
Bezeichnung		Produkteigenschaft	Name, Vorname	X			X	X	MM/JJJJ
Funktionsideensteckbrief / Fkt.	Funktions-"Purpose"		Wettbewerbskontext & Differenzierungsziele					Funktionsideendarstellung	
	Wir brauchen eine Funktion, die ...		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wettbewerber / Patentsituation ▪ Konkurrerende Funktionen ▪ Anvisiertes Differenzierungsziel 					<ul style="list-style-type: none"> ▪ Darstellung der Funktionsidee 	
	Funktionsideenbeschreibung		Mögliche funktionale Referenzsystem-Elemente						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschreibung der Idee aus Kundensicht 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interne RSE aus ... <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklungsteam des Anbieters ▪ Produktlinien des Anbieters ▪ Externes RSE aus ... <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wettbewerber der gleiche Branche ▪ anderen Branche ▪ Forschung 						
	Anwendungsfälle / Use-Cases		Nachfrage / Marktpotenzial			Nutzenbündel			
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In welchem Kontext wird die Funktion ausgeführt? ▪ Wie interagiert der Kunde/Anwender mit der Funktion 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Personas ▪ Märkte bzw. Marktgröße ▪ Trends/Szenarien ▪ Mögliche/Notwendige Weiterentwicklungen/Stilllegung 			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzen für Anbieter <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anbieter-"DNA", Strategische Nutzung, Ergänzung Produkt-funktionsportfolio, Nutzbare Kern-kompetenzen ▪ Nutzen für Kunde <ul style="list-style-type: none"> ▪ „Customer Pain“, Zielgruppe/ Marktsegment ▪ Nutzen für Anwender <ul style="list-style-type: none"> ▪ „User Pain“, Zielgruppe 			
Technologische Prämissen		Rahmenbedingungen / Framework							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologien: Schwerpunkt HW/SW ▪ Relevanz: Function on Demand, Over-the-Air-Updates, Connect, ... 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesetze ▪ Standards ▪ Strategische Beziehungen 							

Abbildung D.10: Funktionsideensteckbrief (FISB) zur Strukturierung alternativer Funktionsprofile in Anlehnung an das Produktprofil (vgl. Abschnitt 2.2.1)

Der in Abbildung D.10 schematisch dargestellte *Funktionsideensteckbrief* (FISB) ist an das Produktprofil-Schema (vgl. Abschnitt 2.2.1) angelehnt. Übergreifende Informationen wie *Bezeichnung der Funktionsidee*, die *initiiierende Produkteigenschaft*, *Ansprechpartner* in der

Organisation sowie ein Ausblick auf *relevante Produktgenerationen* und *anvisierte Markteinführung* werden in der Kopfzeile gelistet. Darunter ist zunächst der *Funktions-, Purpose*“ aufgeführt, der das Ziel der Aufgabenstellung in einem Satz (beginnend mit „*Wir brauchen eine Funktion, die...*“) konzentriert. In diesem Feld kann die Verknüpfung zur initiierenden Produkteigenschaft bzw. Begründung in der Entwicklungs-Roadmap aus Eigenschaftssicht geliefert werden. Anknüpfend daran findet sich der *Wettbewerbskontext* und die *Differenzierungsziele*, die bereits analysiert wurden. Des Weiteren kann die zukünftige Produktfunktion näher beschrieben oder sogar skizziert bzw. dargestellt werden. Die relevanten *Anwendungsfälle* und *Use-Cases* sollten sich gemäß dem Produktfunktions-Modell (vgl. Abschnitt 5.1.5.4) an der lösungsoffenen Wirkbeziehung zwischen initiierenden Ereignissen und resultierenden Ergebnissen für Kunde und/oder Anwender orientieren und in einen definierten Kontext einordnen. Mögliche *interne und externe Referenzsystem-Elemente* geben eine erste Indikation auf den Variationsanteil der zukünftigen Produktfunktion. Die *technologischen Prämissen* mit Schwerpunkten auf erforderlicher Hard- und Software sowie bspw. Anforderungen an „*Function-on-Demand*“ oder Aktualisierungen „*over-the-air*“ können ebenso angegeben werden (Weissler, 2018). Die Abschätzung der *Nachfrage* und des *Marktpotenzials* können im FISB zwischen möglichen oder notwendigen *Weiterentwicklungen* der Produktfunktion oder deren *Stilllegung* differenzieren, um eine robustere Aussage zu treffen. Das *Marktpotenzial* wird in der nächsten Subphase 1.3 abgeschätzt. Weiterhin bietet sich darunter Platz für eine Konkretisierung der *Rahmenbedingung* wie bspw. relevante Gesetze, Standards oder strategische Beziehung des Anbieters zu weiteren Anbietern, die berücksichtigt werden müssen oder sollen. Der *angestrebte Nutzen* für *Kunde, Anwender* und *Anbieter* findet unter der Funktionsideendarstellung ebenso seinen Platz in diesem Strukturierungsansatz.

Damit stellt der Funktionsideensteckbrief (vgl. Abbildung D.10) in letzter Konsequenz, analog zum Produktprofil, das Modell eines Nutzenbündel aus Funktionssicht dar, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung in den nächsten Subphasen zugänglich macht und den Lösungsraum für die Ausprägung der Funktionsidee bzw. zukünftigen Produktfunktion explizit vorgibt. Zu diesem Zeitpunkt im Referenzprozess liegen noch nicht alle Informationen zur vollständigen Befüllung des Funktionsideensteckbriefs vor, diese werden teilweise in den nächsten Subphasen erarbeitet und können kontinuierlich eingepflegt werden.

Subphase 1.3: Auswahl der Funktionsprofile und Bewertung der Funktionsidee(n)

In dieser Subphase wurden über die Lösungsauswahl und Tragweitenanalyse die alternativen Funktionsprofile systematisch reduziert und eingegrenzt und daraus entstehende Funktionsidee(n) bewertet und ausgewählt.

1.3.1 – Vorauswahl der Funktionsprofile

Um die generierten Funktionsprofile in Form von Funktionsideensteckbriefen (vgl. Abbildung D.10) systematisch zu filtern, aber auch kontinuierlich zu erweitern, wird in einem ersten Schritt zunächst das *Marktpotenzial* dem *Entwicklungsaufwand* bzw. der *Entwicklungs-komplexität* gegenübergestellt. Im Zuge der Gegenüberstellung von Anbieternutzen und -aufwand kann eine *Neun-Felder-Matrix*, wie in Abbildung D.11 dargestellt, entwickelt werden. Die Abschätzung der Werte für Marktpotenzial und Entwicklungsaufwand/-komplexität kann in *Expertenworkshops* diskutiert und durchgeführt werden.

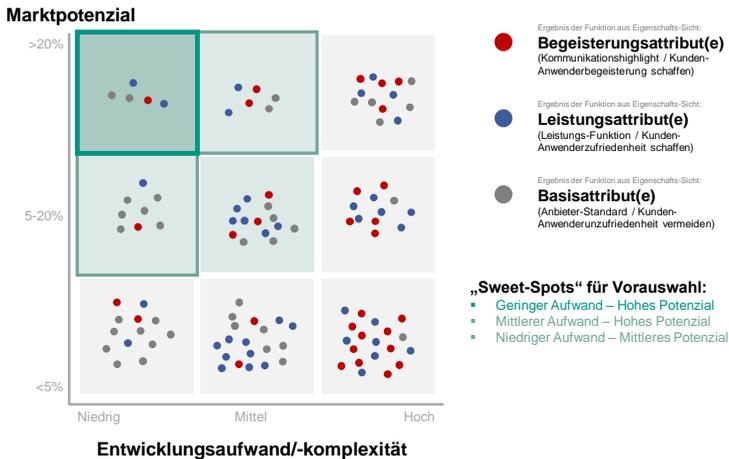


Abbildung D.11: Abschätzung des Marktpotenzials in Bezug zu Entwicklungsaufwand/-komplexität zur Vorauswahl von Funktionsprofilen

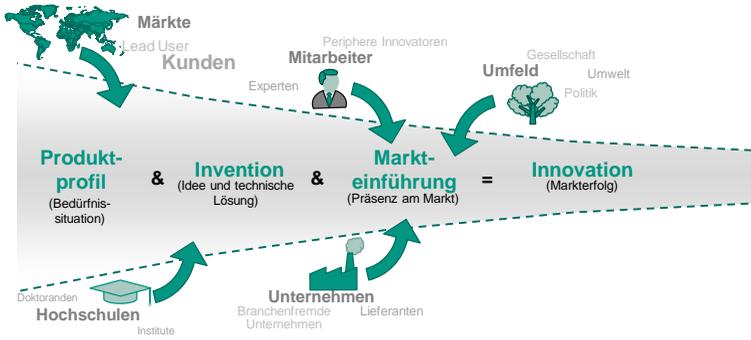
Im dargestellten Beispiel wurde der auf der x-Achse aufgetragene *Entwicklungsaufwand* bzw. die *Komplexität der Entwicklung einer Produktfunktion qualitativ* in „niedrig“, „mittel“ oder „hoch“ unterteilt. Es bietet sich an, an diesem Punkt den Entwicklungsaufwand bspw. über Experten des Finanzwesens oder der Beschaffung sowie das Projektmanagement in *monetärem Aufwand* abschätzen zu lassen. Dementsprechend kann eine *granulare, quantitative Sortierung* der alternativen Funktionsprofile begünstigt werden. Die beispielhaft dargestellte Gliederung des Marktpotenzials bezieht sich auf eine Abschätzung der Nachfrage der Produktfunktion in zukünftigen Produktgenerationen. Die Werte beruhen hier auf Beispielen aus der automobilen Produktentwicklung, in der oftmals sogenannte „*Take-Rates*“ (prozentualer Anteil aller Kunden, die eine Sonderausstattung bei der Konfiguration wählen) betrachtet werden. Die Gliederung kann sich je nach Fokus der Produktfunktion deutlich unterscheiden. Es ist an dieser Stelle ebenso möglich, bspw. das *absolute Ertragspotenzial* einer zukünftigen Produktfunktion aufzutragen. Die einzelnen, alternativen Funktionsprofile

können anschließend unterschiedlich *eingefärbt* werden. Erzeugt das Ergebnis einer zukünftigen Produktfunktion aus Eigenschaftssicht bspw. Begeisterung, so kann das zugehörige Profil in dieser Darstellung rot eingefärbt werden. Zu guter Letzt kann über die *Lage im Portfolio* eine *Vorauswahl der alternativen Funktionsprofile* vorgenommen werden. Eine Verortung im oberen linken Feld der Matrix würde bedeuten, dass hier hohes Marktpotenzial geringem Entwicklungsaufwand gegenüberstehen.

1.3.2 – Abschätzung des Innovationspotenzials basierend auf den Variationsanteilen aus Eigenschaftssicht

Aufbauend auf der Abschätzung des Marktpotenzials im vorgehenden Schritt kann durch eine *Abschätzung des Entwicklungspotenzials* – insb. aus Eigenschaftssicht – das *Innovationspotenzial* der zukünftigen Produktfunktion ergründet werden. Entsprechend der eingeführten Kausalzusammenhänge aus den Ursachen, den Variationstypen und den daraus resultierenden Wirkungen (vgl. Abschnitt 2.2), wird im Folgenden beschrieben, wie das Innovationspotenzial über Systemelemente aus Eigenschafts-, Funktions- und physischer Sicht abgeschätzt werden kann. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Dazu wird das *Innovationsverständnis* nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018) angewendet und übertragen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Nach dieser Auffassung setzt sich eine (funktionale) Innovation aus einem (Produkt-)Profil – d.h., der Beschreibung der Bedarfssituation – der (Funktions-)Idee und der technischen Lösung (Invention) zur Befriedigung des Nutzens sowie der erfolgreichen Positionierung am Markt zusammensetzt. In der Entwicklung kann das Entwicklungspotenzial einer Produktfunktion auf der Basis der verknüpften Elementtypen von Eigenschaften und physischen Elementen (vgl. Abschnitt 5.1.1) abgeschätzt werden. Darüber hinaus ist aber auch das Marktpotenzial entscheidend, das zumindest teilweise über das Funktionsprofil bzw. den vorangehenden Schritt beschrieben wurde. Im Folgenden wird jedoch nur auf den Anteil der Entwicklung am Innovationspotenzial eingegangen. In den Funktionsprofilen kann jeweils das Nutzenbündel (Kunde, Nutzer und Anbieter) modelliert werden. Die initiierenden und beeinflussten Eigenschaften einer Produktfunktion beschreiben, was der jeweilige Stakeholder von der realisierten Produktfunktion (über das spezifische Verhalten in einer Produktgeneration) wahrnehmen soll. Die Elemente der Eigenschaften werden dem Anteil des (Produkt-)Profils aus Funktionssicht am Innovationspotenzial zugeordnet. Aus Sicht der Stakeholder sind sowohl die Funktionsidee selbst als auch die physischen Elemente der Produktgeneration eher lösungsspezifisch und werden daher der Invention zugeordnet. Den Elementtypen Eigenschaften, Funktionen und physischen Elementen können in der Entwicklung unterschiedliche Werte zugeordnet werden, die Einfluss auf das tendenzielle Innovationspotenzial haben (vgl. Abbildung D.12). (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)



Entwicklungspotenzial		& Marktpotenzial			= Innovationspotenzial					
Auswirkung der Elementausprägung auf das Innovationspotenzial		(Produkt-)Profilpotenzial (Bedürfnisse)			Inventionspotenzial (Funktions-)Idee + technische Lösung					
-- stark negativ - negativ 0 neutral + positiv ++ stark positiv		Produkteigenschaften			Funktionsidee/Produktfunktion			Physische Elemente / Gestalt		
		Basis	Leistung	Begeisterung						
Kundenrelevanz (KANO)		0	+	++						
Anbiaternutzen		kurz	mittel	lang						
Wettbewerbspositionierung		0	+	++						
		IBC	TOP	BIC						
Variationsart		ÜV	AV	PV	ÜV	AV	PV	ÜV	AV	PV
		0	+	++	0	+	++	0	+	++
Herkunft des Referenzsystem-Elementes (RSE)		Team	Unternehmen	Industrie	Andere Industrie	Forschung	Team	Unternehmen	Industrie	Andere Industrie
		0	0	0	+	+	0	0	0	+
Neuentwicklungsanteil des RSE		Niedrig	Mittel	Hoch	Niedrig	Mittel	Hoch	Niedrig	Mittel	Hoch
		0	-	++	0	-	++	0	-	++

Wettbewerbspositionierung

BIC Best-in-Class (alleiniger Bestler)
 TOP Best (Bestler, aber nicht alleinig)
 IBC In-Best-Class (unter den Besten)

Anbiaternutzen

Kurz Kurzfristige Erfüllung der Bedürfnissituation
 Mittel Mittelfristige Erfüllung der Bedürfnissituation
 Lang Langfristige Erfüllung der Bedürfnissituation

Neuentwicklungsanteile des RSE

Niedrig Element mit hohem ÜV- und niedrigem AV-/PV-Anteil
 Mittel Element mit gleichmäßig verteilten Anteilen von ÜV, AV, PV
 Hoch Element mit niedrigem ÜV- und hohem AV-/PV-Anteil

Abbildung D.12: Abschätzung des Entwicklungspotenzials in Anlehnung an Albers, Rapp, Hirschter et al. (2021) und Hirschter (vsI. 2023)

Auf der Grundlage von sieben Entwicklungsprojekten in der Automobilindustrie konnten folgende *Kategorisierungen* ausgewählt, deren alternative Werte einen *Einfluss* auf das *Innovationspotenzial* haben (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021). Die *Kundenrelevanz* nach Kano, Seraku, Takahashi et al. (1984) betrifft insbesondere die Elemente des Typs Eigenschaft. Das Begeisterungsattribut einer Eigenschaft hat so bspw. einen sehr hohen Einfluss auf das Innovationspotenzial, da diese Eigenschaft insbesondere Alleinstellungsmerkmale einer Produktfunktion definieren und damit zu einer überproportionalen Befriedigung des Kundennutzens führen. Eine ggf. bereits in Subphase 1.1.2 *evaluierte Eigenschaftserfüllung einer Produktfunktion* kann in diesem Schritt herangezogen werden. Über den *Anbiaternutzen* kann z.B. beschrieben werden, ob initierende oder beeinflusste Eigenschaften einer Produktfunktion *kurz-, mittel- oder langfristig* die Kernkompetenz eines Unternehmens darstellen soll. In dieser Dimension lassen sich die Erkenntnisse aus der Analyse heutiger und

zukünftig relevanter Produkteigenschaften (vgl. Subphase 1.1.1) nutzen. Produkteigenschaften, die für ein Unternehmen nur kurzfristig interessant sind, werden daher nur selten fokussiert und in funktionale Innovationen umgesetzt. Die gewünschte *Wettbewerbspositionierung* der Eigenschaft, z.B. „Best in Class Autonomes Fahren“ in einem spezifischen Produktprofil, ist ein Indiz für die gewünschten Innovationen im *Produktfunktions-Portfolio* bzw. der Produktfunktions-Roadmap (vgl. Abbildung D.8). Die *Variationsarten* werden sowohl im Hinblick auf die Eigenschaften als auch auf das *Inventionspotenzial* (Funktionen und physische Elemente) betrachtet (vgl. generischer Variationsoperator in Abschnitt 5.1.3). Dabei wird entsprechend einer *Invertierung des Risikoportfolios* im Modell der PGE (vgl. Albers, Rapp, Birk et al. (2017)) davon ausgegangen, dass eine Prinzipvariation ein höheres Potenzial hat, als Innovation auf dem Markt wahrgenommen zu werden. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Die Herkunft des Referenzsystem-Elements (RSE) wird der Invention zugeordnet und wiederum aus dem Risikoportfolio im Modell der PGE berücksichtigt. In diesem Kontext wird die *Herkunft des RSE* aus einem eigenen Entwicklungsteam, den eigenen Organisationsstrukturen des Anbieters oder der gleichen Branche als neutrale Tendenz zum Innovationspotenzial bewertet, da davon ausgegangen wird, dass die Zielgruppe die technischen Lösungen bereits kennt oder sie zumindest nicht als neu wahrnimmt. Lösungselemente, die aus anderen Branchen (z.B. Integration von Produktfunktionen aus dem Schiffsbau in ein Fahrzeug) oder aus der Forschung stammen, können zu Innovationen führen. Abschließend wird der *Neuentwicklungsanteil der jeweiligen RSE* betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass ein hoher Neuentwicklungsanteil sich negativ auf die Produktfunktion auswirkt, da die Funktionalität oder Technologie bereits in früheren Generationen stark variiert wurde und Innovationssprünge bereits gemacht wurden. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

1.3.3 – Abschätzung des Entwicklungsrisikos basierend auf den Variationsanteilen aus Physischer Sicht

Ausgehend von einer generischen Modellierung von Variation und Charakteristika von Referenzsystem-Elementen (RSE) in der Wechselbeziehung zwischen Ursachen und Wirkungen, zeigt diese Subphase die Ableitung einer Modellinstanz, die eine spezifische, methodische Unterstützung zur Abschätzung des Entwicklungsrisikos einer Produktfunktion darstellt. Dabei konzentriert sich die Modellinstanz auf das *Entwicklungsrisiko* als Auswirkung von bestimmten *Schlüsselfaktoren*. Im Hinblick auf die in Abschnitt 2.3.2.2 beschriebene *Risikoklassifizierung* konzentriert sich das vorliegende *Schätzkonzept* auf das *technische Risiko*, da dies das grundlegende Risiko im Hinblick auf die lösungsspezifische Umsetzbarkeit einer Produktfunktion darstellt. Da jedoch ebenso die *Stakeholder-Zentrierung* den Erfolg einer Produktfunktion in einem Produkt entscheidend beeinflusst (Lüthje, 2007), wird das *Marktrisiko* (implizit) ebenfalls im nachfolgenden Konzept berücksichtigt. Für die Risikobetrachtung sind neben den Variationsarten der PGE im Systemkontext (vgl. Abschnitt 5.1.3) die Herkunft und Reife eines RSE bedeutende Charakteristika. Spezifische Ursachen der Schlüsselfaktoren sind jedoch für das Ziel der Instanz irrelevant und können

daher vernachlässigt werden. Darüber hinaus sind in der Modellinstanz zur Risikoabschätzung die beiden Arten von Unsicherheit, *mangelnde Definition* und *mangelndes Wissen* (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) sowie die *zentrale Entwicklungsaktivität der Validierung* (vgl. Abschnitt 2.3.3), berücksichtigt. Die Modellinstanz ist in Abbildung D.13 veranschaulicht. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

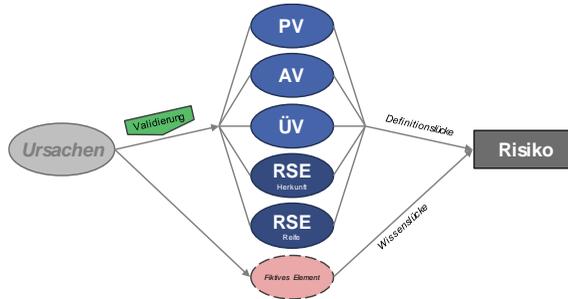


Abbildung D.13: Modellbeispiel zur Ableitung der Risikoabschätzung (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021, S. 6)

Das im Folgenden detaillierte Vorgehen gilt dabei nicht nur für Funktionsideen oder Produktfunktionen, sondern kann gleichermaßen für alle Arten von Funktionen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird nachfolgend in den Erläuterungen nur noch generisch von „Funktion“ gesprochen. Da die Variationsart sowie Reife und Herkunft des RSE spezifizierten Elementen (hier Eigenschaften und physischen Elementen einer Funktion) zugeordnet werden, können ihre *zugrundeliegende Unsicherheit* (falls vorhanden) und ein daraus resultierendes Risiko durch einen *Mangel an Definition* (Definitionslücke) charakterisiert werden. Unsicherheit & Risiko aufgrund von *Wissenslücken* können jedoch keinem spezifizierten Element zugeordnet werden, da es eine nicht vorhandene Spezifikation charakterisiert. Dementsprechend ist es erforderlich, ein hypothetisches „*fiktives Element*“ zur Berücksichtigung von mangelndem Wissen einzuführen. Die Aktivität der *Validierung* ist ferner zu berücksichtigen, da sie die Unsicherheit bei bestehenden, spezifizierten Elementen reduzieren kann und somit das Risiko verringert. Hierbei muss die Validierung die Übereinstimmung der Funktionsziele mit der Spezifikation der Funktion sicherstellen und beeinflusst daher den Weg zwischen den Ursachen und Schlüsselfaktoren. Ausgehend von der vorgestellten Modellinstanz, werden *Risikoparameter* abgeleitet und über *mathematische Formeln* zur *Berechnung des technischen Entwicklungsrisikos* einer Funktion in Beziehung gesetzt. Um eine mathematische Modellierung zur Quantifizierung des technischen Entwicklungsrisikos ableiten zu können, ist es zunächst erforderlich, relevante Parameter zu definieren, die die Höhe des Risikos beeinflussen. Dabei stützt sich die Definition zur Risikoabschätzung auf die Modellinstanz in Abbildung D.13. Dementsprechend setzen sich die betrachteten Risikoparameter aus *Variation*, *Herkunft des RSE*, *Reife des RSE*, *Validierung* und *Mangelndes Wissen* zusammen. Die Übersicht in Tabelle D.1 listet die fünf Parameter zusammen mit einem universellen Vorschlag für die Werte jedes Parameters sowie ihren jeweiligen qualitativen Risikoeinfluss auf. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Tabelle D.1: Definierte Risikoparameter zur Bewertung des Risikoeinflusses (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021, S. 7)

Nr.	Risiko Parameter	Beschreibung	Ausprägungen	Risiko-einfluss
1)	Variation	Variationsart des betrachteten Referenzsystem-Elements hinsichtlich des verknüpften, spezifizierten Elements der neuen Produktfunktion	Übernahmevariation	=
			Ausprägungsvariation	+
			Prinzipvariation	++
2)	Herkunft des RSE	Herkunftsorganisation des betrachteten Referenzsystem-Elements im Verhältnis zur entwickelnden Organisation	Selbe Organisation	=
			Andere Organisation, selbe Branche	+
			Andere Organisation, andere Branche	++
3)	Reife des RSE	Reifegrad des betrachteten Referenzsystem-Elements	Marktreife	=
			Entwicklungsreife	+
			Forschungsreife	++
4)	Validierung	Urteil, ob Validierung eines spezifizierten und verknüpften Element durchgeführt wurde und wenn ja, mit welcher Wiedergabetreue von Produktmodell und Anwendungsfall	Validiert, (nahezu) volle Wiedergabetreue	max -
			Validiert, hohe Wiedergabetreue (Testing mit phys. Prototypen)	-- --
			Validiert, mittlere Wiedergabetreue (Simulation mit virtuellen Prototypen)	--
			Validiert, geringe Wiedergabetreue (Expertenwissen)	-
			Nicht validiert	=
5)	Mangelndes Wissen	Fiktives Element zur Bündelung aller unbekannter (noch) nicht spezifizierter Elemente der neuen Produktfunktion	- Ausblick: Wahrscheinlichkeiten von fiktiven Elementen vorhersagen	max +

Risikoeinfluss – Legende:

+ Risiko erhöhend | = Risikoneutral | – Risiko verringern

Der erste Risikoparameter „*Variation*“ stützt sich auf die drei generischen Variationsarten im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.1.3) und berücksichtigt das zunehmende Risiko von Übernahme- über Ausprägungs- hin zur Prinzipvariation. Dies ist auf eine Abnahme der verfügbaren Informationen und Erfahrungen zurückzuführen (Albers, Rapp, Birk et al., 2017; Albers, Bursac & Rapp, 2017; Klingler, 2017). Der zweite Risikoparameter „*Herkunft des RSE*“ berücksichtigt den risikooptimalen Wert, wenn die Ursprungsorganisation des RSE und die Entwicklungsorganisation der betrachteten Funktion identisch sind (unter der Annahme einer homogenen Wissensverbreitung innerhalb der Organisation eines Anbieters). Im Falle unterschiedlicher Organisationen erhöht eine geringere Verfügbarkeit von Wissen (z.B. in Bezug auf Ziele und Erfahrung) das Risiko (Albers, Haug, Heitger et al., 2016; Albers, Rapp, Birk et al., 2017). Darüber hinaus ist aufgrund der unterschiedlichen Übertragbarkeit von Wissen auch die Unterscheidung identischer und unterschiedlicher Branchen bei unterschiedlichen Organisationen relevant (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). In Bezug auf den dritten Parameter „*Reife des RSE*“ wurde eine vereinfachte Klassifizierung des etablierten *Technology Readiness Index* (TRI, vgl. Anhang A.2.1) für die Definition der Werte gewählt. Eine Erhöhung des neunstufigen TRI impliziert eine wachsende Reife, während Risiko und Unsicherheit analog dazu sinken. Hinsichtlich der Kategorisierung entspricht die *Forschungsreife* der Grundlagenforschung ohne ein spezifisches Anwendungsziel (TRI 1-2). Die *Entwicklungsreife* unterscheidet sich, da die Entwicklung nun auf ein spezifisches Produkt oder eine spezifische Funktion und eine spezifische Anwendung ausgerichtet ist (TRI 3-8). Schließlich bezieht sich die *Marktreife* auf eine voll entwickelte und validierte Technologie oder Funktionalität entsprechend ihrer vorgesehenen Anwendung

(TRI 9). Hinsichtlich des qualitativen Risikoeinflusses wird für jeden der drei bisher beschriebenen Parameter der risikooptimale Wert als risikoneutral definiert. Dies bedeutet, dass der Parameter das berechnete Risiko, wie es sich aus anderen Parametern ableitet, in der Berechnung weder erhöht noch verringert. Allerdings erhöhen andere (nicht risiko-optimale) Werte das berechnete Risiko zunehmend. Durch die Wahl dieser Skalierung für diese Parameter wird das abgeleitete Risiko absichtlich als Obergrenze modelliert. Aufgrund seiner Schlüsselrolle bei der Wissensgenerierung wird der vierte Parameter „Validierung“ als risikoreduzierend modelliert. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Aussagekraft aufgrund der *Wiedergabetreue* übernimmt diese Forschungsarbeit einen einfachen Ansatz von Kandt, Pickshaus, Fleischer et al. (2016), indem sie die abnehmende Unsicherheit von Expertenwissen über Simulationsmethoden bis hin zu physischen Tests definiert. Darüber hinaus geht das vorliegende Modell für den optimalen Fall einer Validierung mit voller Wiedergabetreue (oder nur geringfügiger und irrelevanter Fehlertreue) von einer maximalen Risikominderung aus, was bedeutet, dass das Risiko des validierten Elements gleich Null ist. Über den fünften und letzten Risikoparameter wird „*Mangelndes Wissen*“ berücksichtigt. Aufgrund des Fehlens spezifizierter Elemente, die diesem Parameter zugeschrieben werden können, führt das Modell die zuvor beschriebenen „*fiktiven Elemente*“ ein. Falls vorhanden, kann das Ausmaß der fiktiven Elemente aus einer Referenz-Systemstruktur bzw. -Funktionsstruktur abgeleitet werden, welche die logische Architektur eines Systems (hier Fokus Funktion) generisch definiert (z.B. basierend auf der vorherigen Generation einer Produktfunktion). Das vorliegende Modell geht von einer maximalen Zunahme des Risikos für ein fiktives Element aus, wie es durch das Fehlen von Wissen impliziert wird. Dementsprechend korrespondiert ein fiktives Element mit der Obergrenze der Risikoskala (wie für eine spezifische Anwendung definiert). Dieses Risiko kann durch die Generierung und Explizieren von Wissen im Hinblick auf die Spezifizierung von Elementen der neuen Funktion mit Hilfe von RSE und Variation verringert werden. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Um die Risikoparameter einer bestimmten Produktspezifikation zuzuordnen und die Risikoberechnung zu ermöglichen, muss zunächst die zugrundeliegende generische Spezifikation definiert werden. Dabei berücksichtigt die Spezifikationsstruktur sowohl die in Entwicklung befindliche Funktion Fkt_n als auch das Referenzsystem R_n (vgl. Abbildung D.14). Außerdem werden die spezifizierten Elemente nach der Eigenschafts-, Funktions- und physischen Sicht auf Basis des generischen Referenz-Produktmodells im Modell der PGE (vgl. Abschnitt 5.2) differenziert und in Beziehung gesetzt. Durch die abgebildete Wechselbeziehung der Funktion zwischen Eigenschaften und physischen Elementen wird dem Ziel Rechnung getragen, sowohl technisches Risiko als auch Marktrisiko zu berücksichtigen. Im weiteren Verlauf der Risikomodellierung wird eine einzelne Funktion mit einer bestimmten, angestrebten Ausprägung mit der zugehörigen, beliebigen Anzahl von lösungsoffenen Eigenschaften und lösungsspezifischen, physischen Elementen betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass jedes der spezifizierten Elemente von Fkt_n , die sowohl beabsichtigte Ziele als auch entwickelte Objekte darstellen können, auf mindestens einem RSE von R_n basiert. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

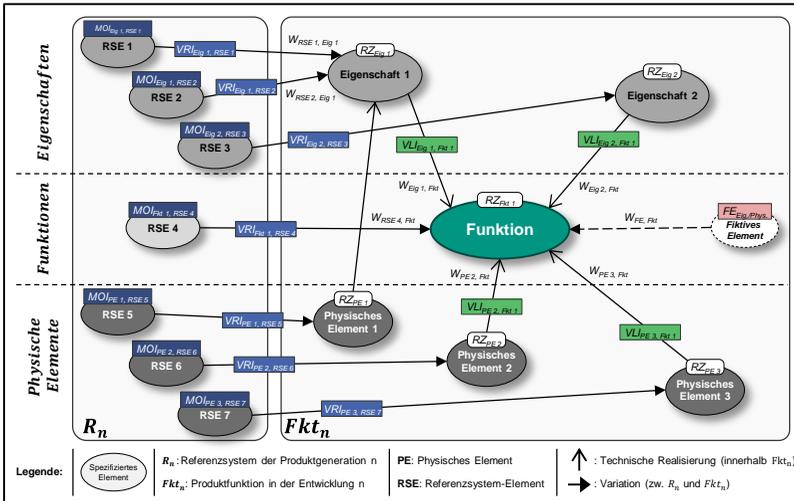


Abbildung D.14: Darstellung zur mathematischen Formulierung der Risikoberechnung einer (Produkt-)Funktion in der Produktspezifikation in Anlehnung an Albers, Rapp, Hirschter et al. (2021, S. 8)

Nach der Definition der generischen Struktur einer Produktspezifikation können die zuvor ermittelten Risikoparameter ebendieser Struktur zugeordnet werden (vgl. Abbildung D.14). Der erste Parameter der Variation wird den Pfaden zwischen den Elementen in Fkt_n und R_n zugeordnet. Die Parameter Herkunft und Reife der RSE können jedem spezifizierten RSE zugeordnet werden. Der Parameter der Validierung bezieht sich auf Beziehungen zwischen einer Stakeholder-relevanten Funktion und ihrer lösungsoffenen Eigenschaften sowie lösungsspezifischen, physischen Elemente. Somit wird dieser Parameter den vorgelagerten Pfaden zwischen physischen Elementen, Funktion und Eigenschaften zugeordnet (implizit unter der Annahme, dass die spezifizierte Eigenschaft entsprechend den Bedürfnissen der Stakeholder validiert wird). Schließlich erfordert der Parameter „Mangelndes Wissen“ die Einführung eines zusätzlichen, *fiktiven Elements*, das alle fehlenden Eigenschaften und physischen Elemente der Funktion aggregiert (vgl. Abbildung D.14).

Zum Abschluss der Abschätzung des Entwicklungsrisikos zeigt Abbildung D.15 die mathematischen Formeln, welche die zuvor gezeigten, grafischen Darstellungen abbilden. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Parameter:

- $MOI_{x,y}$: Reife/Herkunft (*engl.* maturity/origin) Index von RSE y für Element x
- $VRI_{x,y}$: Variationsindex von RSE y für Element x
- $VLI_{x,y}$: Validierungsindex vom Pfad zwischen Elementen x und y
- FE_x : Fiktives Element für Element x
- $W_{x,y}$: Gewicht (*engl.* weight) vom Pfad zwischen Elementen x und y;
 $\sum_y W_{x,y} = 1 \forall x$

Risikofaktor einer Eigenschaft i:

$$RF_{Eig\ i} = \sum_{RSE\ l} \frac{W_{i,l}}{MOI_{i,l} * VR_{i,l}}$$

Risikofaktor einer Funktion j:

$$RF_{Fkt\ j} = \sum_{RSE\ l} * \frac{W_{j,l}}{MOI_{j,l} * VR_{j,l}} * \left(\sum_{Adj,\ Prop,\ i} RF_i * W_{i,j} * VLI_{i,j} + \sum_{Adj,\ PE\ k} RF_k * W_{k,j} * VLI_{k,j} + W_{j,FE} * FE_j \right)$$

Risikofaktor eines physischen Elements k:

$$RF_{PE\ k} = \sum_{RSE\ l} \frac{W_{k,l}}{MOI_{k,l} * VR_{k,l}}$$

Abbildung D.15: Formeln und Parameter zur Berechnung der Risikozahl einer (Produkt-)Funktion in Anlehnung an Albers, Rapp, Hirschter et al. (2021, S. 8)

Die *Formeln* aus Abbildung D.15 ermöglichen die *quantifizierte Berechnung des Risikos*. Wie dargestellt, wird das Risiko zur Realisierung einer angestrebten Funktion mit einer bestimmten Ausprägung aus dem Risiko angrenzender Eigenschaften und physischen Elementen sowie einem fiktiven Element (bei fehlender technischer Spezifikation) berechnet. RSE innerhalb des Referenzsystems R_n dienen als Grundlage für jedes spezifiziert Element der neuen Produktfunktion Fkt_n . Wenn mehrere RSE mit einem spezifizierten Element verbunden sind, werden ihre jeweiligen Risikoauswirkungen durch Gewichtung entsprechend ihrer relativen Bedeutung gewertet. Analog dazu werden innerhalb von Fkt_n alle an ein bestimmtes Element angrenzenden Elemente gewichtet, einschließlich eines (potenziellen) fiktiven Elements. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Die Anwendung des Risikomodells in Produktentwicklungsprozessen kann systematisch Risikotreiber identifizieren und zudem Entwicklungsaktivitäten zum Explizieren der Spezifikation auslösen, die einer Risikoreduzierung dienlich sind. Der berechnete Risikofaktor der betrachteten Funktion (oder eines anderen, spezifizierten Elements) kann in einem zeitlichen Kontext interpretiert und geplant werden. Zum Projektstart der Generierung von Funktionsidee(n) kann der Reifegrad (i.S.v. Risikofaktor der zukünftigen Produktfunktion) einen sehr hohen Wert annehmen (aufgrund Definitions- und Wissenslücken). Bei der Bewertung der Risikoparameter zur Anwendung der Formel dient die Übersicht in Tabelle D.1 als Ausgangspunkt zur Festlegung der Werte durch den Produktentwickelnden. Beim Durchlaufen der Analyse-/Syntheseschritte gemäß dem generischen Referenz-Produktmodell (vgl. Abschnitt 5.2) sinkt der Risikofaktor durch die entsprechenden Entwicklungsaktivitäten des Spezifizierens. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

Zusammenfassend unterstützt das Risikomodell auf diese Weise den Produktentwickelnden bei der Reifegradverfolgung (z.B. die Veranschaulichung der Projektreife über die Zeit), dem Vergleichen des berechneten Wertes mit zuvor definierten Zielwerten und, im Falle der Überschreitung des Ziels, der frühzeitigen Einleitung von Gegenmaßnahmen (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021). Entsprechend der tendenziellen Zuweisung der qualitativen Beeinflussung der Risikoparameter wurden für die Berechnung des Entwicklungsrisikos quantitative, zahlenmäßige Ausprägungen zugewiesen, sodass sich ein Wertebereich des Risikofaktors einer Funktion zwischen Null (kein Risiko) und Zehn (maximales Risiko) ergibt. (Albers, Rapp, Hirschter et al., 2021; Hirschter, vsl. 2023)

1.3.4 – Priorisierung der Funktionsidee(n) zur Maximierung des Nutzenbündels zur identifizierten Bedürfnissituation

Im letzten Schritt der Subphase 1.3 werden die erarbeiteten Informationen über ein *Priorisierungsmodell* zusammengetragen und verknüpft. Die Priorisierung der Funktionsidee(n) ermöglicht die Bildung einer Rangfolge ebendieser zur Maximierung des Nutzenbündels zu der in Subphase 1.1 identifizierten Bedürfnissituation. Aus diesem Grund wird die *Weighted Shortest Job First (WSJF) Methode* aus dem *Scaled Agile Framework (SAFe)* verwendet (vgl. Scaled Agile (n.d.)). Die WSJF-Methode (vgl. Leffingwell (2011)) wird im SAFe dazu verwendet, Entwicklungsaufgaben (*engl. jobs*) zu sequenzieren, um einen maximalen, wirtschaftlichen Nutzen zu erzielen. Dabei werden in der Anwendung die *Kosten der Verzögerung* (*engl. cost of delay* – Wert der Wichtigkeit aus Stakeholder-Sicht) bzw. *Opportunitätskosten* durch die *Größe der Entwicklungsaufgabe* (*engl. job size*) geteilt. *Priorisierungs-Workshops mit Experten* verschiedener Disziplinen und Domänen schaffen dabei Fakten für eine erste, einheitliche und übergreifende Priorisierung für die anschließende Rangfolge der Entwicklungsaufgaben (vgl. Leffingwell (2011)). Die Übertragung der WSJF-Methode auf die Priorisierung von Funktionsidee(n) ist in Abbildung D.16 dargestellt.



Abbildung D.16: Anwendung der Weighted Shortest Job First (WSJF) Formel zur Priorisierung von Funktionsidee(n)

In der Anwendung der WSJF-Formel auf die Priorisierung von Funktionsidee(n) können der Dividend „Kosten der Verzögerung“ als Summe aus Markt- und Entwicklungspotenzial (ergo Innovationspotenzial) sowie der zeitlichen Kritikalität der Variation von initiiierenden und beeinflussten Produkteigenschaften der Funktionsidee verstanden werden. Der Divisor „Größe des Entwicklungsauftrags“ der Formel berechnet sich aus der Summe des Entwicklungsaufwands und -risikos. In Abbildung D.16 ist ebenso dargestellt, in welcher der vorangehenden Subphasen die Größen bereits ermittelt wurden. Zur Vermeidung von Beeinflussung durch unterschiedliche Größen und Einheiten werden die Werte auf das Einheitsintervall $[1, 10]$ normiert – mit Ausnahme des Entwicklungsrisikos, das, wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, in einem Intervall zwischen $[0, 10]$ berechnet wird. Die WSJF-Methode schlägt vor, dass qualitative Bewertungen oder Prognosen wie bspw. Marktpotenzial, Entwicklungspotenzial und -aufwand nach dem Konsent-Prinzip getroffen werden. Das heißt, ein Wert wird bspw. in einem Priorisierungs-Workshop erst dann festgelegt, wenn nichts mehr dagegenspricht und kein expliziter Einwand besteht. Ergebnis der Priorisierung ist eine Rangfolge der Funktionsideen anhand eines Wertes der WSJF-Formel, die eine gleichberechtigte Maximierung des Nutzenbündels (Kunde, Anwender und Anbieter) widerspiegelt. Sofern ein Anbieter im Rahmen der Priorisierung die Einflüsse unterschiedlich berücksichtigen möchte, so können die einzelnen Faktoren in der Formel nach Bedarf gewichtet werden.

Subphase 1.4: Entscheidung über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation

Im Zuge von „Entscheiden und Umsetzen“ sowie „Nachbereiten und Lernen“ wurde in dieser Subphase die Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation vorgenommen.

1.4.1 – Aufbereitung der Ergebnisse zur finalen Entscheidung über die weitere funktionale Spezifikation der ausgewählten Funktionsidee

In Vorbereitung auf die finale Entscheidung, welche der generierten und priorisierten Funktionsideen umgesetzt werden sollen, muss das in den vorangehenden Phasen generierte Wissen gemanagt werden. Zu diesem Zweck können die Arbeitsergebnisse und Artefakte in einer Funktionsideen-Spezifikation transparent und übersichtlich zusammengeführt werden (vgl. Abbildung D.17).

Die Funktionsideen-Spezifikation gliedert sich in die drei Kapitel Funktionsbeschreibung (1), Projektmanagement (2) und Funktionsanforderungen (3). Darin sind u.a. die Informationen aus dem Funktionsideensteckbrief (vgl. Abbildung D.10) der priorisierten Funktionsidee(n) verknüpft. Neben der Beschreibung sind alle relevanten Informationen zum Managen des Funktionsprojektes wie bspw. Verantwortlichkeiten, anvisierte Markteinführung und Verknüpfung zu Produktgenerationen im Produktportfolio vereint. Im Kapitel der Funktionsanforderungen sind insbesondere Kunden- und Anwendernutzen, aber auch bspw. das angestrebte Entwicklungspotenzial der zu spezifizierenden Produktfunktion expliziert.

Funktionsideen-Spezifikation			
Funktionsidee	Markteinführung	Fachbereich	Verantwortlicher
Bezeichnung	MM/JJJJ	Exxx	Name, Vorname
Kapitelstruktur			
1. Funktionsbeschreibung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bezeichnung der priorisierten Funktionsidee ▪ Beschreibung der priorisierten Funktionsidee ▪ Mögliche Angebotskonzepte und Marktpotenzial ▪ Technologische Prämissen und Entwicklungsaufwand ▪ [...] 		
2. Projektmanagement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verantwortlichkeiten ▪ Anvisierte Markteinführung bzw. Beginn der Umsetzung (Zeitkritikalität) ▪ Ablauf der Spezifikation der Produktfunktion ▪ Maßnahmen zur Reduzierung des Entwicklungsrisiko der Funktionsidee ▪ [...] 		
3. Funktionsanforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kunden-/Anwendernutzen: (Produkt-)Profilpotenzial, Inventionspotenzial ▪ Mögliche Use Cases ▪ Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen ▪ [...] 		

Abbildung D.17: Funktionsideen-Spezifikation (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019) – Darstellung in Anlehnung an Kamp (2019, S. 65)⁹⁹

In der Entwicklungspraxis hat es sich bewährt, den Produktentwickelnden in dieser Phase mit *Leitfragen* zur Befüllung bzw. Erstellung der Funktionsideen-Spezifikation zu unterstützen, damit sichergestellt wird, dass an alles gedacht wird. Auf diese Weise wird verhindert, dass einerseits generiertes Wissen verloren geht und andererseits eine sachkundige und erkenntnisreiche Entscheidung über die weitere, funktionale Spezifikation getroffen werden kann. (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019)

1.4.2 – Festlegung der zu spezifizierenden Produktfunktion(en)

In diesem Schritt wird die *Entscheidung über die anschließend zu spezifizierenden Produktfunktion(en)* getroffen. In der Entwicklungspraxis geschieht dies oftmals auf Managementebene oder sogar in Vorstandsgremien. Das jeweilige Vorgehen muss hierbei an die Organisations- und Gremienstruktur des Anbieters angepasst werden. Eine wichtige Aufgabe in dieser Phase ist zudem die *Dokumentation der getroffenen Entscheidung*. Dazu werden die in der Folge zu spezifizierenden Produktfunktionen in der *Produktfunktions-Roadmap* (vgl. Abschnitt 5.3.3.1 – Subphase 1.1.4 sowie Abbildung D.8) dokumentiert und ggf. an dieser Stelle bereits zur Implementierung in Produktgenerationen des Produktportfolios vorgehalten. Für die zur funktionalen Spezifikation festgelegten Produktfunktionen wird an dieser Stelle Phase 2 des Referenzprozesses initiiert (vgl. Abschnitt 5.3.4).

⁹⁹ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

1.4.3 – Reflexion des bisherigen Problemlösungsprozesses und ggf. Erfassung der Erkenntnisse für zukünftige Prozesse im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP)

Der abschließende Schritt der ersten Phase des Referenzprozesses ist keineswegs belanglos, sondern ganz im Gegenteil von essenzieller Bedeutung. Ziel ist es, den bisherigen Problemlösungsprozess zur Generierung und Priorisierung von Funktionsideen an dieser Stelle noch einmal kritisch zu reflektieren, um so aus den Erfahrungen der Problembearbeitung und -lösung zu lernen. Diese Erkenntnisse können im Sinne eines *kontinuierlichen Verbesserungsprozesses* (KVP) Grundlagenwissen und optimierte Vorgehensweisen für zukünftiges Durchlaufen der ersten Phase festhalten. Konkret gilt es, Funktionsideen, die bisher nicht weiterverfolgt wurden, zu dokumentieren und bspw. in einem *Kontinuierlichen Ideen-Speicher* (KIS) des Anbieters zu fixieren. Gerade in Phasen der kreativen Lösungsfindung – wie bspw. Subphase 1.4 – kann bei erneutem Iterieren der Phase 1 daran angeknüpft werden.

D.3.5 Phase 2: Detaillierung der Spezifikation Produktfunktion

Subphase 2.1: Integration der Produktfunktion in funktionale(s) Produktkonzept(e)

Aufbauend auf einer generierten und priorisierten Funktionsidee aus Phase 1, wurden in der ersten Subphase 2.1 über Situationsanalyse und Problemeingrenzung die relevanten Produktgenerationen für die Produktfunktion eingegrenzt und deren funktionale Produktkonzepte spezifiziert.

2.1.1 – Identifikation der relevanten Produktgeneration(en) im Produktportfolio des Anbieters

Zu Beginn müssen/muss die relevante(n) Produktgeneration(en) im Produktportfolio des Anbieters identifiziert werden, in der oder denen die Produktfunktion zukünftig implementiert werden soll. Dies ist wichtig, um frühzeitig alle Anforderungen an die Produktfunktion, die aus verschiedenen Projekten herrühren, berücksichtigen zu können. Zu diesem Zweck wird an dieser Stelle die *Produktfunktions-Roadmap* (vgl. Abschnitt 5.3.3.1 – Subphase 1.1.4 sowie Abbildung D.8) verwendet, um die Produktfunktion dem Produktportfolio-Zyklusplan gegenüberzustellen. Dazu werden die Produktprofile der Produktgenerationen bspw. anhand deren Eigenschaftsprofilen hinsichtlich des Bedarfs der Produktfunktion zur Realisierung der angestrebten Ausprägung von Produkteigenschaften analysiert. Die *Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse* innerhalb der Produktfunktions-Roadmap ermöglicht somit eine zeitliche Eingrenzung der für eine neue Produktfunktion relevanten Produktgeneration(en) im Produktportfolio des Anbieters. Gleichmaßen kann an diesem Punkt eine Indikation für notwendige „funktionale“ Ausprägungsvariationen von bereits existierenden Generationen von Produktfunktionen – folglich deren Weiterentwicklung – identifiziert werden. Im Zuge dessen sind alle relevanten Produktgenerationen ermittelt, für die das funktionale Produktkonzept (vgl. Abschnitt 5.1.5.1) anschließend spezifiziert werden kann.

2.1.2 – Spezifikation der/des funktionalen Produktkonzept(s) durch Integration der betrachteten Produktfunktion

Ausgehend von den Erkenntnissen der *Produktprofilanalyse* (1) der relevanten Produktgenerationen im Produktportfolio, kann das *funktionale Produktkonzept* der jeweiligen Produktgenerationen *spezifiziert* werden (2) und anschließend das *funktionspezifische Zielsystem* der einzelnen Produktfunktionen (3) definiert werden (vgl. Subphase 2.2). Das Vorgehen ist in Abbildung D.18 dargestellt und ist nicht als streng sequenziell zu betrachten (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020).

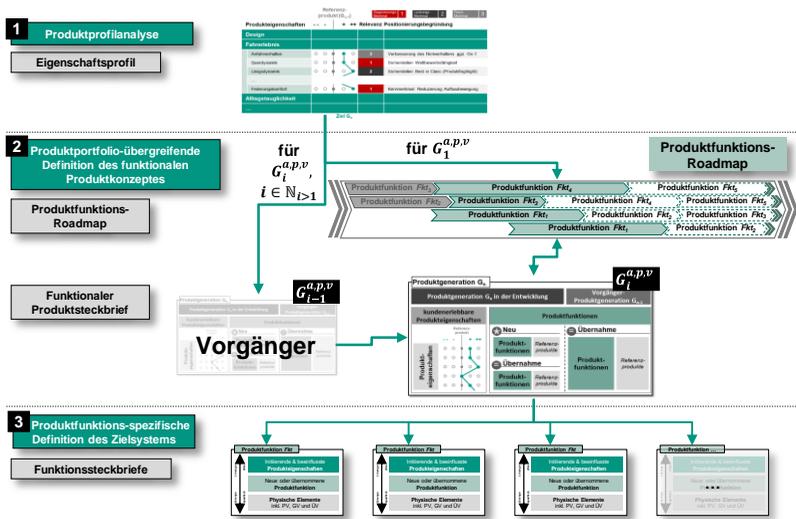


Abbildung D.18: Vorgehensmodell zur Spezifikation des funktionalen Produktkonzeptes einer Produktgeneration (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020, S. 672)

Die Differenzierung einer Produktgeneration im Eigenschaftsprofil (1) kann über Produktfunktionen oder ein ganzheitliches, funktionales Produktkonzept weiter konkretisiert werden (Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018). Die übergreifenden Wechselwirkungen der Menge aller Produktfunktionen beschreiben das funktionale Produktkonzept einer Produktgeneration $G_i^{a,p,v}$ (vgl. Definition 8) in der Frühen Phase im Modell der PGE. Das *funktionale Produktkonzept einer Produktgeneration* bildet dabei insbesondere die Kunden- und Anwendersicht ab, da Produktfunktionen die lösungsoffene Wirkbeziehung zwischen initierenden Ereignissen und resultierenden Ergebnissen beschreiben (vgl. Abschnitt 5.1.5.1 und 5.1.5.4). Aus Anbietersicht wird in der folgenden Subphase 2.2 das funktionspezifische Zielsystem der Produktfunktion lösungsspezifisch beschrieben. Der *funktionale Produkt-*

steckbrief (FPS) einer Produktgeneration $G_i^{a,p,v}$ (vgl. Abbildung D.19) unterstützt die Erarbeitung und lösungsoffene Beschreibung des funktionalen Produktkonzeptes auf der Basis der Variationsarten der Produktfunktionen und in Bezug zu deren lösungsspezifischen Referenzsystem-Elemente (RSE) – z.B. der Vorgänger-Produktgeneration $G_{i-1}^{a,p,v}$. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

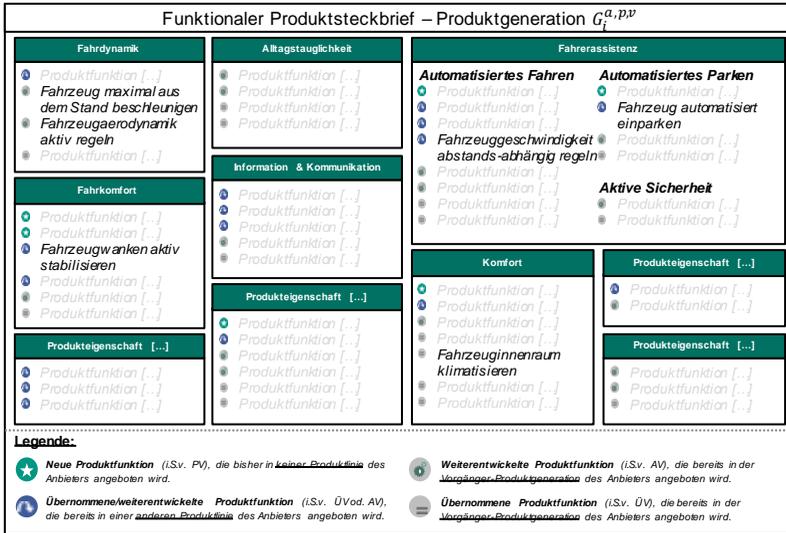


Abbildung D.19: Funktionaler Produktsteckbrief (FPS) basierend auf Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018, S. 12) und Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020, S. 672)

Der *Funktionale Produktsteckbrief* (FPS) unterstützt in der Frühen Phase die Identifikation von Zielkonflikten im Bezug zum Eigenschaftsprofil auf Basis von (*Innovations*-)Lücken oder *funktionaler Übererfüllung*. Daher sind die Produktfunktionen, wie in Abbildung D.19 dargestellt, jeweils ihrer initiierenden Produkteigenschaft zugeordnet bzw. dahingehend gruppiert. Darüber hinaus wird über die vier Symbole indiziert, über welche Variationsart die Produktfunktion in Bezug auf ein RSE in die neue Produktgeneration $G_i^{a,p,v}$ abgebildet wird. Neue Produktfunktionen (bspw. i.S.v. funktionaler Prinzipvariation (PV)) wurden bisher in keiner Produktlinie im Produktportfolio des Anbieters angeboten. Gleichwohl können Produktfunktionen über Übernahme- (ÜV) oder Ausprägungsvariation (AV) aus einer anderen Produktlinie übernommen oder weiterentwickelt werden. In Bezug zur direkten *Vorgänger-Produktgeneration* $G_{i-1}^{a,p,v}$ kann zwischen übernommenen (i.S.v. ÜV) und weiterentwickelten (i.S.v. AV) Produktfunktionen differenziert werden. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020; Hirschter, Heitger, Haug et al., 2018)

Im Hinblick auf das in Abbildung D.18 vorgestellte Vorgehen gibt es zwei Handlungsalternativen, in denen zwischen der *allerersten Generation einer Produktgeneration* $G_1^{a,p,v}$ und den Produktgenerationen $G_i^{a,p,v}$ für $i \in \mathbb{N}_{>1}$, die sich daran anschließen, unterschieden wird (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020).

Alternative 1: Spezifikation des funktionalen Produktkonzepts für $G_i^{a,p,v}$ für $i \in \mathbb{N}_{>1}$:

Sofern die betrachtete Produktgeneration $G_i^{a,p,v}$ nicht die erste Produktgeneration einer neuen Produktlinie $G_1^{a,p,v}$ bzw. Generation $i \neq 1$ darstellt, bildet das funktionale Produktkonzept der Vorgänger-Produktgeneration $G_{i-1}^{a,p,v}$ in der Entwicklungspraxis zunächst die Grundlage für die Spezifikation. Die definierten Variationsarten der Produkteigenschaften aus der Produktprofilanalyse (1) werden mit den anfangs übertragenen Produktfunktionen aus der Vorgänger-Produktgeneration $G_{i-1}^{a,p,v}$ verknüpft. In einem ersten Schritt können so überflüssig gewordene Produktfunktionen aus dem funktionalen Produktkonzept der betrachteten Produktgeneration $G_i^{a,p,v}$ entfernt werden, um eine funktionale Übererfüllung und damit unnötigen Entwicklungsaufwand zu vermeiden. Anschließend müssen die unzureichend adressierten Variationen von Produkteigenschaften im Eigenschaftsprofil über zusätzliche Produktfunktionen realisiert werden. Die Produktfunktions-Roadmap (vgl. Abbildung D.8) dient der Ableitung von Produktfunktionen aus anderen Produktlinien des Produktportfolios oder geplanten funktionalen AV oder PV in das funktionale Produktkonzept der Produktgeneration $G_i^{a,p,v}$. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Am Beispiel der Entwicklung einer neuen Nachfolge-Produktgeneration $G_{i+1}^{a,p,v}$ mit elektrischem Antriebsstrang und der damit verbundenen Prinzipvariation des „*Ladeverhaltens*“ aus Eigenschaftsicht gibt es zunächst keine Produktfunktionen des Vorgängers $G_{i-1}^{a,p,v}$, die solche Produkteigenschaften für den Kunden/Anwender realisieren können. Daher ist die Entwicklung neuer Produktfunktionen (bezogen auf die Referenz-Produktgeneration $G_{i-1}^{a,p,v}$) erforderlich. Bietet der Anbieter jedoch z.B. bereits ein Elektrofahrzeug in einer anderen Produktlinie am Markt an oder entwickelt er dieses, so sind Produktfunktionen wie z.B. das „*Fahrzeuggatterie zeitgesteuert laden*“ im zentralen, funktionalen Planungs- und Steuerungsinstrument – der *Produktfunktions-Roadmap* – verfügbar. Diese Produktfunktionen können von dort in das Produktgenerations-spezifische, funktionale Produktkonzept abgeleitet werden. Durch die Berücksichtigung weiterer, interner RSE des Anbieters wird die für die Produkteigenschaft „*Ladeverhalten*“ notwendige funktionale PV zu einer funktionalen AV oder sogar ÜV aus einer anderen Produkt- oder Entwicklungsgeneration des Produktportfolios. Das Referenzprodukt der Ausprägungs- oder Übernahmevariation ist in diesem Fall folglich nicht mehr der Vorgänger $G_{i-1}^{a,p,v}$, sondern die Produkt- oder Entwicklungsgeneration der Produktlinie, aus der es variiert wird. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Gibt es im Produktportfolio eines Anbieters weder auf dem Markt noch in der Entwicklung Produktfunktionen, um die im Eigenschaftsprofil spezifizierte Ausprägung „*autonomes Fahrverhalten*“ zu erreichen, können aus der Produktfunktions-Roadmap über die Phase 1 des

Referenzprozesses (vgl. Abschnitt 5.3.3) neue Funktionsidee(n) generiert werden, die bereits für zukünftige Produktgenerationen geplant sind. Sofern die Funktionsidee als PV noch in keiner Entwicklungs- oder Produktgeneration geplant wurde, ist in der Regel noch kein funktionsspezifisches Zielsystem ausgearbeitet worden. Diese funktionsspezifische Definition des Zielsystems folgt in Subphase 2.2. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Alternative 2: Spezifikation des funktionalen Produktkonzepts für $G_1^{a,p,v}$:

Unter der Annahme, dass eine *neue, erste Produktgeneration* $G_1^{a,p,v}$ einer neuen Produktlinie p mit ihren Varianten v entwickelt wird, hat diese Produktlinie per Definition keine direkte Vorgänger-Produktgeneration (vgl. Albers, Ebertz, Rapp et al. (2020)). Dementsprechend gibt es auch kein funktionales Produktkonzept von $G_{i-1}^{a,p,v}$ als Grundlage für die Verknüpfung mit den Variationsarten der Produkteigenschaften. Aus diesem Grund kann das funktionale Produktkonzept der ersten Produktgeneration $G_1^{a,p,v}$ direkt aus der Produktfunktions-Roadmap (vgl. Abbildung D.8) abgeleitet werden. Der Produktentwickelnde wählt aus dem gesamten Funktionsumfang des Produktportfolios diejenigen Produktfunktionen aus, die zu den geforderten Ausprägungen der Produkteigenschaften beitragen, bis alle Produkteigenschaften adäquat adressiert oder notwendige funktionale Neuentwicklungen (PV und AV existierende Generationen von Produktfunktionen) identifiziert sind. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Unabhängig davon, ob Alternative 1 oder 2 verwendet wird, muss ein Anbieter, der mehrere Produktlinien auf dem Markt anbietet, die funktionalen Produktkonzepte der einzelnen Produktlinien und Varianten einer Produktgeneration entsprechend definieren und differenzieren, damit sich die Produktgenerationen nicht gegenseitig kannibalisieren. (Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al., 2020)

Subphase 2.2: Definition des funktionsspezifischen Zielsystems

Im Kontext der alternativen Lösungssuche wurden in dieser Subphase zunächst Möglichkeiten der funktionalen Weiterentwicklung sowie ggf. Stilllegung ausgelotet. Komplettiert wurde dies durch eine Lösungsauswahl in Form der Definition funktionsspezifischer (Produkt-)Eigenschaften und physischen Elementen, die zur Realisierung der Produktfunktion notwendig sind.

2.2.1 – Suche nach alternativen Lösungen für die funktionale Weiterentwicklung in Generationen und ggf. Stilllegung der Produktfunktion

In Vorbereitung auf die Definition der lösungsoffenen (Produkt-)Eigenschaften sowie lösungsspezifischen, physischen Elemente im Zielsystem der Produktfunktion, wird an diesem Punkt zunächst nach *alternativen Lösungen* für eine *funktionale Weiterentwicklung* sowie ggf. *Stilllegung der Produktfunktion* gesucht. Dies erhöht die Transparenz über zukünftige Handlungsalternativen (bspw., um auf konkurrierende Anbieter und deren funk-

tionales Portfolio reagieren zu können) und dient der *strategischen Planung des Produktfunktions-Portfolios*. Die Ergebnisse dieser Subphase können daher direkt in der *Produktfunktions-Roadmap* dokumentiert werden.

Die notwendigen Aktivitäten zur Suche nach alternativen Lösungen für die funktionale Weiterentwicklung in Generationen und ggf. Stilllegung der Produktfunktion gestalten sich analog den Ausführungen in Subphase 1.2 – auf die an dieser Stelle verwiesen wird (vgl. Abschnitt 5.3.3.2 bzw. Anhang D.3.4).

2.2.2 – Vorauswahl der Lösungsalternativen für die funktionale Weiterentwicklung in Generationen und ggf. Stilllegung der Produktfunktion

Zur Eingrenzung des Lösungsraums können die Lösungsalternativen im Anschluss an die Generierung vorausgewählt werden, um die gesammelten Informationen an dieser Stelle zu verdichten. Das generierte Wissen und die getroffenen Entscheidungen können sowohl in der *Produktfunktions-Roadmap* als auch entsprechenden *Funktionsideensteckbriefen* (FISB) transparent dokumentiert werden.

Die erforderlichen Aktivitäten zur Vorauswahl der Lösungsalternativen für die funktionale Weiterentwicklung in Generationen und ggf. Stilllegung der Produktfunktion gestalten sich analog den Erläuterungen in Subphase 1.3 – auf die an dieser Stelle verwiesen wird (vgl. Abschnitt 5.3.3.3 bzw. Anhang D.3.4).

2.2.3 – Definition der funktionsspezifischen (Produkt-)Eigenschaften & 2.2.4 – Definition der funktionsspezifischen physischen Elemente zur Realisierung

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Spezifikation funktionaler Produktkonzepte der relevanten Produktgenerationen wird in diesem Schritt das *Zielsystem der Produktfunktion* (3) analog dem in Abbildung D.18 gezeigten Vorgehensmodell abschließend konkretisiert. Zunächst werden dabei die funktionsspezifischen (Produkt-)Eigenschaften der Produktfunktion lösungsoffen gesucht und definiert. Daran anknüpfend kann lösungsspezifisch nach den physischen Elementen der Realisierung gesucht und diese im funktionsspezifischen Zielsystem definiert werden. Da sich das Vorgehen der lösungsoffenen und lösungsspezifischen Definition im Sinne des *Mengenverständnisses im Modell der PGE* (vgl. Abschnitt 5.1.2) ähnelt, werden die zwei Subphasen im Text der vorliegenden Forschungsarbeit zur Vereinfachung zusammengefasst. Die notwendigen Aktivitäten zur *kreativen Lösungsfindung* sowohl in Bezug auf die lösungsoffenen (Produkt-)Eigenschaften als auch lösungsspezifischen, physischen Element gestalten sich analog den Erläuterungen in Subphase 1.2.2 und 1.2.3 – auf die hier verwiesen wird (vgl. Abschnitt 5.3.3.2 bzw. Anhang D.3.4).

Mit dem Ziel, das Zielsystem der Produktfunktion in seinen grundlegenden Elementen samt zugehörigen initiiierenden Ereignissen und resultierenden Ergebnissen zu definieren, werden die Informationen aus dem *Funktionsideensteckbrief* (FISB) (vgl. Abbildung D.10) als Grundlage genutzt. Die Elemente der Produktfunktionen werden unter Berücksichtigung der

Ziele, Anforderungen bzw. Produkteigenschaften und Randbedingungen relevanter Stakeholder analysiert und definiert. Die konkreten Lösungen sowie Vorhalte für mögliche Weiterentwicklungen oder ggf. Stilllegung können jeweils in einem *Funktionssteckbrief* (FSB) – wie in Abbildung D.20 dargestellt – beschrieben und strukturiert dokumentiert werden.

Produktfunktion	Generation	Funktionsverantwortlicher	Fachbereich	P_3^{II}	P_5^{II}	P_7^{II}	P_9^{II}	Realisierungsbeginn	1. Markteinführung	Ausblick Stilllegung	
				G_3	G_5	G_7	G_9				
Bezeichnung		Name, Vorname	FB	X		X	X	MMJJJJ	MMJJJJ	MMJJJJ	
Funktionsbeschreibung		Funktionale Referenzsystem-Elemente		Mögliche Weiterentwicklung							
* Beschreibung der Funktion aus Kundensicht		* Herkunft und Reife des RSE		* Ausblick auf Möglichkeiten der funktionalen Weiterentwicklung in Generationen bzw. Stilllegung							
Initiiierende Ereignisse		Resultierende Ergebnisse		Lösungsoffene Funktionsarchitektur							
Ein Ereignis ist eine beobachtbare Situation, die sich durch Dynamik oder Veränderung kennzeichnet und damit einer Zustandsänderung entspricht. Das Ereignis einer Produktfunktion wird durch den Kunden, Anwender, Anbieter, die Umwelt und/oder das Produkt initiiert oder beeinflusst (inkl. Produktwechsel).		Ein Ergebnis ist ein Ereignis, das die Auswirkung eines Systems definiert. Das Ergebnis einer Produktion realisiert das Verhalten der Produkteigenschaften, welches durch den Kunden oder Anwender wahrgenommen werden kann (inkl. Anzeigenschirm).									
Anforderungen		Initiiierende/beeinflusste Eigenschaften		Lösungsspezifische Funktionsarchitektur							
* an Funktion bzw. von Funktionen * inkl. Standards, Gesetze				* Verknüpfung mit technischen Funktionen zur Realisierung							
Validierung der Funktion durch ...											
* zu spezifizierende Entwicklungsgenerationen											
Physische Elemente											
* Physische Elemente (Hardware/Software) inkl. UX-Relevanz und Verlinkung zu Technische Produktbeschreibung (TPB) / Stückliste / [...]											
Relevant für Function-as-Demand <input type="checkbox"/>				Relevant für Connect-Verbund <input type="checkbox"/>				Realisierung in EE-Architektur A <input checked="" type="checkbox"/>		Realisierung in EE-Architektur C <input checked="" type="checkbox"/>	
Relevant für [...] <input checked="" type="checkbox"/>				Realisierung in EE-Architektur B <input type="checkbox"/>				Realisierung in [...] <input checked="" type="checkbox"/>			

Abbildung D.20: Funktionssteckbrief (FSB) einer Produktfunktion basierend auf Hirschter, Heitger, Haug et al. (2018, S. 13) und Albers, Fahl, Hirschter, Endl et al. (2020, S. 672)

Der in Abbildung D.20 schematisch dargestellte (*generationsspezifischer*) *Funktionssteckbrief* (FSB) baut auf Struktur und Inhalt des *Funktionsideensteckbrief* (FISB) auf und erweitert diesen. Die übergreifenden Informationen werden in der Kopfzeile um eine *Konkretisierung der Generation der Produktfunktion* sowie den *Realisierungsbeginn* und *zeitlichen Ausblick auf die Stilllegung* erweitert. Gemäß dem *Produktfunktions-Modell* (vgl. Abschnitt 5.1.5.4) werden unterhalb von *Funktionsbeschreibung* und den *funktionalen Referenzsystem-Elementen* (RSE, inkl. Herkunft und Reife) die *initiiierenden Ereignisse* und *resultierenden Ergebnisse* detailliert. Anknüpfend daran werden *Anforderungen* an die Produktfunktion oder deren funktionaler Schnittstellen sowie die *initiiierenden und beeinflussten (Produkt-)Eigenschaften* der Produktfunktion dokumentiert. Der Funktionssteckbrief hält zudem Raum für die *lösungsoffene und lösungsspezifische Funktionsarchitektur* vor, die in der nächsten Subphase 2.3 konkretisiert und modelliert wird. Analog können die zu spezifizierenden *Entwicklungsgenerationen*, über die eine Produktfunktion *validiert* werden soll, aufgeführt werden. Die Planung und Festlegung erfolgt in der übernächsten Subphase 2.4. Zu guter Letzt werden die notwendigen, *physischen Elemente*, die es zur Realisierung der Produktfunktion

bedarf, über eine Verknüpfung zu bspw. technischen Produktbeschreibungen oder Stücklisten abgebildet. Unterhalb ist Platz für projektspezifische Informationen wie bspw. *Relevanz der Produktfunktion* für „Function-on-Demand“ (Weissler, 2018) oder Verlinkung zu technischen Prämissen wie bspw. bestimmte E/E-Architekturen. Damit stellt der Funktionssteckbrief (vgl. Abbildung D.20) schlussendlich – analog zur Produktspezifikation – die technische Lösung dar, die Informationen zu verwendeten Technologien sowie deren Neu- und Übernahmeanteilen enthält. Damit wird eine valide Bewertung der zu entwickelnden Produktfunktion hinsichtlich der relevanten Parameter (z.B. Eigenschaftserfüllung) sowie des technischen und ökonomischen Risikos (vgl. Subphase 1.3) ermöglicht. Wie angesprochen liegen zu diesem Zeitpunkt im Referenzprozess noch nicht alle Informationen zur vollständigen Befüllung des Funktionssteckbriefs vor, diese werden teilweise in der nächsten Subphase 2.3 erarbeitet und können kontinuierlich eingepflegt werden.

Subphase 2.3: Modellierung der Produktfunktion

In dieser Subphase wurde über eine Tragweitenanalyse die Produktfunktion und deren Wechselwirkungen modelliert und in die Produktmodelle der relevanten Produktgenerationen im Produktportfolio des Anbieters integriert.

2.3.1 – Verknüpfung der Produktfunktion mit initiierten und beeinflussten (Produkt-)Eigenschaften

Die komplexen Wirkketten einer Produktfunktion sind im Verlauf deren Spezifikation ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr über eindimensionale Dokumente, wie bspw. einen *Funktionssteckbrief* (vgl. Abbildung D.20), abbildbar. Während des Kreativ-Prozesses hilft der Funktionssteckbrief zwar Information strukturiert zu sammeln und Wissen zu generieren, stößt aber ab einer bestimmten Informationsmenge an seine Grenzen. An diesem Punkt empfiehlt es sich, die Produktfunktion und ihre Systemsichten-übergreifenden Schnittstellen zu modellieren. Dies umfasst folglich alle funktionspezifischen (Produkt-)Eigenschaften und physischen Elemente der Realisierung sowie die Sub- und/oder Haupt-/Nebenfunktionen der Produktfunktion. Das der angestrebten Modellierung zugrunde liegende Verständnis basiert dabei auf dem *generischen Referenz-Produktmodell* (vgl. Abschnitt 5.2) sowie dem in Abschnitt 5.1.5.4 eingeführten *Produktfunktions-Modell*. Erfahrungen aus der Entwicklungspraxis zeigen, dass – trotz eines initialen Zusatz- und Pflegeaufwandes – eine Modellierung der kontinuierlichen Validierung der Produktfunktion und einer Identifikation von übergreifenden Synergiepotenzialen zugutekommt. Darüber hinaus kann die Modellierung der Produktfunktion über diese Phase hinaus in Phasen von *funktionaler Weiterentwicklung* (Iteration der Phase 1 und/oder 2), der *Realisierung über Entwicklungsgenerationen* (bspw. Reifegradplanung und -bewertung, vgl. Phase 3) sowie der *möglichen Stilllegung* (vgl. Phase 4) genutzt werden. Die Umsetzung der Modellierung erfordert eine Tool-gestützte Spezifikation, da hierdurch eine Vielzahl an Elementen und deren Wechselwirkungen gesamthaft betrachtet werden. Zudem variieren die Systemelemente oftmals im Verlauf des Prozesses. Die Auswahl des Tools erfolgt in erster Linie auf Grundlage der vorhandenen und bereits eingeführten Tools des Anbieters. Nichtsdestotrotz empfiehlt es sich ausdrücklich, eine *Kompatibilität* mit dem Tool zu berücksichtigen, das für

die Modellierung der Produktgenerationen verwendet wird. Infolgedessen kann die funktionspezifische Modellierung mühelos in verschiedene Produktmodelle von Produktgenerationen im Portfolio des Anbieters integriert werden. Das Vorgehen wird in der Subphase 2.3.4 detailliert erläutert. Ein Beispiel der funktionspezifischen Modellierung über das Tool *Microsoft Power BI: Datenvisualisierung* wird im Rahmen der Evaluation in Abschnitt 6.2.4 dargestellt (vgl. Abbildung E.2).

In dieser Subphase wird die funktionspezifische Modellierung der Produktfunktion initialisiert, d.h., zunächst ein Produktfunktions-Modell im Tool angelegt. Weiterhin wird die Produktfunktion mit ihren initiierten und beeinflussten (Produkt-)Eigenschaften verknüpft. Wie in vorigen Phasen beschrieben, können hierzu *Referenz-Eigenschaftsstrukturen* (Produktgenerations-unabhängig, besser noch Produktportfolio-übergreifend) genutzt werden, die ins Tool importiert oder verlinkt werden. Damit wird sichergestellt, dass einerseits die *Integration in Produktgenerations-spezifische Produktmodelle* und andererseits die *Vergleichbarkeit und Rückverfolgbarkeit* (engl. traceability) der Produktfunktionen gewährleistet ist. In Zuge dessen kann das Modell der Produktfunktion ebenso mit der *Produktfunktions-Roadmap* (vgl. Abbildung D.8) verknüpft werden, sodass von dort aus direkt auf die (verfügbaren) Produktfunktions-Modelle zugegriffen werden kann.

2.3.2 – Konkretisierung der Wirkstruktur der Produktfunktion in technischen Funktionen

Im weiteren Fortgang der Modellierungsaktivität in Bezug auf die Produktfunktion gilt es, die *Wirkstruktur* ebendieser aufzugliedern. In diesem Fall wird die Produktfunktion anfangs gemäß den Beschreibungen in Abschnitt 5.1.5 und dem vorgestellten Produktfunktions-Modell (vgl. Abbildung 5.12) in ihre Sub- und/oder Haupt-/Neben-Produktfunktion gegliedert bzw. strukturiert. Dies bezieht sich zunächst nur auf die Ausprägung der Produktfunktion i.S.v. selbstähnlichen Produktfunktionen auf der gleichen oder anderen Systemebenen in der Funktionssicht. Im Zuge dessen werden ebenso die Schnittstellen zu weiteren Produktfunktionen modelliert. Der Produktentwickelnde kann in diesem Schritt durch die Erstellung von Wirkdiagrammen (wie in Abschnitt 4.4.4 durchgeführt) unterstützt werden, um die *Funktionsstruktur* der Produktfunktionen zu erarbeiten. Dabei ist es gerade bei *weiterzuentwickelnden* oder *stillszulegenden Produktfunktionen* möglich und explizit gefordert *Referenz-Funktionsstrukturen* (bspw. der Vorgänger- oder aktuellen Generation der Produktfunktion) zu verwenden.

Wie in Abschnitt 5.1.5 beschrieben, kann die explizierte Ausprägung der Produktfunktion (i.S.v. inhärenten Sub- und/oder Haupt-/Neben-Produktfunktionen) anschließend mit den realisierenden technischen Produktfunktionen verknüpft und modelliert werden. Analog der Verknüpfung der (Produkt-)Eigenschaften ist es ratsam, an diesem Punkt *Referenzstrukturen* der technischen Funktionen zu benutzen bzw. die existierenden Spezifikationen – bspw. in Form von Funktionslisten (vgl. Abschnitt 4.2.3) – mit dem Produktfunktions-Modell zu verknüpfen. Auf diese Weise kann über direkte Verlinkung sowohl die *Aktualität* als auch *Rückverfolgbarkeit* von *Änderungen* oder *Entscheidungen* im *Produktfunktions-Modell* berücksichtigt und gewährleistet werden.

2.3.3 – Verknüpfung der technischen Funktionen mit physischen Elementen

Die funktionspezifische Modellierung einer Produktfunktion wird mit der Vernetzung technischer Funktionen und deren *funktionsrealisierenden, physischen Elementen* abgeschlossen. In diesem Verknüpfungsschritt gilt es, gleichermaßen *Referenzstrukturen* der physischen Elemente zu benutzen oder die existierenden Spezifikationen (bspw. technische Produktbeschreibungen, Stücklisten, etc.) mit dem *Produktfunktions-Modell* zu verknüpfen. Analog den Spezifikationen technischer Funktionen wird dadurch die Aktualität und Rückverfolgbarkeit von Änderungen oder Entscheidungen in der funktionspezifischen Modellierung einer Produktfunktion unterstützt. An dieser Stelle ergibt sich zudem die Möglichkeit Ansätze, wie bspw. den *Erweiterten Target Weighing Ansatz* (ETWA) nach Albers, Revfi & Spadinger (2020), zur funktionsbasierten Entwicklung leichter Produkte zu nutzen, um Leichtbaupotenziale zu identifizieren und zu evaluieren.

2.3.4 – Integration der funktionspezifischen Modellierung in die Produktmodelle der relevanten Produktgeneration(en) im Produktportfolio des Anbieters

Anschließend an die funktionspezifische Modellierung der Produktfunktion ist der nächste erforderliche Schritt die *Integration* ebendieser in die *Produktmodelle der relevanten Produktgeneration(en)* im Produktportfolio des Anbieters. Zu diesem Zweck erfolgt eine Produktportfolio-übergreifende Modellierung anhand einer festgelegten Spezifikationsstruktur. Für die effiziente und effektive Entwicklung komplexer Produkte ist eine systematische und strukturierte *Produktspezifikation* essenziell. Der Stand der Forschung (vgl. Abschnitt 2.4) und die Bedarfsanalyse zur Spezifikation aus Funktionssicht (vgl. Abschnitt 4.3.2) haben dargelegt, dass das Modell der PGE sowie zusätzliche, identifizierte Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation dazu beitragen können, die *Aktivität des Spezifizierens zu systematisieren* und somit *Produktkomplexität beherrschbar* zu machen. Potenziale eines disziplinübergreifenden Verständnisses der Produktspezifikation und niedrigere Fehleranfälligkeit durch die Nutzung eines zentralen, visualisierten Systemmodells können durch den Entwicklungsansatz des *Model-Based Systems Engineering* (MBSE, vgl. Abschnitt 2.1.4.1) ausgeschöpft und realisiert werden. Die MBSE-Methoden kennzeichnen sich aktuell jedoch häufig durch eine geringe Anwendbarkeit in der Entwicklungspraxis und mangelnder Unterstützung zur Strukturierung des Produktmodells einer Produktgeneration. In dieser Subphase werden daher die *identifizierten Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation im Modell der PGE* in eine leicht und universell anwendbare *MBSE-Umgebung* integriert und somit als methodische Unterstützung für Entwicklungsprojekte und Produktentwickelnde zugänglich gemacht werden und erfolgt in zwei Schritten (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021):

- *Erstellung der Spezifikationsstruktur (1)* und
- *Überführung der Spezifikationsstruktur in eine MBSE-Umgebung (2)*

Die nachfolgende Spezifikationsstruktur (1) ist in Abbildung D.21 schematisch dargestellt und kann als strukturelle Grundlage für die Spezifikation eines komplexen Produkts dienen. Insgesamt verspricht die Spezifikationsstruktur die Bündelung der Chancen bestehender Ansätze sowie die Generierung neuartiger Synergien. (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021)

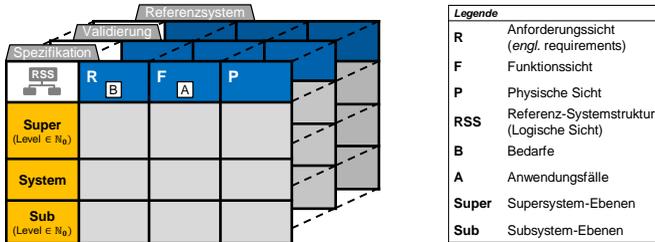


Abbildung D.21: Beispiel einer Spezifikationsstruktur komplexer Produkte in Model-Based Systems Engineering (MBSE) (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021, S. 2485)

Subphase 2.4: Planung der Realisierung und Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen

Im Rahmen von „Entscheiden und Umsetzen“ sowie „Nachbereiten und Lernen“ wurde in dieser Subphase die Realisierung der Produktfunktion geplant und die zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen festgelegt.

2.4.1 – Aufbereitung der Ergebnisse zur finalen Entscheidung über die Realisierung der Produktfunktion

Das in den vorangehenden Subphasen generierte Wissen muss in Vorbereitung auf die finale Entscheidung zur Realisierung der Produktfunktion gemanagt werden. Mit dieser Absicht können die Arbeitsergebnisse und Artefakte in einer *Produktfunktions-Spezifikation* transparent und übersichtlich zusammengeführt werden (vgl. Abbildung D.22). Die *Produktfunktions-Spezifikation* erweitert die *Funktionsideen-Spezifikation* (vgl. Abbildung D.17) um vier weitere Kapitel: *Lösungsoffene Funktionsarchitektur* (4), *Lösungsspezifische Funktionsarchitektur* (5), *Anforderungen an Funktionstests* (6) und *Funktionsfreigabe* (7). Darin sind die Informationen aus dem Funktionssteckbrief (vgl. Abbildung D.20) der Produktfunktion verknüpft, die in dieser Subphase erarbeitet wurden. Neben der Aktualisierung der drei ersten Kapitel aus der Funktionsideen-Spezifikation wird die lösungsoffene und lösungsspezifische Funktionsarchitektur, die in Subphase 2.3 durch die Modellierung der Produktfunktion erfolgte, verlinkt. Daran anknüpfend werden Anforderungen an durchzuführende Funktionstest sowie letztendlich die Funktionsfreigabe dokumentiert und festgeschrieben.

Der Produktentwickelnde kann in dieser Phase mit *Leitfragen zur Dokumentation* der einzelnen Kapitel unterstützt werden, damit sichergestellt wird, dass an alles gedacht wird. Dies hat sich in der Entwicklungspraxis bewährt. Demzufolge wird vermieden, dass einerseits generiertes Wissen verloren geht und andererseits eine sachkundige und erkenntnisreiche Entscheidung über die Realisierung der Produktfunktion getroffen werden kann. (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019)

Produktfunktions-Spezifikation			
Produktfunktion	Markteinführung	Fachbereich	Verantwortlicher
Bezeichnung	MM/JJJJ	Exxx	Name, Vorname
Kapitelstruktur			
1. Funktionsbeschreibung  <ul style="list-style-type: none"> • Bezeichnung der Produktfunktion • Beschreibung der Produktfunktion • Mögliche Angebotskonzepte und Marktpotenzial • Technologische Prämissen und Entwicklungsaufwand • [...] 	4. Lösungsoffene Funktionsarchitektur  <ul style="list-style-type: none"> • Logische Strukturierung der Produktfunktion in Teilfunktionen und Verknüpfung mit technischen Funktionen • Logische Schnittstellen an weitere Produktfunktionen • [...] 		
2. Projektmanagement  <ul style="list-style-type: none"> • Verantwortlichkeiten • Anvisierte Markteinführung bzw. Beginn der Umsetzung (Zeitkritikalität) • Ablauf der Realisierung der Produktfunktion • Maßnahmen zur Reduzierung des Entwicklungsrisiko der Produktfunktion • [...] 	5. Lösungsspezifische Funktionsarchitektur  <ul style="list-style-type: none"> • Definition der funktionsrealisierenden, physischen Elemente • Technische Anforderungen an Teilsysteme der Realisierung • [...] 		
3. Funktionsanforderungen  <ul style="list-style-type: none"> • Kunden-/Anwendernutzen: • Produktprofilpotenzial, Innovationspotenzial • Auslösende Ereignisse und resultierende Ergebnisse • Anzeige- und Bedienung • Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen • [...] 	6. Anforderungen an Funktionstests  <ul style="list-style-type: none"> • Definition Anzahl und Art (virtuell/gemischt/ physisch) Entwicklungsgenerationen • Erfüllungsnachweise • Virtuelle Erprobung • [...] 		
7. Funktionsfreigabe  <ul style="list-style-type: none"> • Freigabeanforderungen • [...] 			

Abbildung D.22: Produktfunktions-Spezifikation (Fahl, Hirschter, Kamp et al., 2019) – Darstellung in Anlehnung an Kamp (2019, S. 65)¹⁰⁰

2.4.2 – Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgeneration(en)

An diesem Punkt werden die *zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen zur Realisierung der Produktfunktion* festgelegt. Basierend auf den *Reifegradplänen* der Produktgenerationen im Produktportfolio, die sich in der Entwicklung befinden, werden die Entwicklungsgenerationen ausgewählt, deren inhaltlicher und prozessualer Soll-Reifegrad der Eigenschaften zu den Anforderungen an Test und Freigabe der Produktfunktion passt. In der Konsequenz werden so die Entwicklungsgenerationen im Produktportfolio des Anbieters ausgewählt, in denen die Produktfunktion als Eingangsgröße in die Spezifikation mit einfließen muss, um letztendlich die *Eigenschaftserfüllung der Produktfunktion zu validieren*. (Hirschter, vsl. 2023). In der Entwicklungspraxis werden Entscheidungen, wie bspw. die *Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen* einer Produktportfolio-übergreifenden Produktfunktion, oftmals auf Managementebene oder sogar in Vorstandsgremien getroffen. Daher muss das jeweilige Vorgehen an die Organisations- und Gremienstruktur des Anbieters angepasst werden. Eine wichtige Aufgabe in dieser Phase ist zudem die *Dokumentation der getroffenen Entscheidung*. Dazu werden die in der Folge zu realisierenden Produktfunktionen in der *Produktfunktions-Roadmap* (vgl. Abschnitt 5.3.3.1 – Subphase 1.1.4 sowie Abbildung D.8) dokumentiert und deren Implementierung in Produktgenerationen der zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen festgehalten. Für die zur Realisierung festgelegten Produktfunktionen wird an dieser Stelle *Phase 3 des Referenzprozesses* (vgl. Hirschter (vsl. 2023)) initiiert (vgl. Abschnitt 5.3.5).

¹⁰⁰ Unveröffentlichte, vom Autor Co-betreute Masterarbeit.

2.4.3 – Reflexion des bisherigen Problemlösungsprozesses und ggf. Erfassung der Erkenntnisse für zukünftige Prozesse im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP)

Der letzte und abschließende Schritt der zweiten Phase des Referenzprozesses ist nichtsdestominder von wesentlicher Bedeutung. Es gilt, den bisherigen Problemlösungsprozess zur Spezifikation der Produktfunktion an diesem Punkt noch einmal *kritisch zu reflektieren*, um so aus Erfahrungen der Problembearbeitung und -lösung zu lernen. Diese Erkenntnisse können im Sinne eines *kontinuierlichen Verbesserungsprozesses* (KVP) Vorgehensweisen für zukünftiges Durchlaufen der zweiten Phase optimieren und Wissen festhalten. Konkret gilt es, *aussichtsreiche (Teil-)Ergebnisse* sowie *Ideen der funktionalen Weiterentwicklung* oder *Stilllegung* zu dokumentieren und bspw. in einem *Kontinuierlichen Ideen-Speicher* (KIS) des Anbieters zu fixieren. Gerade in Phasen der *kreativen Lösungsfindung* – wie bspw. Subphase 2.2 – kann bei erneutem Iterieren der Phase 2 darauf aufgebaut werden.

D.3.6 Phase 4: Detaillierung der Realisierung Produktfunktion

Subphase 4.1: (Re-)Generierung und Priorisierung der Idee zur Stilllegung der Produktfunktion

Ausgelöst durch den Bedarf der Stilllegung einer oder mehrerer Generationen einer Produktfunktion, die bereits am Markt eingeführt wurde, verfolgt die Subphase 4.1 zunächst das Ziel, die Ideen zur Beendigung des Funktionslebenszyklus zu (re-)generieren und ggf. zu priorisieren. Das Vorgehen zur Situationsanalyse in Bezug zur Stilllegung in dieser Subphase ist analog der Phase 1 in Abschnitt 5.3.3 zu verstehen. Nach Zusammenstellung des Problemlösungsteams wird initial eine Umfeld- und Trendanalyse zur Verifizierung und ggf. Aktualisierung der prognostizierten Bedürfnissituation durchgeführt. Im Anschluss muss die Stakeholder-Wahrnehmung ohne die (Generation(en) der) Produktfunktion bewertet und evaluiert werden. An diesem Punkt kann optional nach alternativer Funktionsprofilen zur aktualisierten Bedürfnissituation gesucht werden, die ausgewählt werden, um eine Bewertung der Idee(n) zur funktionalen Stilllegung zu ermöglichen. Im letzten Schritt kann somit die Entscheidung über Initiierung und Planung der funktionalen Spezifikation der Stilllegung auf Grundlage der Ergebnisse und Erkenntnisse getroffen werden. Das Ergebnis dieser Subphase 4.1 bildet die generierte und priorisierte Idee zur Stilllegung der Produktfunktion.

Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden mit den identischen Methoden der Phase 1 (vgl. Abschnitt 5.3.3) erzeugt und schließen mit einem Informationscheck (IC) sowie der Überprüfung des Problemlösungsteams ab. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf allen Basisaktivitäten (*Projekte managen, Validieren und Verifizieren, Wissen managen und Änderungen managen*) sowie den Kernaktivitäten *Profile finden, Ideen finden, Nutzung analysieren und Abbau analysieren* sowohl im *Strategie* - als auch übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM.

Subphase 4.2: Extrahierung (der Generation(en)) der Produktfunktion aus relevanten Produktgeneration(en)

Anknüpfend an das Ergebnis und insbesondere die priorisierte Idee zur Stilllegung der Produktfunktion fokussiert sich die Subphase 4.2 auf die Extrahierung der Produktfunktion (oder spezifischen Generation(en) ebendieser) aus allen relevanten Produktgenerationen. Dies beschreibt demnach das umgekehrte Vorgehen der Integration von Produktfunktionen analog Subphase 2.1 in Abschnitt 5.3.4.1. Im Zuge der Problemeingrenzung in dieser Subphase werden nach Zusammensetzung des Problemlösungsteams initial eine Verifizierung und den Umständen entsprechende Aktualisierung der relevanten Produktgeneration(en) im Produktportfolio des Anbieters vorgenommen. Anschließend folgt die Eingrenzung der Produktgenerations-spezifischen Produktprofile, die von der Stilllegung der Produktfunktion betroffen sind. Auf Grundlage des Stilllegungsvorhabens werden die funktionalen Produktkonzept(e) über das Extrahieren der relevanten Generationen der Produktfunktion (re-)spezifiziert. Zum Abschluss dieser Subphase ist die stillzulegende Produktfunktion folglich aus den relevanten Produktgenerationen extrahiert.

In dieser Subphase werden die Ergebnisse aus der Informationssammlung und-verdichtung über die identische Entwicklungsunterstützung aus Subphase 2.1 (vgl. Abschnitt 5.3.4.1) generiert und mit einem Informationscheck (IC) sowie der Überprüfung des Problemlösungsteams besiegelt. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Validieren und Verifizieren*, *Wissen managen und Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Profile finden und Abbau analysieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM.

Subphase 4.3: Zielsystem (Re-)Validierung, Objektsystem (Re-) Kreation und (Re-)Modellierung der relevanten Produktgeneration(en)

Im nächsten Schritt werden unter Berücksichtigung der extrahierten Produktfunktion (oder spezifischen Generation(en) ebendieser) in dieser Subphase 4.3 sowohl die Zielsysteme und ggf. Objektsysteme der relevanten Produktgenerationen (re-)validiert bzw. (re-)kreiert als auch die Produktmodelle (re-)modelliert. Das Vorgehen stellt hierbei eine Kombination der Entwicklungsunterstützung analog der Subphasen 2.2 und 2.3 (vgl. Abschnitten 5.3.4.2 und 5.3.4.3) dar. Sobald das Problemlösungsteam erfolgreich zusammengestellt wurde, kann optional nach alternativen Lösungen für die Stilllegung der Produktfunktion gesucht werden – sofern dies nicht bereits in vorangehenden Iterationen der Phase 1 bzw. 2 geschehen ist. In jedem Fall werden anknüpfend die Lösungsalternativen für Stilllegung der Produktfunktion ausgewählt und definiert. An dieser Stelle müssen nur die Zielsysteme ohne die Produktfunktion (oder spezifische Generation(en) ebendieser) in den relevanten Produktgenerationen im Produktportfolio des Anbieters (re-)validiert werden, um sicherzustellen, dass das aktualisierte Nutzenbündel (Kunden, Anwender, Anbieter) weiterhin marktfähig ist. In Abhängigkeit der realisierenden, physischen Elemente der Produktfunktion

schließt sich hieran eine optionale (Re-)Kreation der Objektsysteme der relevanten Produktgenerationen im Produktportfolio des Anbieters an – vorausgesetzt, dies ist bspw. aus Gründen der technischen Konformität notwendig. In einem letzten Schritt kann nun die funktionspezifische Modellierung aus den Produktmodellen der relevanten Produktgeneration(en) im Produktportfolio des Anbieters extrahiert werden. Nach Abschluss der Aktivitäten dieser Subphase sind Zielsystem(e) validiert, Objektsystem(e) kreiert und Produktmodelle der Produktgenerationen (re-)modelliert.

Eine Konsolidierung der Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase erfolgt über einen Informationscheck (IC). Methodische Grundlage bildet die methodische Unterstützung des Produktentwickelnden aus den Subphasen 2.2 und 2.3 (vgl. Abschnitte 5.3.4.2 und 5.3.4.3). Zu guter Letzt wird die Zusammenstellung des Problemlösungsteams für die nächsten Aktivitäten verifiziert. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Validieren und Verifizieren*, *Wissen managen und Änderungen managen* sowie den Kernaktivitäten *Profile finden*, *Ideen finden*, *Prinzip & Gestalt modellieren* und *Abbau analysieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM.

Subphase 4.4: Planung der Stilllegung der Produktfunktion und Festlegung der dafür zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen

Auf Grundlage der Aktivitäten der vorangehenden Subphase liegt der Fokus in Subphase 4.4 auf der Planung der Stilllegung der Produktfunktion sowie der Festlegung der dafür notwendigen und zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen. Das methodische Vorgehen orientiert sich hierbei an Subphase 2.4 (vgl. Abschnitt 5.3.4.4). Das zusammengestellte Problemlösungsteam befasst sich zunächst mit der Aufbereitung der vorangehenden Ergebnisse zur finalen Entscheidung über die Stilllegung der Produktfunktion (oder spezifischen Generation(en) ebendieser). Daran knüpft die Festlegung der zu spezifizierenden Entwicklungsgeneration(en) an, über welche die Stilllegung gesamtheitlich validiert und abgesichert wird. In einem letzten, aber überaus wichtigen Schritt wird der bisherige Problemlösungsprozess zur Stilllegung der Produktfunktion reflektiert und den Umständen entsprechend Erkenntnisse für zukünftige Prozesse im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) erfasst. Im Resultat der beschriebenen Subphase ist die Stilllegung der fokussierten Produktfunktion spezifiziert.

Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden über die beschriebenen Methoden der Subphase 2.4 (vgl. Abschnitt 5.3.4.4) fabriziert und mit einem Informationscheck (IC) sowie der Überprüfung des Problemlösungsteams besiegelt. Der Fokus der Aktivitäten der Produktentstehung liegt in dieser Subphase auf den Basisaktivitäten *Wissen managen und Änderungen managen* sowie der Kernaktivität *Abbau analysieren* übergreifend für die einzelnen Layer der relevanten Produktgenerationen des Produktportfolios im iPeM.

Subphase 4.5: Realisierung der Stilllegung der Produktfunktion oder Beendigung des Funktionslebenszyklus

Im Falle, dass im Voraus über die Stilllegung einer Produktfunktion (oder spezifischer Generation(en) ebendieser) entschieden wurde, realisiert die Subphase 4.5 die Stilllegung der Produktfunktion bzw. Beendigung des Funktionslebenszyklus. Das Vorgehen gestaltet sich hierbei analog der Phase 3 in Abschnitt 5.3.5. In jeder Iteration der Subphase (für alle relevanten und zu spezifizierenden Entwicklungsgenerationen) wird ein kompletter SPALTEN-Prozess durchlaufen, der sich jeweils in die Planung des Reifegrads, Spezifikation der Entwicklungsgeneration und Bewertung des Reifegrads gliedert. Die Ergebnisse aus der Informationssammlung und -verdichtung in dieser Subphase werden mit einem Informationscheck (IC) sowie Überprüfung des Problemlösungsteams abgeschlossen. Im Hinblick auf die prozessuale und methodische Entwicklungsunterstützung sowie relevanten Aktivitäten der Produktentstehung im iPeM wird an dieser Stelle auf Hirscher (vgl. 2023) verwiesen.

In Summe wurde in der vierten Phase auf Basis einer am Markt eingeführten (Generation einer) Produktfunktion in einem ersten Schritt eine Idee zur Stilllegung (re-)generiert und priorisiert und dann die (Generation(en) der) Produktfunktion aus den relevanten Produktgenerationen extrahiert. Anschließend wurden die Zielsysteme der relevanten Produktgenerationen (re-)validiert, deren Objektsystem ggf. (re-)kreiert und die zugehörigen Produktmodelle (re-)modelliert. Zum Abschluss wurde in der letzten Subphase die Stilllegung der Produktfunktion oder die Beendigung des Funktionslebenszyklus realisiert.

E. Deskriptive Studie II: Ergänzungen zur Evaluation der entwickelten Systematik in der Produktentwicklungspraxis

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Inhalte der Evaluation des Referenzprozesses und der methodischen Unterstützung aus Abschnitt 6.2 tiefergelegt.

E.1 Evaluation ausgewählter Inhalte des Referenzprozesses und methodischer Unterstützung

E.1.1 Evaluation des Verständnisses von Produktfunktionen sowie Anwendbarkeit des generischen Variationsoperators aus Funktionssicht

Wer an einen Sportwagen denkt, der stellt sich meist ein „*windschnittig gebautes [zweisitziges] Auto mit starkem Motor*“ (Dudenredaktion, n.d.d) in allen möglichen und unmöglichen, dynamischen Fahrzuständen vor. Die Windschlüpfrigkeit von Sportwagen hat seit jeher einen enormen Stellenwert in der Produktentwicklung, da der Luftwiderstand eines Fahrzeugs sich als der größte Verlustfaktor bei höheren Geschwindigkeiten manifestiert. Ein niedriger

Luftwiderstand ($c_w \times A$) wirkt sich bspw. durch geringeren Kraftstoffverbrauch zwar positiv auf die Effizienz oder hohe Endgeschwindigkeiten aus, daneben sind für Sportwagenhersteller – wie die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG – zusätzlich die fahrdynamischen Eigenschaften ihrer Sportwagen entscheidend. Aerodynamischer Abtrieb an Vorder- und Hinterachse verbessert die Performance bei schneller Kurvenfahrt durch Maximierung der Querbeschleunigung. Gleichermaßen kann eine konstante Auftriebsbalance zwischen Vorder- und Hinterachse die Fahrstabilität in allen Geschwindigkeitsbereichen, aber bspw. insbesondere beim schnellen Spurwechsel in hohen Geschwindigkeitsbereichen realisieren. Die Produktentwickelnden arbeiten fortwährend in diesem Spannungsfeld, um den besten Sportwagen im Wettbewerb mit der größten Spreizung zwischen Alltagstauglichkeit und Fahrdynamik zu entwickeln. Antagonistische Effekte zwischen der formgebenden Gestalt und aerodynamischen Wirkprinzipien konnten bspw. bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG stets und ständig in wegweisenden, innovativen Lösungen münden (vgl. Abbildung E.1). (Fahl, Hirschter & Albers, 2021; Gönüldinc & Hölzel, 2014; Meder, Wiegand & Pfadenhauer, 2014)

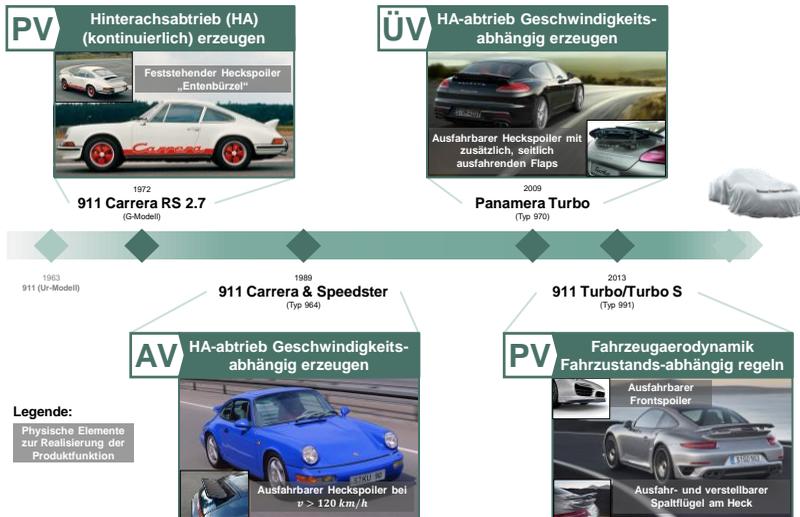


Abbildung E.1: Historische Meilensteine der Entwicklung von Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG¹⁰¹

Der 911 Carrera RS 2.7 wurde von der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG im Oktober 1972 auf dem Mondial de l'Automobile in Paris vorgestellt. Design-Highlight dieser Generation des 911 (G-Modell) war erstmals ein feststehender, markanter Spoiler, der das Heck zierte. Der

¹⁰¹ Bildquelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG

sogenannte „*Entenbürzel*“ bezweckte eine möglichst verwirbelungsfreie Entlastung der das Fahrzeug umströmenden Luft an seiner Abrisskante. Der entgegengesetzte Effekt einer Flugzeugtragfläche sorgte für höheren Anpressdruck auf den Hinterrädern und realisierte damit die Produktfunktion „*Fahrzeugheckabtrieb (kontinuierlich) erzeugen*“. Im Zuge dieser **Prinzipvariation (PV) aus Funktionssicht** wurde die zu Grunde liegende Wirkbeziehung des RSE (bspw. Funktion einer Flugzeugtragfläche oder ähnlichen Funktionen aus dem Motorsport) in die Produktgeneration des 911 Carrera RS 2.7 übertragen. Inhärente Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktionen oder deren Wechselwirkungen im Inneren der Produktfunktion aus dem Referenzsystem wurden dabei hinzugefügt oder entfernt, um diese in die Produktgeneration zu integrieren. Die Realisierung der prinzipiell neuen Produktfunktion „*Fahrzeugheckabtrieb (kontinuierlich) erzeugen*“ schlug sich dabei bspw. in Gestaltvariationen physischer Elemente im Heckbereich des Fahrzeugs nieder. Gepaart mit einem feststehenden Frontspoiler, der die Luft um das Fahrzeug herumleitet und unnötigen Auftrieb durch Unterströmung und Verwirbelungen am (unverkleideten und verklüfteten) Fahrzeugboden unterbindet, konnten die Ausprägungen von Geradeauslauf, die Brems- und Lenkeigenschaften sowie das Kurven- und Seitenwindverhalten insbesondere im hohen Geschwindigkeitsbereich des 911 Carrera RS 2.7 optimiert werden. (Soja, Thomas & Kleiner, 2019)

Die Inanspruchnahme der Luft, die das Fahrzeug überströmt, dient der Erzeugung von Abtrieb über einen Heckspoiler. Dies ermöglicht einerseits zwar höhere Längs- und Querbeschleunigungen, steht andererseits jedoch im Widerspruch zum eingangs erläuterten Ziel der Reduzierung des Luftwiderstands von Sportwagen. In der folgenden Generation des 911 wurde in den Produktvarianten Carrera des Typs 964 daher ab 1989 ein kinematisches Element integriert, das ein bedarfsabhängiges Ausfahren des Heckspoilers ermöglichte (vgl. u.a. Brin & Durm (1994)). In Geschwindigkeitsbereichen größer 120 km/h konnte daher die Produktfunktion „*Fahrzeugheckabtrieb Geschwindigkeits-abhängig erzeugen*“ technisch realisiert werden. Aus Funktionssicht lässt sich an dieser Stelle eine **Ausprägungsvariation (AV) der Produktfunktion** aus dem Vorgänger 911 Carrera RS 2.7 (G-Modell) feststellen. Unabhängig einer Veränderung in den Connectoren wurden inhärente Sub- bzw. Haupt-/Nebenfunktionen oder deren Wechselwirkungen im Inneren der Produktfunktion zumindest partiell variiert (bzw. neuentwickelt). In Fall der Produktfunktion „*Fahrzeugheckabtrieb Geschwindigkeits-abhängig erzeugen*“ wurden folglich bspw. Subfunktionen auf Basis von RSE integriert, welche die Fahrzeuggeschwindigkeit messen und das Ausfahren des Heckspoilers aktuierten. In der Funktionsformulierung ist die Variation der Ausprägung am Adverb „*Geschwindigkeits-abhängig*“ im Gegensatz zu „*kontinuierlich*“ erkennbar. Diese gewünschte AV der Produktfunktion begründete sich in der Steigerung der Eigenschaftserfüllung wie bspw. Fahrdynamik und Effizienz. Die physischen Elemente zur Realisierung der Produktfunktion wurden teilweise durch Prinzipvariation (bspw. Kinematikelement bzw. Ausfahrmechanismus), aber auch Gestalt- und Übernahmevariation (z.B. Geometrie des Heckspoilers) auf Basis des Referenzsystems variiert. (Soja, Thomas & Kleiner, 2019)

Die lösungsoffene Wirkbeziehung aus dem 911 Typ 964 wurde anschließend über nachfolgende Produktgenerationen, aber ebenso weitere Produktlinien der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (bspw. Boxster/Cayman) übernommen und ausgerollt. Im Panamera Turbo wurde die **Übernahmevariation (ÜV) der Produktfunktion** „*Fahrzeugheckabtrieb Geschwindigkeits-*

abhängig erzeugen“ im Jahr 2009 durch seitlich ausfahrende Flaps am Heckspoiler zur Vergrößerung der Angriffsfläche für die überströmende Luft aus physischer Sicht teilweise neuentwickelt. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass eine ÜV aus Funktionssicht gleichermaßen mit PV physischer Elemente zur Verbesserung der Ausprägung von Eigenschaften – wie bspw. maximale Quer-/Längsbeschleunigung – einhergehen kann. Im Zuge der funktionalen ÜV der Produktfunktion „*Fahrzeugheckantrieb Geschwindigkeits-abhängig erzeugen*“ haben sich bei Übernahme eines identischen Lösungsprinzips des zu Grunde liegenden RSE in diesem Fall nur die Connectoren in ihrer Ausprägung verändert. Die Funktionsformulierung bleibt bei der ÜV identisch zum „*funktionalen*“ RSE. (Soja, Thomas & Kleiner, 2019)

Nichtsdestotrotz gaben sich die Porsche-Ingenieure noch nicht zufrieden und suchten nach alternativen Lösungen zur weiteren Spreizung ihrer Sportwagen in Bezug zur Alltagstauglichkeit, Effizienz und Fahrdynamik bzw. Rundstreckenperformance. Die Kombination von Front- und Heckspoilern sowie aerodynamische Gestaltvariationen von Generation zu Generation führten in der Auslegung zu einer leicht positiven Auftriebsbalance c_{AV} zu c_{AH} bei Reduzierung des Hinterachsauftriebs auf Null (Meder, Wiegand & Pfadenhauer, 2014). Diese, im Fahrbetrieb quasi unveränderliche, Auslegung erzielte jedoch immer nur einen Kompromiss der im Zielkonflikt stehenden Eigenschaften. Im Jahr 2013 gelang mit dem 911 Turbo des Typs 991 allerdings ein weiterer, zukunftsweisender Durchbruch. Als weltweit erster Sportwagen realisierte die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG die Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ in einem straßen zugelassenen Fahrzeug (vgl. Abbildung 6.2). Der 911 Turbo kombinierte die Funktionalitäten eines ausfahrbaren Frontspoilers mit dem verstellbaren Heckflügel, um bedarfsabhängig im Alltag einen parkhaustauglichen Böschungswinkel (bzw. Bodenfreiheit) und auf der Rennstrecke hohe Abtriebswerte auf der Vorder- und Hinterachse für optimale Fahrleistung einzustellen. Zusätzlich lassen sich die aktiven, physischen Aerodynamikelemente zum effizienten Kraftstoffverbrauch (über einen niedrigeren Luftwiderstand) während der Fahrt konfigurieren. Der holistische Ansatz in der Regelung der Fahrzeugaerodynamik je nach Fahrtzustand oder Fahrprogramm führte zu einer **Prinzipvariation (PV) aus Funktionssicht** auf *Ebene des Gesamtfahrzeugs*. Dies lässt sich ebenso in der Funktionsformulierung abbilden. Das Verb „*regeln*“ beschreibt eine prinzipiell unterschiedliche Aktivität/Aufgabe in Bezug zum Verb „*erzeugen*“. (Gönüldinc & Hölzel, 2014; Meder, Wiegand & Pfadenhauer, 2014)

E.1.2 Evaluation ausgewählter Inhalte des Referenzprozesses

Die zuvor im Funktionssteckbrief spezifizierte Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ wurde hierarchisch in Subfunktionen bzw. struktural in Haupt-/Nebenfunktionen gegliedert, welche die Grundlage für die funktionspezifische Modellierung bildeten (vgl. Abbildung E.2). Zur Datenvisualisierung wurde *Microsoft Power BI* verwendet. Das browserbasierte Programm ermöglicht eine anwenderfreundliche und intuitive Bedienung. Die funktionspezifischen Daten konnten in Form einer Microsoft Excel-Datei importiert werden, so dass der initiale Modellierungsaufwand minimal war und weiterhin eine sehr gute Integrierbarkeit festgestellt werden konnte. Ebenso problemlos konnten die relevanten (Produkt-)Eigenschaften und realisierenden physischen Elementen aus verschiedenen Datenquellen (bspw. Eigenschaftskatalog, technische Produktbeschreibung, Stückliste, etc.)

extrahiert und in Microsoft Power BI importiert werden. Der Ausschnitt der Funktionsmodellierung in Abbildung E.2 zeigt die Verknüpfung der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ zu den drei wesentlichen (Produkt-)Eigenschaften. Zur Vereinfachung wurde die hierarchische und strukturelle Gliederung der Produktfunktion auf zwei Subsystem-Ebenen beschränkt und dort die physischen Elemente verknüpft.

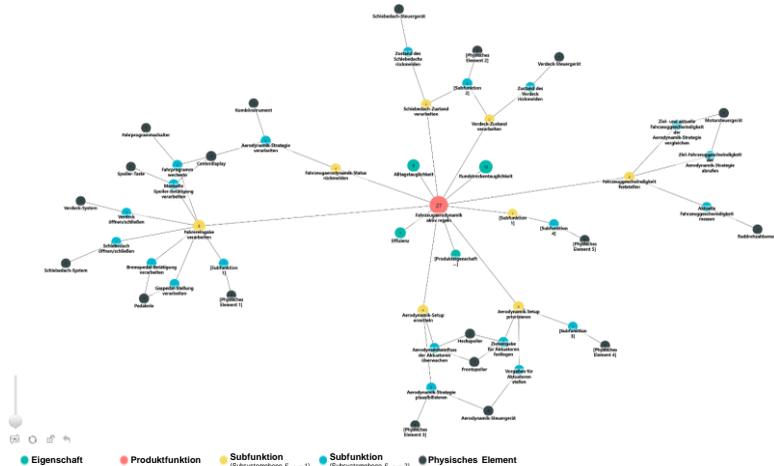


Abbildung E.2: Beispielhafte, Funktions-spezifische Modellierung der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ in Microsoft PowerBI (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020, S. 8)

Microsoft Power BI bietet zudem die Möglichkeit die Modellierung durch verschiedene Filter zu analysieren. Dadurch kann z.B. die Anzahl der modellierten Ebenen von Subfunktionen individuell angepasst werden. Darüber hinaus kann bspw. eine einzelne Eigenschaft ausgewählt werden, so dass eine Analyse der Produktfunktion oder Subfunktionen bis hin zu den spezifischen, physischen Elementen möglich ist. Durch die Darstellung der unterschiedlichen Größen modellierter Elemente konnte ebenso die Vernetzung und Komplexität der spezifizierten Modellelemente erfasst werden. Unterstützt wurde dies durch die Möglichkeit, den Knoten anhand des Vernetzungsgrades einen Wert zuzuweisen. Durch die Modellierung der Produktfunktion konnte ein detailliertes Verständnis der Wirkketten erarbeitet werden. Dadurch war es möglich, den Einfluss der physischen Elemente über die Subfunktionen sowie der Produktfunktionen auf die vom Kunden bzw. Anwender wahrgenommenen Eigenschaften zu analysieren. (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

Durch Interviews und Expertengespräche konnten positive Rückmeldungen über den Nutzen dieser Art der funktions-spezifischen Modellierung gewonnen werden. Insbesondere die weitere Verwendung bzw. Umsetzung in MBSE-Modellen (wie z.B. No Magic Cameo Systems Modeler) oder der Einsatz in der Realisierungsphase (z.B. Validierung in der Serienentwicklung) ist an dieser Stelle ein großes Potenzial des Modells, das in den Befragungen

hervorgehoben wurde. Trotz der vergleichsweise einfachen Integration und Anwendbarkeit wurde festgestellt, dass der Aufwand sowohl für Erstellung als auch für Pflege des Modells in der Konzeptentwicklung erhöht wurde. Dies konnte jedoch durch den Produktlinien- und Produktgenerations-übergreifenden Einsatz des Modells und den damit verbundenen Nutzen (z.B. bei der Spezifikation von funktionalen Produktkonzepten und der Erprobung in der Serienentwicklung) relativiert werden. (Albers, Fahl, Hirschter, Haag et al., 2020)

Die befragten Produktentwickelnden bestätigten mehrheitlich die Bedeutung von MBSE in automobilen Entwicklungsprozessen. Das Modellierungsframework (vgl. Abbildung D.21) unterstützte die Produktentwickelnden zudem beim Verständnis des Modellierungsansatzes bzw. der entsprechenden Methode. Initial wurde die Modellierung zunächst zur retrospektiven Modellierung der Produktfunktion genutzt und als zielsicheres und effektives Entwicklungswerkzeug wahrgenommen. Großes Potenzial und Nutzen wurde laut der Experten im Einsatz zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen oder externer Kommunikation festgestellt. Darüber hinaus erschlossen sich Möglichkeiten der Nutzung modellierter Informationen und teilautomatisiert erstellter Ausschnitte in weiteren und anschließenden Methoden wie bspw. im Kontext der Reifegrad- oder Risikobewertung. Die gewonnenen Erkenntnisse der Anwendung in der automobilen Produktentwicklungspraxis unterstützten die positive Beurteilung des Mehrwerts des Modellierungsframeworks. Unter Zuhilfenahme und Weiterentwicklung bestehender methodischer Forschungsansätze (u.a. Prinzipien des MBSE in D'Ambrosio & Soremekun (2017) und Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation nach Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020)) konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Spezifikationsstruktur in MBSE einerseits Chancen vereint und andererseits neuartige Synergien für die methodische Entwicklungsunterstützung generiert (vgl. Abbildung E.3). (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021)



Abbildung E.3: Chancen von MBSE und Erfolgsfaktoren der Produktspezifikation sowie neuartige Synergien in der Spezifikationsstruktur in MBSE (Fahl, Hirschter, Wöhrle et al., 2021, S. 2487)

Im Gegensatz zu zahlreichen MBSE-Methoden realisiert die entwickelte Spezifikationsstruktur durch eine systematische Aufteilung, Strukturierung und Verknüpfung verschiedener Sichten eine hohe Anwendbarkeit durch Produktentwickelnde.