

Nikola Bursać

**Model Based Systems Engineering zur
Unterstützung der Baukastenentwicklung
im Kontext der Frühen Phase der
Produktgenerationsentwicklung**

Model Based Systems Engineering as a support
for the Modular Design in the Context of the Early
Stages of Product Generation Engineering

Band 93

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: Univ.- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2016
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Nikola Bursać
aus Bihać

Tag der mündlichen Prüfung: 01. April 2016
Hauptreferent: Univ.- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Korreferent: Univ.- Prof. Dr.-Ing. M. Abramovici

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft 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 als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe¹ verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibsystemen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

¹Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 93

Die Internationalisierung und der globale Wettbewerb, sowohl im Bereich der Konsumgüter-Industrie, als auch im Bereich der Investitionsgüter-Industrie, führen zu enormen Anforderungen an die Produktentwicklung. Produkte werden zunehmend funktional angereichert, indem durch die Integration von mechatronischen Lösungen, bis hin zur Vernetzung mit dem Internet, Funktionalitäten realisiert werden, die vor einigen Jahren in dieser Form undenkbar waren. Stichwort in diesem Zusammenhang sind im Investitionsgüterbereich die Konzepte zu Industrie 4.0 und im Fahrzeugbau als Beispiel die Veränderung der Antriebssysteme, hin zu hybridisierten oder vollelektrischen Antrieben oder die Konzepte des Smart-Mobility. Hier werden Fahrzeuge über das Internet vernetzt und zukünftig teilweise autonom betrieben. Diese Entwicklung ist zwingend gekoppelt mit einer zunehmenden Komplexität und Kompliziertheit der Produkte und einem enorm gesteigerten Entwicklungsrisiko, da immer wieder neue Teilsysteme entwickelt und integriert werden müssen. Gleichzeitig führt der globale Wettbewerb zu einem hohen Preis- und damit Kostendruck. Kunden können sehr hochwertige Lösungen kostengünstig erwerben, so dass auch der Aspekt der Kosten für die zukünftigen komplexen Lösungen eine wichtige Rolle im Entwicklungsprozess spielt. Ein Ansatz, um hier Antworten zu finden, ist das Konzept der sog. Baukastenentwicklung. Bei der Baukastenentwicklung wird versucht, eine äußere Vielfalt der Produkte für den Kunden darzustellen, bei gleichzeitig limitierter innerer Vielfalt der Produktlösungen und technischen Systeme. Das Prinzip ist hier die Mehrfachverwendung von Teilsystemen in unterschiedlichen Konfigurationen. Ansätze zur Baukastenentwicklung, oder im Automobilbau auch zur Plattformentwicklung, wurden in den letzten Jahren umfänglich erarbeitet. Plattform- und Baukastenlösungen haben dabei durchaus große Vorteile, indem Kundenvielfalt mit relativ geringem Aufwand erzeugt werden kann. Allerdings sind auch die Risiken einer Baukastenentwicklung sehr hoch, da die notwendigen Informationen zur Definition der Baukastenstruktur oft nur unzureichend zur Verfügung stehen. Das Konzept der Baukastenentwicklung im Bereich des Fahrzeugbaus kann ein wichtiges Element zur Schaffung innovativer und gleichzeitig kostengünstiger Produkte im Wettbewerb darstellen. Dabei kommt dem Aspekt der Produktgenerationsentwicklung (PGE), wie sie vom Unterzeichner definiert wurde, eine besondere Bedeutung zu. Die meisten Produkte werden in Generationen entwickelt, d. h. ein neues Produkt basiert im Allgemeinen auf einem Referenzprodukt, das es ablösen oder im Wettbewerb angreifen soll. Bei einer konsequenten Realisierung der Produktgenerationsentwicklung als Grundlage des Entwicklungsprozesses können durch das Wiederverwenden von Wissen bezüglich Produktlösungen, aber auch bezüglich Methoden, Modellen

und Vorgehensweisen, hohe Rationalisierungspotenziale erreicht werden. Gleichzeitig kann auf dieser Basis die Sicherheit in der Produktentwicklung gesteigert werden. Allerdings haben die heutigen wissenschaftlichen Ansätze zur Konstruktionsmethodik und Produktentwicklung den Aspekt der Produktgenerationsentwicklung nur völlig ungenügend berücksichtigt. Die heute gelehrt und erforschten Konzepte basieren typischerweise auf dem Grundsatz, dass ein Produkt gänzlich neu „ausgehend vom weißen Blatt Papier“ entwickelt wird. Dementsprechend sind auch die Methoden ausgerichtet. Untersuchungen in der Praxis, wie sie z. B. BIRKHOFER durchgeführt wurden, zeigen, dass die Ansätze dieser klassischen Konstruktionsmethodik in der Praxis nur wenig angewendet und umgesetzt werden. Ein Grund ist aus Sicht des Unterzeichners, dass die Methoden oft nicht die Realität abbilden und den Bezug zur Produktgenerationsentwicklung mit seinen Referenzprodukten nicht berücksichtigen. Hier setzen die Arbeiten zur Produktgenerationsentwicklung der Gruppe um ALBERS an. Es wurde in den letzten Jahren ein neuer Ansatz entwickelt, der die reale Produktentwicklung abbilden kann und es damit auch erlaubt, neue und angepasste Methoden für die Entwicklungspraxis zu erarbeiten.

An dieser Stelle liefert die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Nikola Bursać einen wichtigen Beitrag zur Karlsruher Schule der Produktentwicklung (KaSPro) und zur Weiterentwicklung der Produktentwicklungsforschung. Er leitet auf der Basis des „Model Based Systems Engineering“ eine Methodik ab, die die Baukastenentwicklung, insbesondere in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung (PGE) unterstützt. Die Arbeit leistet in Ihrer konkreten Anknüpfung an reale Produktentwicklungsprozesse in einem Unternehmen auch einen wichtigen Beitrag für die Praxis.

April, 2016

Albert Albers

Meiner Familie

*„Das wichtigste Produkt des kreativen Geistes ist die Erfindung.
Ihr Ziel ist es die Grenzen des bis dato Möglichen zu überwinden und
dies zum Wohl der Menschheit zu nutzen.“*

Nikola Tesla, Ingenieur

Kurzfassung

In Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird ein Framework zur Produktmodellierung vorgestellt, das Entwickler bei der Synthese und Analyse von Baukästen und den dazugehörigen Produkten unterstützt. Es wird aufgezeigt, wie Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden können, um Produktmodelle mithilfe des Model Based Systems Engineering Ansatzes, im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung², effizient zu erstellen.

Auf Basis einer Literaturanalyse wird abgeleitet, dass die Entwicklung von Baukästen zur Standardisierung von komplexen Produkten nicht als eine vorgelagerte Phase des Produktentstehungsprozesses verstanden werden sollte, sondern eine begleitende Aktivität der Produktentwicklung darstellt. Es wird der Forschungsbedarf aufgezeigt, die iterativen Produktentstehungsprozesse mittels durchgängiger Baukasten- und Produktmodelle zu unterstützen.

Eine Analyse unterschiedlicher Produktentstehungsprozesse in der Entwicklungspraxis zeigt hierbei ein Potential auf, das durch die Nutzung von Referenz-Produktmodellen erschlossen werden kann. Werden Produkte in Generationen entwickelt, basieren diese auf mindestens einem Referenzprodukt. Die dabei übernommenen Informationen können in einem Referenz-Produktmodell abgebildet und als eine Wissensbasis in der Produktgenerationsentwicklung³ genutzt werden. Auf Basis der Abstraktionsgrade des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM wird ein Framework entwickelt, in das die Referenz-Produktmodelle sowie wesentliche Elemente der Baukastenentwicklung eingeordnet werden können. Dieses Framework wird evaluiert, indem zwei Fallstudien unter Zuhilfenahme des Frameworks durchgeführt werden. Eine durchgängige Modellierung von Fahrzeugen und des dazugehörigen Baukastens erfolgen in der ersten Studie. In der zweiten Studie werden mehrere Portalkratzer einer Produktfamilie modelliert, um Standardisierungspotentiale zu identifizieren.

Abschließend wird im Ausblick aufgezeigt, wie die Forschung in den drei Kernbestandteilen der vorliegenden Arbeit Model Based Systems Engineering, Baukastenentwicklung und Produktgenerationsentwicklung weitergeführt werden kann.

²vgl. Kapitel 2.2.2

³vgl. Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

Abstract

In this research thesis, a product-modeling framework is introduced which assists developers in the synthesis and analysis of modular products. It is demonstrated how information from previous product generations can be used to efficiently create product models using the Model Based Systems Engineering approach in the context of the early stages of product generation engineering⁴.

Based on an analysis of literature, it is deduced that modular design, as a standardisation method for complex products, should not be understood as a phase prior to the actual product development process, but should be seen as a concurrent activity within product development. A need for research is identified in order to support the iterative product development processes by means of consistent module models and product models.

Based on the analysis of various product development processes in the industrial context, a potential for the use of the reference product models is revealed. When products are developed in generations, they are based on at least one reference product. The information acquired through product generations can be mapped onto a reference model and, thus, serve as a knowledge base for the product generation engineering⁵. Based on the degrees of abstraction of the integrated product development model iPeM, a framework is developed, into which reference product models as well as essential elements of modular design can be integrated. This serves as a basis for two case studies that are carried out in an industrial context. A consistent modeling of vehicles and corresponding modules take place within the scope of the first case study. In the second case study, various portal scrapers are modelled in order to identify the standardization potential.

Finally, the outlook highlights how future research of the core areas of this work can be carried forward: Model Based Systems Engineering, modular design and product generation engineering.

⁴cf. chapter 2.2.2

⁵cf. Albers, Bursac & Wintergerst, 2015a.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie. Sie fand im Rahmen des BMBF Forschungsprojekts IN² - Von der Information zur Innovation, in einem Kooperationsprojekt mit der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG statt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für die Gelegenheit, über 7 Jahre als hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter, Studien- und Diplomarbeiter sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter Teil des IPEK-Teams sein zu dürfen. Seine Fähigkeit, notwendige Methoden und Prozesse zu erkennen, zu entwickeln und einzuführen, finde ich beeindruckend. In der sehr engen Zusammenarbeit mit ihm hatte ich Dank der übertragenen Verantwortung und seinem Vertrauen die einzigartige Gelegenheit mich fachlich und persönlich weiterzuentwickeln.

Außerdem möchte ich mich herzlich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Abramovici für die Übernahme des Koreferats bedanken. Seine stets freundliche Art empfand ich, während vieler Gespräche bei Tagungen der WiGeP (Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung), sehr inspirierend.

Im Rahmen der Kooperation mit der Porsche AG möchte ich mich für weitblickende Ideen und unzählige, lehrreiche Gespräche bei Herrn Dr.-Ing. Robert Lüdcke bedanken.

Mein persönlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Ludwig Maul für die erfolgreiche Zusammenarbeit, viele kurzweilige Gespräche und vor allem für die entstandene Freundschaft.

Für das tolle Arbeitsklima, aufschlussreiche Gespräche sowie interessante und anspruchsvolle Fragen möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des IPEK bedanken. Bei den Herren Nicolas Reiß, Jan Breitschuh und Sebastian Schmidt möchte ich mich darüber hinaus für die daraus entstandene langjährige Freundschaft bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank dem gesamten Team des Baukasten-, Modul- und Projektmanagements der Porsche AG für viele schöne Augenblicke. Speziell möchte ich

mich bei Frau Julia Richter und den Herren Matthias Stadler, Tim Fröhlich und Patrick Fellenberg bedanken.

Außerdem gilt mein Dank für viele schöne Veranstaltungen den Doktoranden des Porsche Doktoranden Netzwerks. Besonders möchte ich mich bei den Herren Helmut Scherer und Armin Kurrle für die daraus entstandene Freundschaft bedanken.

Ein großer Dank gilt Frau Dr.-Ing. Sabine Muschik - meiner Mentorin der Gesellschaft für Produktentwicklung - für die wegweisende Zusammenarbeit und hervorragende Vorarbeit.

Für die partnerschaftliche Projektarbeit möchte ich mich gerne bei allen IN²- Projektpartnern bedanken, besonders bei Herr Raphael Berger, gerade auch für die Fahrdienste.

Mein aufrichtiger Dank gilt allen studentischen Abschlussarbeitern, hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern, Werksstudenten und Praktikanten, die ich im Laufe der Jahre betreuen durfte. Sie alle haben wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen, speziell Frau Galina Rachenkova, Herr Clemens Birk und Herr Jonathan Will.

Mein größter Dank gilt meiner Familie: Thea, Nina, Slavica und Goran Bursać für eine unglaubliche Unterstützung in all den Jahren. Deshalb widme ich Euch diese Arbeit.

Karlsruhe, den 04.02.2016

Nikola Bursać

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Fokus der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen und Stand der Forschung	6
2.1	Systems Engineering	6
2.1.1	Modelltheorie und Systemtheorie	7
2.1.2	Prozessmodelle	12
2.1.3	Produktmodelle	27
2.1.4	Zwischenfazit	33
2.2	Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung	33
2.2.1	Produktgenerationsentwicklung	34
2.2.2	Frühe Phase der Produktentwicklung	42
2.2.3	Zwischenfazit	47
2.3	Baukastenentwicklung als Standardisierungsmethode	48
2.3.1	Systemtheoretische Betrachtung von Standardisierungsmethoden	48
2.3.2	Baukastenentwicklung	58
2.3.3	Zwischenfazit	63
2.4	Fazit	64
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	66
3.1	Zielsetzung	66
3.1.1	Forschungsbedarf	66
3.1.2	Forschungshypothesen	67
3.1.3	Forschungsfragen	68
3.2	Vorgehensweise	68
3.2.1	Forschungsmethode	69
3.2.2	Empirische Methoden	72
3.2.3	Untersuchungsumgebung	75
3.3	Fazit	78

4	Produktmodelle in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung	80
4.1	Vorstudie	81
4.2	Herausforderungen bei der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen	85
4.2.1	Studiendesign	85
4.2.2	Ergebnisse der Fragebogenstudie	87
4.2.3	Zwischenfazit	92
4.3	Prozessanalyse zur Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen	93
4.3.1	Studiendesign	93
4.3.2	Ergebnisse der Prozessanalyse	97
4.3.3	Zwischenfazit	99
4.4	Lösungsansätze zur Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen	100
4.4.1	Studiendesign	100
4.4.2	Ergebnisse der teilnehmenden Beobachtung	102
4.4.3	Zwischenfazit	107
4.5	Fazit	107
5	MBSE in der Frühen Phase der Baukastenentwicklung	110
5.1	Abstraktionsgrade des Systems Engineering	111
5.1.1	Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung	111
5.1.2	Abstraktionsgrade der Produktmodellierung	113
5.1.3	Zwischenfazit	122
5.2	Unterstützung der Baukastenentwicklung mithilfe von MBSE	123
5.2.1	Unterstützung der Baukastenentwicklung mithilfe des Frameworks	123
5.2.2	Zwischenfazit	130
5.3	Fazit	131
6	Anwendung des Frameworks in der Produktentwicklung	133
6.1	Baukastenentwicklung am Beispiel von Gesamtfahrzeugen	134
6.1.1	Studiendesign	134
6.1.2	Ergebnisse der Fallstudie	135
6.2	Analyse von Standardisierungspotentialen am Beispiel von Portalkratern	139
6.2.1	Studiendesign	140
6.2.2	Ergebnisse des Fallbeispiels	141
6.3	Fazit	145
7	Zusammenfassung und Ausblick	147
7.1	Zusammenfassung	147
7.2	Ausblick	153
7.2.1	Model Based Systems Engineering	153
7.2.2	Baukastenentwicklung	156

7.2.3 Produktgenerationsentwicklung	157
Literaturverzeichnis	159
Abkürzungsverzeichnis	182
Abbildungsverzeichnis	184
Tabellenverzeichnis	188
Glossar	189

1 Einleitung

Die auf der Welt vorzufindende Vielfalt an Lebewesen, Kunst und Produkten, kann auf einen Baukasten mit drei Komponenten zurückgeführt werden: Protonen, Neutronen und Elektronen.⁶ Dieses Prinzip der hohen äußeren Vielfalt bei geringer innerer Vielfalt kann übertragen werden: So besitzt jedes Lebewesen seine spezifische DNS⁷, welche sich im Wesentlichen aus vier Basen (A, T, G und C) zusammensetzt. Kunstwerke wie die Terrakotta-Armee wurden auf Basis einzelner Module realisiert, welche miteinander kombiniert wurden. So entstehen auf Basis weniger Varianten von Kopf, Torso und Unterleib durch die Kombinatorik viele Varianten von Kriegern. Analog ist es möglich, technische Produkte mithilfe von Standardisierungsmethoden so zu entwickeln, dass dem Kunden individuelle Produkte angeboten und gleichzeitig die Produktkosten durch Skaleneffekte reduziert werden können.⁸

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung von Baukästen näher betrachtet. Dazu wird die Motivation dargelegt und das Themengebiet eingegrenzt sowie der Aufbau der Arbeit dargestellt.

1.1 Motivation

Um heterogenen Kundenwünschen gerecht zu werden und im Verdrängungswettbewerb Marktanteile zu gewinnen, wird beispielsweise in der Automobilindustrie der Markt zunehmend feiner segmentiert und die entstehenden Segmente werden mit neuen Fahrzeugvarianten versehen.⁹ Mithilfe von Standardisierungsansätzen wie der Modul-, Plattform-, Baureihen- und Baukastenentwicklung kann der Zielkonflikt zwischen Produktkosten und -vielfalt gelöst werden.¹⁰

⁶vgl. z. B. Finkelburg, 2013.

⁷Desoxyribonukleinsäure

⁸Albers, Bursac & Scherer, 2014.

⁹Meffert, Burmann & Kirchgeorg, 2000.

¹⁰Ehrlenspiel, 2009.

Vor dem Hintergrund, dass der Mensch das zentrale Element der Produktentwicklung ist, gilt es Methoden und Prozesse zu entwickeln, die Produktentwickler¹¹ bei ihrer Tätigkeit unterstützen.¹² Bisherige Ansätze der Baukastenentwicklung erfordern vor Beginn der tatsächlichen Produktentwicklung eine abstrakte Modularisierung zur Definition von Schnittstellen und Systemarchitekturen.¹³

Untersuchungen zeigen allerdings, dass es Entwicklern schwer fällt, komplett abstrakt und frei von einer Gestalt zu entwickeln.¹⁴ Aufgrund starker Wechselwirkungen zwischen dem Baukasten und den Produkten führt die abstrakte Entwicklung von Baukästen dazu, dass komplexe Wechselwirkungen nicht erkannt werden. Das sonst in der Produktentwicklung übliche iterative Vorgehen wird durch mangelnde Explikation der Produkt- und Baukastenmodelle erschwert.¹⁵

1.2 Fokus der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird die Frühe Phase der Produktentwicklung betrachtet, da Aktivitäten in dieser Phase großen Einfluss auf das spätere Produkt haben und dabei zahlreiche Wechselwirkungen zwischen dem Baukasten und den dazugehörigen Produkten stattfinden.¹⁶ Ein charakteristisches Merkmal der Frühen Phase ist ein hohes Maß an Unsicherheit, es herrschen weniger Informationen vor als benötigt werden, um die jeweiligen Probleme lösen zu können. Folglich ist hierbei ein iteratives Vorgehen sinnvoll, um neues Wissen zu generieren. Das iterative Vorgehen kann dabei durch das Explizieren von Produkten und Baukästen in Modellen unterstützt werden.¹⁷

Hierfür bietet sich der Ansatz des Systems Engineering (SE) an. Dieser ermöglicht auf Basis eines systemtheoretischen Verständnisses, Produkte und deren Wechselwirkungen ganzheitlich zu betrachten. Wenn dabei Informationen nicht wie üblich in einzelnen Dokumenten gespeichert werden, sondern in einem Modell zusammengeführt werden,

¹¹Unter „Produktentwickler“ wird gleichermaßen auch „Produktentwicklerinnen“ verstanden und stets mitgedacht. Um die Lesbarkeit zu erleichtern, wird jedoch in der vorliegenden Arbeit das generische Maskulinum verwendet.

¹²Albers, 2010.

¹³Schuh, 2015.

¹⁴Albers, Matthiesen & Lechner, 2002.

¹⁵vgl. Kapitel 2.1.1 und 2.1.2

¹⁶vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.3.2

¹⁷vgl. Kapitel 2.4

bezeichnet man dies als Model Based Systems Engineering (MBSE).¹⁸ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die Ansätze des MBSE näher untersucht werden, um eine durchgängige Modellierung von Baukästen und Produkten zu ermöglichen und auf diese Weise Entwickler in der Frühen Phase der Produktentwicklung zu unterstützen. In Abbildung 1.1 sind die wesentlichen Forschungsfelder dargestellt und in den Kontext der vorliegenden Arbeit gebracht.



Abbildung 1.1: Forschungsfeld und relevante angrenzende Forschungsfelder¹⁹

Neben den bereits erörterten Forschungsfeldern sind weitere Felder relevant, um das zentrale Thema zu erforschen. Das SE beinhaltet neben Produktmodellen auch Prozessmodelle. Hier kann der Ansatz des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM nach ALBERS herangezogen werden und einzelne Aspekte auf Produktmodelle und das MBSE übertragen werden.²⁰ Darüber hinaus wird die Frühe Phase der Produktentwicklung im Kontext der Arbeit nicht als eine Entwicklung, die auf einem weißen Blatt Papier beginnt, verstanden. Um diesen Sachverhalt beschreiben zu können, dient der Ansatz der Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS; dieser stellt die Grundlage für die vorliegende Arbeit dar.²¹

¹⁸vgl. Kapitel 2.1.3

¹⁹Darstellungsform nach Blessing & Chakrabarti, 2009.

²⁰vgl. Kapitel 2.1.2

²¹vgl. Kapitel 2.2.1

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Forschungsarbeit ist in 7 Kapitel gegliedert, die in Abbildung 1.2 dargestellt sind und im Folgenden kurz vorgestellt werden.



Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit²²

In Kapitel 2 wird auf die beschriebenen Forschungsfelder näher eingegangen. Dazu werden zunächst die Grundlagen der Systemtheorie betrachtet. Darauf aufbauend wird der Stand der Forschung zu Prozess- und Produktmodellen erläutert. Diese dienen als Basis, um den grundlegenden Ansatz der Produktgenerationsentwicklung zu beschreiben und dadurch die Frühe Phase der Produktentwicklung zu spezifizieren. Des Weiteren werden die Definitionen für die Standardisierungsmethoden der

²²Die Fotografien in dieser Abbildung stammen aus Microsoft ClipArt. Nach den Nutzungsbedingungen von Microsoft, ist es explizit erlaubt diese Medienelemente für Dokumente wie die vorliegende Arbeit zu verwenden. Sofern nicht anderweitig gekennzeichnet, stammen auch die restlichen Fotografien aus Microsoft ClipArt oder sind selbst erstellt.

Modul-, Plattform- und Baureihen- und Baukastenentwicklung aufgeführt und diskutiert.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 3 konkretisiert. Dazu wird der Forschungsbedarf auf Basis des Stands der Forschung abgeleitet und anhand von Forschungshypothesen und Forschungsfragen präzisiert. Ferner wird die methodische Vorgehensweise vorgestellt.

Kapitel 4 beinhaltet zunächst eine Vorstudie, um den Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit durch Baukasten-Experten aus der Entwicklungspraxis zu bestätigen. Anschließend werden in drei Studien die Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen in realen Produktentwicklungsprozessen näher untersucht. Dazu wird zunächst eine empirische Studie auf Basis eines Fragebogens dargestellt, anschließend werden fünf Produktentstehungsprozesse im Detail untersucht und abschließend eine dreijährige begleitende Beobachtung in der Frühen Phase der Baukastenentwicklung beschrieben.

Auf Basis der empirischen Studie aus Kapitel 4 wird in Kapitel 5 ein Framework entwickelt, das als Beschreibungsmodell für unterschiedliche Abstraktionsgrade der Produktmodellierung dient. Dieses wird als Grundlage für eine theoretische Beschreibung der Produktmodelle im Kontext der Produktgenerationsentwicklung herangezogen und auf die Baukastenentwicklung übertragen.

In Kapitel 6 wird das Beschreibungsmodell verwendet, um in zwei Fallstudien Produktmodelle zu erstellen, welche die Baukastenentwicklung in der Frühen Phase der Produktentwicklung unterstützen. Bei der ersten Fallstudie handelt es sich um ein Modell, das sowohl Gesamtfahrzeuge als auch den dazugehörigen Baukasten darstellt. Bei der zweiten Fallstudie werden große Investitionsgüter der Fördertechnik, so genannte Portalkratzer, retrospektiv in ein Modell überführt, um Synergiepotentiale für die Baukastenentwicklung zu identifizieren.

Abschließend werden die Ergebnisse der Forschungsarbeit in Kapitel 7 zusammengefasst und ein Ausblick auf künftige Forschungsaktivitäten gegeben, die im Kontext des MBSE, der Baukastenentwicklung und der Produktgenerationsentwicklung an die vorliegende Arbeit anknüpfen können.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Im Stand der Forschung wird in Kapitel 2.1 zunächst ein Überblick über das Themengebiet des Systems Engineering mit dem Fokus auf Prozess- und Produktmodelle gegeben. Basierend auf dem hieraus entstehenden Verständnis werden die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung (Kapitel 2.2) und die Baukastenentwicklung (Kapitel 2.3) näher betrachtet.

2.1 Systems Engineering

Für die Entwicklung komplexer Produkte ist zunehmend der Einsatz interdisziplinärer Problemlösungsteams wichtig. Damit diese zielgerichtet entwickeln können, bietet sich der Ansatz des SE an. Der Begriff kann nach dem International Council on Systems Engineering (INCOSE) wie folgt definiert werden:²³

Definition 1: Systems Engineering

Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz und soll die Entwicklung von Systemen methodisch ermöglichen. Systems Engineering fokussiert ein ganzheitliches und zusammenwirkendes Verständnis der Stakeholder-Anforderungen, der Entdeckung von Lösungsmöglichkeiten und der Dokumentation von Anforderungen sowie das Synthetisieren, Verifizieren, Validieren und die Entwicklung von Lösungen. Das gesamte Problem wird währenddessen von der Konzeptentwicklung bis zur Systementwicklung betrachtet. Das Systems Engineering stellt hierfür geeignete Methoden, Prozesse und Best Practices bereit.

²³Incose, 2011. übersetzt nach Gausemeier, Dumitrescu, Steffen, Czaja, Wiederkehr & Tschirner, 2013.

Mithilfe der Systemtheorie können unterschiedliche Originale abgebildet werden, im Kontext der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf Prozess- (nachfolgend grün dargestellt) und Produktmodelle (blau dargestellt) gelegt (vgl. Abbildung 2.1). ECKERT, ALBERS, CLARKSON et al. analysieren in einem umfangreichen Literatur-Reviewpaper, dass bei der Verbindung von Prozess- und Produktmodellen ein hoher Forschungsbedarf besteht.²⁴ Dazu wird zunächst auf die Grundlagen der allgemeinen Modelltheorie und der Systemtheorie der Technik eingegangen. Nachfolgend werden ausgewählte Prozessmodelle vorgestellt. Abschließend werden unterschiedliche Arten von Produktmodellen diskutiert.

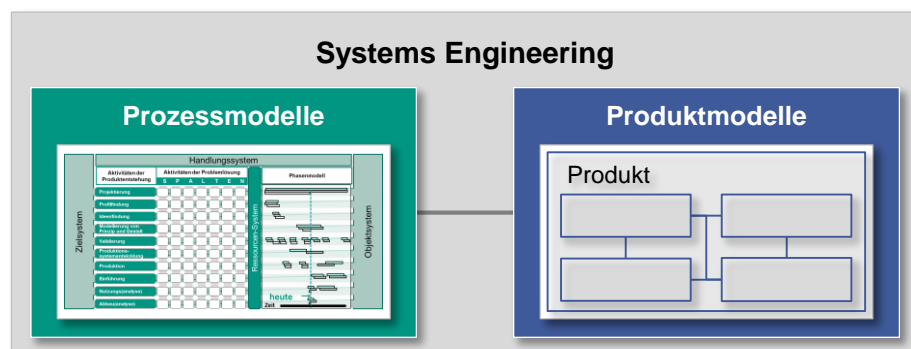


Abbildung 2.1: Produkt- und Prozessmodelle im Systems Engineering

2.1.1 Modelltheorie und Systemtheorie

Allgemeine Modelltheorie

Nach der allgemeinen Modelltheorie von STACHOWIAK kann die Modellbildung mithilfe des Abbildungsmerkmals, des Verkürzungsmerkmals und des pragmatischen Merkmals beschrieben werden. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle stets Abbildungen von Originalen sind. Diese Originale können selbst wiederum Modelle sein. Durch das Verkürzungsmerkmal wird beschrieben, dass Modelle nicht alle Attribute des repräsentieren Originals aufweisen, sondern auf diejenigen Attribute begrenzt sind, welche den Modellschaffern oder Nutzern als relevant erscheinen. Außerdem dienen Modelle nach dem pragmatischen Merkmal stets einem Zweck, d. h. sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion für bestimmte Subjekte, innerhalb bestimmter Zeitintervalle und unter Einschränkung auf bestimmte Operationen.²⁵

²⁴Eckert, Albers, Bursac, Chen, Clarkson, Gericke, Gladysz, Maier, Rachenkova, Shapiro & Wynn, 2015.

²⁵Stachowiak, 1973.

Modelle repräsentieren also nicht die abgebildeten Originale in vollem Umfang, sondern weisen je nach ihrem Zweck eine Teilmenge der Attribute des Originals auf. Dieser Zweck wird durch die beteiligten Personen, die Zeitintervalle und notwendigen Operationen bestimmt. Da im Produktentstehungsprozess jedoch häufig eine hohe Anzahl an Personen beteiligt sind und diese häufig zu unterschiedlichen Zeitpunkten verschiedene Aktivitäten durchführen, entstehen während eines Produktentstehungsprozesses eine große Anzahl von Produktmodellen. Diese sind, abhängig von ihrem Zweck, zum Teil sehr unterschiedlich und häufig nicht miteinander kompatibel. Dieser Sachverhalt steht im Widerspruch zum Ziel der ganzheitlichen Bildung und Nutzung von durchgängigen Produktmodellen und kann als Reduktions-Dilemma bezeichnet werden (vgl. Abb. 2.2).²⁶

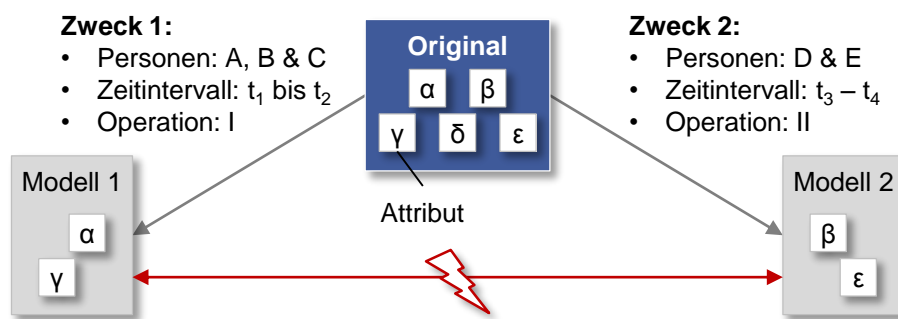


Abbildung 2.2: Reduktions-Dilemma: Verkürzung und Ganzheitlichkeit

Ein Ansatz, dem Reduktions-Dilemma zu begegnen, entsteht durch ein gemeinsames Verständnis bei der Bildung und Nutzung von Modellen, welches mithilfe von transdisziplinären Meta-Modellen ermöglicht wird.²⁷ So kann mithilfe einer speziellen Modelltheorie, der allgemeinen Systemtheorie, ein Regelwerk geschaffen werden, um eine durchgängige Nutzung von Modellen zu ermöglichen.²⁸ Diese wird im Folgenden vorgestellt.

Allgemeine Systemtheorie

Die Ursprünge der Systemtheorie liegen in der Antike, wurden allerdings erstmalig von dem Biologen BERTALANFFY in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts zur allgemeinen Systemtheorie zusammengefasst. Er erkannte, dass die Eigenschaften höherer Ebenen nicht durch die Summe der Eigenschaften ihrer Bestandteile erklärbar sind,

²⁶Lohmeyer, 2013.

²⁷Winzer, 2013.

²⁸Albers, 2010 und Albers & Lohmeyer, 2012.

solange diese Bestandteile isoliert betrachtet werden. Vielmehr müssen neben den Bestandteilen auch ihre Relationen betrachtet werden, um höhere Ebenen ableiten zu können. Der Ansatz der allgemeinen Systemtheorie zeigte darüber hinaus das Potential eine disziplinübergreifende Theorie zu entwickeln, welche die Integration bestehender, isolierter Disziplinen ermöglicht.²⁹

Deduktiv kann eine allgemeine Theorie für eine spezifische Domäne ausgeprägt werden. Die allgemeine Systemtheorie hat im Kontext der Ingenieurwissenschaften eine Ausprägung zur Beschreibung von technischen Produkten und deren Entstehungsprozessen erhalten. Sie wird als „Systems Engineering“ oder „Systemtheorie der Technik“ bezeichnet.³⁰ Im folgenden Abschnitt wird darauf näher eingegangen.

Systemtheorie der Technik

Vorläufer des Systems Engineering sind im militärischen „Operations Research“ und den Arbeiten des amerikanischen Telekommunikationsunternehmens „Bell Laboratories“ zu finden.³¹ Weitere Anwendung fand das SE während der Apollo-Mission der NASA. Hier wurde es zur Koordination des multidisziplinären Problemlösungsteams angewendet.³²

Nach ROPOHL können drei Aspekte der Systemtheorie unterschieden werden. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt sind diese: das funktionale, das strukturele und das hierarchische Konzept.³³

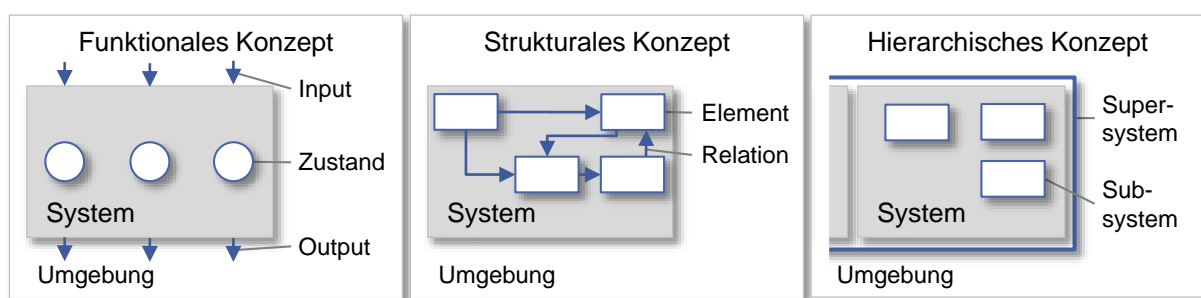


Abbildung 2.3: Konzepte der Systemtheorie nach ROPOHL³⁴

²⁹Bertalanffy, 1969.

³⁰Pulm, 2004.

³¹Hall, 1962.

³²Gausemeier, Dumitrescu, Steffen, Czaja, Wiederkehr & Tschirner, 2013.

³³Ropohl, 1979.

³⁴nach Ropohl, 2009.

Im funktionalen Konzept wird das System als eine „Black Box“ betrachtet. Dabei bleibt der innere Aufbau des Systems unberücksichtigt. Stattdessen wird das Systemverhalten beschrieben, demzufolge wie das System mit seiner Umgebung durch Eingangs- und Ausgangsgrößen interagiert und welchen Zustand es besitzt.³⁵

Das strukturelle Systemkonzept beschreibt den Sachverhalt, dass ein System mehr ist als die Summe seiner Bestandteile. Dieser Sachverhalt wird als Emergenz bezeichnet und kann dadurch erklärt werden, dass neben den Elementen eines Systems auch die Relationen der Elemente betrachtet werden müssen, um die Systemeigenschaften analysieren zu können.³⁶

Das hierarchische Konzept macht deutlich, dass die Elemente eines Systems ebenfalls als Systeme (Subsysteme) betrachtet werden können. Folglich kann auch jedes System als Teil eines umfassenderen Systems (Supersystems) betrachtet werden. Dadurch können unterschiedliche Ebenen von Ganzheiten und Teilen beschrieben werden.³⁷ Das hierarchische Konzept hat zur Folge, dass ein systemtheoretischer Ansatz, welcher auf einer Systemebene zum Einsatz kommt, auch auf die Subsysteme angewendet werden kann. Man spricht hierbei von einem fraktalen Charakter im Systems Engineering.³⁸

Basierend auf dem (a) funktionalen, (b) strukturalen und (c) hierarchischen Konzept definiert ROPHOHL den Begriff „System“. Diese Definition wird auch für die vorliegende Arbeit verwendet.³⁹

Definition 2: System

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.

Der allgemeine Begriff des Systems kann für technische Systeme mithilfe der nachfolgenden Attribute charakterisiert werden:⁴⁰

- es ist künstlich entstanden,
- es ist zweckorientiert,

³⁵Ropohl, 1979.

³⁶Ropohl, 2009.

³⁷Ropohl, 1979.

³⁸Siehe im Kontext der Prozessmodellierung Albers, Braun & Muschik, 2010.

³⁹Ropohl, 2009.

⁴⁰Ropohl, 1979.

- es ist offen und
- es ist dynamisch.

Produktentstehung als sozio-technisches System

Möchte man Technik verstehen, ist es wenig zielführend, die entstehenden technischen Artefakte isoliert zu betrachten. Stattdessen muss Technik als ein sozio-technisches System verstanden werden, welches neben den Artefakten die menschlichen Handlungen bei der Entstehung und Nutzung mit berücksichtigt. Durch die sozio-technischen Systeme der Entstehung und Nutzung stehen die technischen Systeme stets in Wechselwirkung mit der Natur und Gesellschaft. Somit ist es bei der Entwicklung eines technischen Systems wichtig, die Bedingungen der sozio-technischen Systeme zu analysieren und die Folgen abzuschätzen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

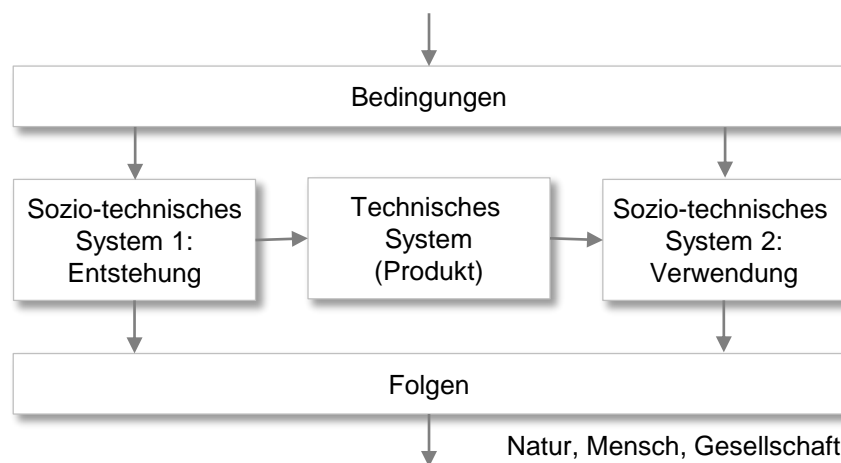


Abbildung 2.4: Produktentstehung und -Verwendung als sozio-technisches System nach ROPHOHL⁴¹

Aus diesen Überlegungen leitet sich ab, dass der Mensch als ein zentrales Systemelement der Produktentstehung betrachtet werden muss. Dieser zentrale Einfluss des Menschen auf die Produktentstehung wird von ALBERS aufgegriffen: Er sieht den Menschen im Mittelpunkt der Produktentstehung, der bei der Entwicklung neuer Methoden durchgängig und zwingend berücksichtigt werden muss.⁴²

⁴¹nach Ropohl, 2009.

⁴²Siehe z. B. Albers, 1994.; Albers, 2010. oder Albers, Maul & Bursac, 2013.

Die entwickelten Methoden der Produktentwicklung können in Prozesse integriert werden, um ihre Anwendung zu fördern. Im Folgenden werden unterschiedliche Prozessmodelle vorgestellt.

2.1.2 Prozessmodelle

In diesem Kapitel wird das sozio-technische System der Produktentstehung anhand von unterschiedlichen Prozessmodellen näher betrachtet. Dazu wird zunächst auf den Stage-Gate-Ansatz als managementorientiertes Modell eingegangen. Anschließend werden mithilfe der VDI-Richtlinien 2206 und 2221 entwicklerorientierte Modelle vorgestellt. Darüber hinaus wird die Notwendigkeit von Iterationen in Entwicklungsprozessen dargestellt und auf Scrum als agilen Ansatz eingegangen. Anhand des iPeM werden diese unterschiedlichen Sichtweisen zusammengeführt.⁴³

Stage-Gate-Ansatz als managementorientiertes Modell

Beim Stage-Gate-Ansatz⁴⁴ handelt es sich um ein managementorientiertes Modell von Produktentstehungsprozessen. Dazu werden in einem Phasenmodell die Aktivitäten entlang einer Zeitachse dargestellt. Es werden Phasen (engl. stages) definiert, welche von Meilensteinen (engl. gates) voneinander getrennt werden. Zu den Meilensteinen erfolgen Projektreviews. Im Prozessmodell wird beschrieben, welche Ergebnisse zu diesen Zeitpunkten vorliegen sollten, um die nächste Phase zu erreichen. Unterschiedliche Generationen von Stage-Gate-Ansätzen sind in Abbildung 2.5 dargestellt.⁴⁵

COOPER beschreibt mit der ersten Generation den von der NASA in den 1960er Jahren entwickelten PPP-Ansatz⁴⁷. Dieser Ansatz ist stark von einer Auftraggeber- und Zulieferer-Sichtweise geprägt, wonach jede Phase als Kunde der vorhergehenden Phase betrachtet wird. Dies hat eine Fokussierung auf das Ergebnis jeder Phase zur Folge, wodurch alle Aufgaben zum Ende einer Phase erledigt sein müssen, um mit der nächsten Phase beginnen zu können. Neben den zeitlichen Verzögerungen durch das War-

⁴³Für eine ausführliche Betrachtung von Produktentstehungsmodellen siehe z. B. Braun, 2013.

⁴⁴Cooper, 1990.

⁴⁵Cooper, 1994.

⁴⁶Cooper, 1994. Darstellung nach Meboldt, 2009.

⁴⁷PPP steht für „phased project planning“

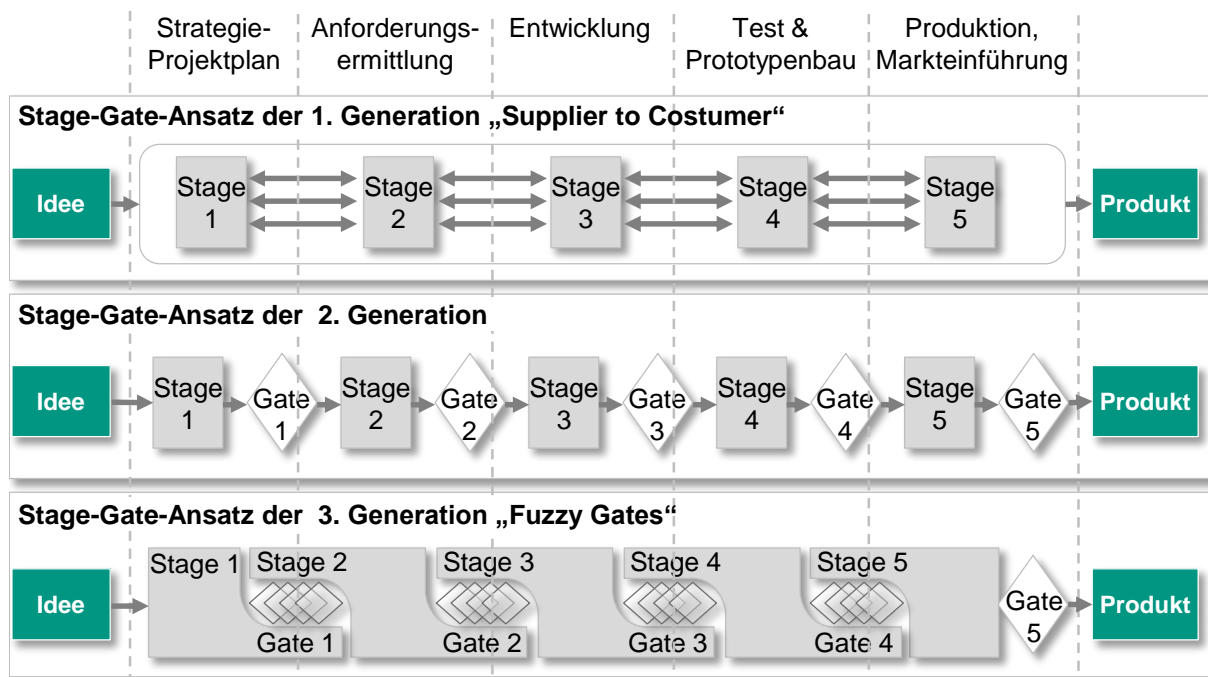


Abbildung 2.5: Stage-Gate-Ansatz nach COOPER⁴⁶

ten auf einzelne Ergebnisse, kritisiert COOPER die Konzentration auf ausschließlich technische Aspekte.⁴⁸

Die zweite Generation von Stage-Gate Prozessmodellen ist durch eine stärkere Berücksichtigung von nicht-technischen Erfolgsfaktoren wie z. B. Marketing in den Phasenreviews geprägt. Dadurch wird eine stärkere Marktorientierung forciert und die Chancen des Produkterfolgs erhöht. Außerdem werden einzelne Aktivitäten in den Phasen parallelisiert. Dies erhöht den Abstimmungsaufwand, kann aber gleichzeitig eine Zeitersparnis ermöglichen. Eine Überlappung der Phasen ist aber nach wie vor nicht möglich.⁴⁹

Das Potential zur Zeitersparnis durch überlappende - statt sequenzielle - Phasen stellen auch TAKEUCHI & NONAKA vor (siehe Abb. 2.6) und bilden damit 1986 die Basis für eine agile Produktentwicklung.⁵⁰

⁴⁸Cooper, 1994.

⁴⁹vgl. Cooper, 1994. und Braun, 2013.

⁵⁰Takeuchi & Nonaka, 1986.

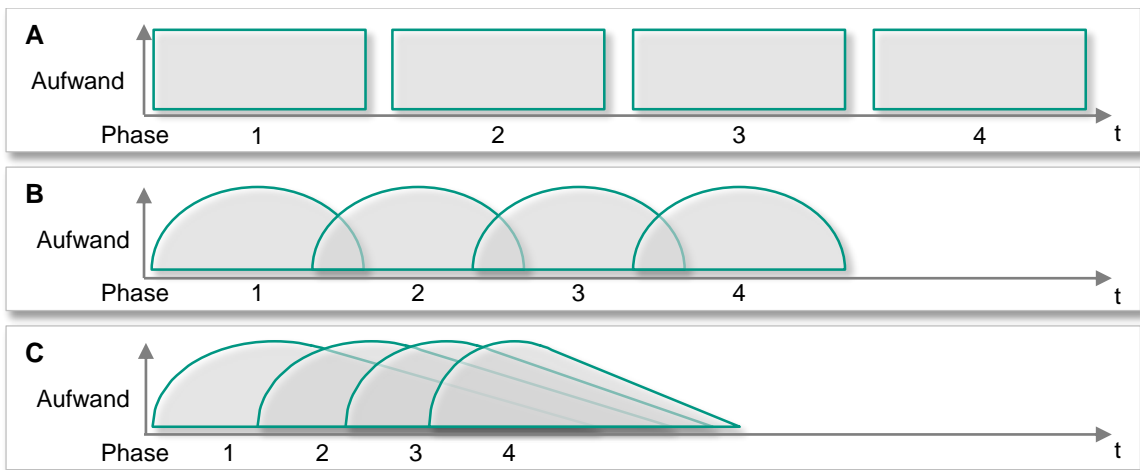


Abbildung 2.6: Sequenzielle (A) und überlappende Phasen (B & C) nach TAKEUCHI⁵¹

Dieses Konzept wird von COOPER durch die dritte Generation der Stage-Gate Prozesse beschrieben. Dadurch wird es ermöglicht, Aktivitäten aus späteren Phasen zu beginnen, bevor die vorherige Phase beendet ist. Außerdem werden unvorhergesehene Planänderungen durch eine flexiblere Gestaltung der Gates besser berücksichtigt. Ein zentrales Element spielen hierbei die „Fuzzy-Gates“, welche auf die jeweiligen Situationen im Produktentstehungsprozess angepasst werden können.⁵²

VDI-Richtlinie 2221

In der vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) herausgegebenen Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ ist es ebenfalls vorgesehen, den Produktentwicklungsprozess in Phasen zu unterteilen. Diese können branchen- und projektspezifisch ausgeprägt werden. Darüber hinaus sind sieben Arbeitsschritte und zugehörige Ergebnisse in der Richtlinie vorgesehen.⁵³ Diese sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

⁵¹nach Takeuchi & Nonaka, 1986.

⁵²Cooper, 1994.

⁵³VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 1993.

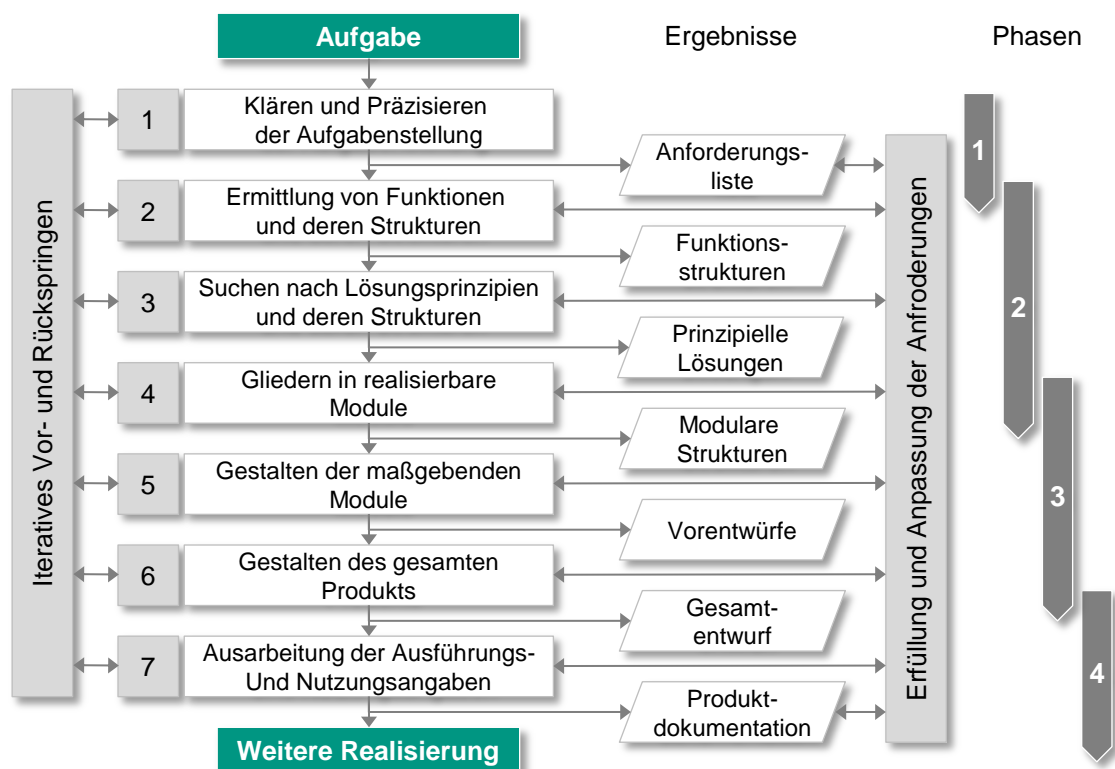


Abbildung 2.7: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach der VDI-Richtlinie 2221⁵⁴

Obwohl die VDI-Richtlinie in der Ingenieurausbildung weit verbreitet ist, wird sie sowohl in der industriellen Praxis als auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen häufig kritisiert und findet selten Anwendung.⁵⁵

Ein häufiger Kritikpunkt an der Richtlinie ist die sequentielle Anordnung der Entwicklungsschritte. Zwar wird ein iteratives Vor- und Zurückspringen grundsätzlich berücksichtigt, jedoch nicht ausreichend thematisiert.⁵⁶ Ein weiterer Kritikpunkt wird in der isolierten Betrachtung von Funktions- und Gestaltmodellen gesehen, da sich diese in hohem Maß gegenseitig beeinflussen. Es hat sich in empirischen Untersuchungen erwiesen, dass die Entwicklung von reinen Funktionsstrukturen für die Systemkonstruktoren zu abstrakt ist.⁵⁷

⁵⁴nach VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 1993.

⁵⁵Daher befindet sich die VDI-Richtlinie 2221 derzeit in einer grundlegenden Überarbeitung. vgl. Mantwill, 2014.

Dabei fließen die im Folgenden vorgestellten Aspekte, wie Iterationen und der Grundgedanke des iPeM - unter Mitarbeit von ALBERS und des Autors der vorliegenden Arbeit - in die Überarbeitung der Richtlinie ein.

⁵⁶Weiß, 2006.

⁵⁷Albers & Wintergerst, 2013. sowie Matthiesen, 2002.

VDI-Richtlinie 2206

Die ebenfalls vom VDI herausgegebene Richtlinie 2206 wurde für mechatronische Systeme eingeführt.⁵⁸ Unter Mechatronik wird ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften verstanden, welches auf den klassischen Disziplinen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informatik basiert.⁵⁹ Durch die gemeinsame Betrachtung der Disziplinen können emergente Phänomene erzielt werden.⁶⁰ In der VDI-Richtlinie wird dabei der Schwerpunkt auf folgende drei Ebenen gelegt:⁶¹

- Problemlösungszyklus als Mikrozyklus
- Das V-Modell als Makrozyklus
- Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte

Problemlösungszyklen sind im SE verbreitet und bereits in Arbeiten von HALL in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts zu finden.⁶² Sie können in der Regel in drei Hauptschritte unterteilt werden. Die Schritte beschreiben das Vorgehen zur Zielsuche, Lösungssuche und Lösungsauswahl. Der in der Richtlinie vorgeschlagene Problemlösungszyklus beschreibt eine Problemlösungsmethode nach DAENZER & HUBER, welche die Problemlösung systematisch in die Teilschritte unterteilt: Situationsanalyse, Zielformulierung, Lösungsfindung (durch abwechselnde Synthese und Analyse), Bewertung der Lösung sowie Auswahl und Entscheidung.⁶³ Diese Teilschritte werden in der Richtlinie um den Schritt „Planen des weiteren Vorgehens und Lernen“ ergänzt.⁶⁴

Der Makrozyklus wird mithilfe des sogenannten V-Modells beschrieben, welches in Abbildung 2.8 dargestellt ist.

⁵⁸VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2004.

⁵⁹Schweitzer, 1989.

⁶⁰Isermann, 1999.

⁶¹VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2004.

⁶²Hall, 1962.

⁶³Daenzer & Huber, 1994.

⁶⁴VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2004.

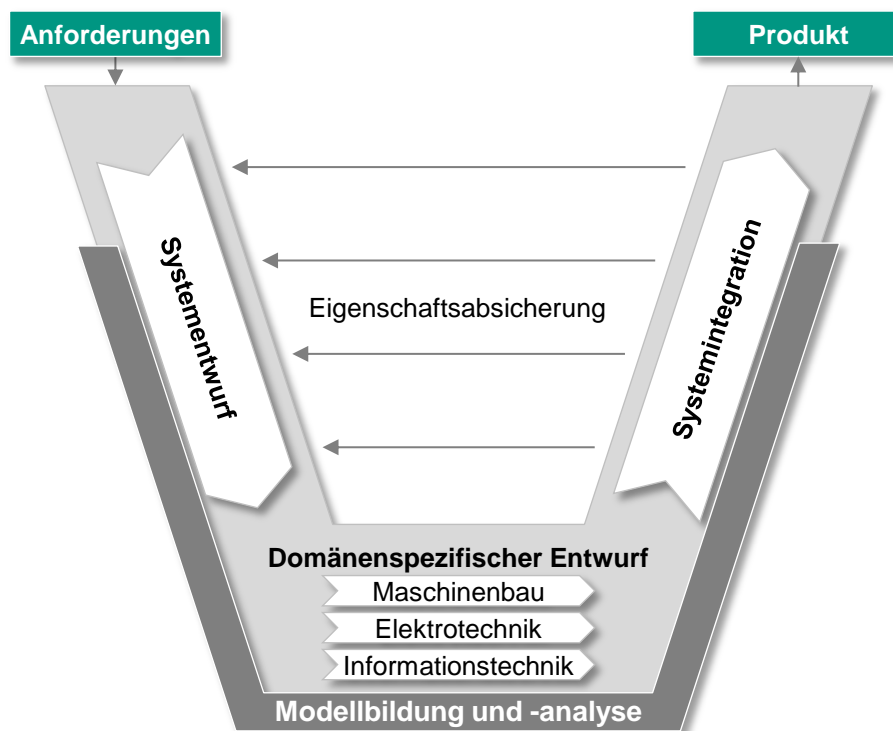


Abbildung 2.8: V-Modell als Makrozyklus nach der VDI-Richtlinie 2206⁶⁵

Im Makrozyklus der VDI-Richtlinie 2206 werden zu Beginn die Anforderungen an das Produkt definiert und Testfälle für die Validierung abgeleitet. Anschließend wird im „Systementwurf“ die Gesamtfunktion in Teilfunktionen untergliedert und Wirkprinzipien zugeordnet. Im nächsten Schritt - dem „domänenspezifischen Entwurf“ - werden die Lösungskonzepte in den Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik weiter konkretisiert. Darauf folgend werden in der „Systemintegration“ die Ergebnisse der Teilsysteme zum Gesamtsystem integriert. Mit zunehmender Produktreife können die Eigenschaften des Gesamtsystems anhand der Anforderungen überprüft werden. Dabei wird betont, dass in der Regel mehrere Durchläufe des Makrozyklus notwendig sind, um komplexe mechatronische Produkte zu entwickeln.⁶⁶

Kritikpunkte zu dieser Vorgehensweise ergeben sich aus diversen Arbeiten. Neben den Vorbehalten zur Trennung von Funktion und Gestalt⁶⁷ werden anstelle eines „domänenspezifischen Entwurfs“ integrierende Vorgehensweisen gefordert, um emergente Effekte zu erzielen.⁶⁸ Außerdem stellt MUSCHIK fest, dass Anforderungen zu Projektbeginn aufgrund hoher Unsicherheiten nicht mühelos abgeleitet werden können.⁶⁹ Stattdes-

⁶⁵nach VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2004.

⁶⁶VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 2004.

⁶⁷vgl. Absatz 2.1.2 - VDI-Richtlinie 2221

⁶⁸Hellenbrand, 2013.

⁶⁹Muschik, 2011.

sen muss nach ALBERS das zunächst vage Zielsystem während des Produktentstehungsprozesses kontinuierlich weiterentwickelt werden. Dabei spielt die Validierung eine zentrale Rolle in der Produktentstehung; sie dient dem Wissenszuwachs und trägt dazu bei, das Zielsystem weiterzuentwickeln. Daher sollte sie nicht auf spätere Phasen verlagert und von der Entwicklung getrennt werden, sondern in iterativen Vorgehensweisen mitberücksichtigt werden.⁷⁰ Im folgenden Abschnitt wird mit Scrum auf einen iterativen Ansatz näher eingegangen.

Iteratives Vorgehen am Beispiel von Scrum

Die Notwendigkeit von iterativen Vorgehen ist in den vorherigen Kapiteln angedeutet worden und soll im Folgenden näher betrachtet werden. Exemplarisch wird dies an dem iterativen Ansatz „Scrum“ vorgestellt.

Unter Iterationen in der Produktentwicklung wird nicht die reine Wiederholung einer Tätigkeit verstanden, wie beispielsweise in der Montagefertigung. Stattdessen dienen Iterationen in der Produktentwicklung der Sammlung und Verarbeitung von Informationen sowie dem Erkennen und Umsetzen von Entwicklungswegen.⁷¹

WYNN et al. unterscheiden hierbei sechs verschiedene Formen von Iterationen in Produktentstehungsprozessen. Diese sind in Abbildung 2.9 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.⁷²

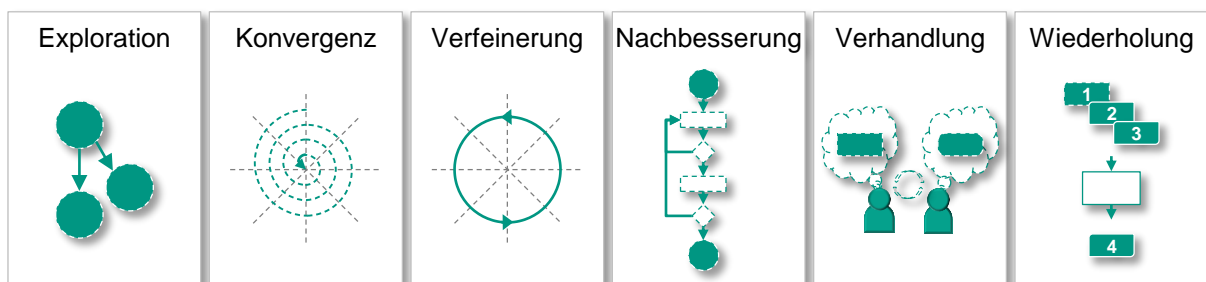


Abbildung 2.9: Sechs Sichtweisen auf Iterationen im PEP nach WYNN et al.⁷³

- Explorations-Iteration: Erkunden der Problem- und Lösungsräume
- Konvergenz-Iteration: Annäherung an einen definierten Zielzustand
- Verfeinerungs-Iteration: Optimierung von Merkmalen

⁷⁰vgl. z. B. Albers, 2010.; Albers & Medoldt, 2007. und Albers, Burkardt, Meboldt & Saak, 2005.

⁷¹Costa & Sobek, 2003.

⁷²Wynn, Eckert & Clarkson, 2007.

⁷³nach Wynn, Eckert & Clarkson, 2007.

- Nachbesserungs-Iteration: Anpassung an geänderte Randbedingungen
- Verhandlungs-Iteration: Klärung von Zielkonflikten
- Wiederholungs-Iteration: Ähnliches Vorgehen für neue Ziele anwenden

Bei der Betrachtung von Iterationen können zwei verschiedene Sichtweisen beschrieben werden: Einerseits werden Iterationen als unproduktive Nacharbeit aufgrund von fehlerhafter Entwicklung angesehen und andererseits als Notwendigkeit die Komplexität von Entwicklungsaufgaben systematisch verstehen und bewältigen zu können.⁷⁴ Diese Sichtweisen ordnen MEBOLDT et al. der Management- und der Entwicklersicht zu. Während die Entwicklersicht davon geprägt ist, dass jeder Produktentstehungsprozess einzigartig ist⁷⁵ und die auftretenden Probleme sich unterscheiden, kann der Produktentstehungsprozess aus Managementsicht als ein verbindlicher Standard beschrieben werden. Dieser ist essentiell, um die Ressourcen und Investitionen im Unternehmen zu steuern.⁷⁶ Um beide Sichtweisen näher zusammenzubringen werden Modelle und Vorgehensweisen benötigt, welche die Notwendigkeit von Iterationen aufzeigen und ihren Mehrwert, z. B. durch die Zunahme des Reifegrads, erklären.⁷⁷

Bei „Scrum“ handelt es sich um einen agilen Ansatz im Bereich der Softwareentwicklung. Ziel ist es, die häufig komplexen und schlecht im Vorhinein planbaren Entwicklungsaufgaben in kleinere Umfänge zu unterteilen und nacheinander abzuarbeiten. Das Scrum Framework ist in Abbildung 2.10 dargestellt.⁷⁸

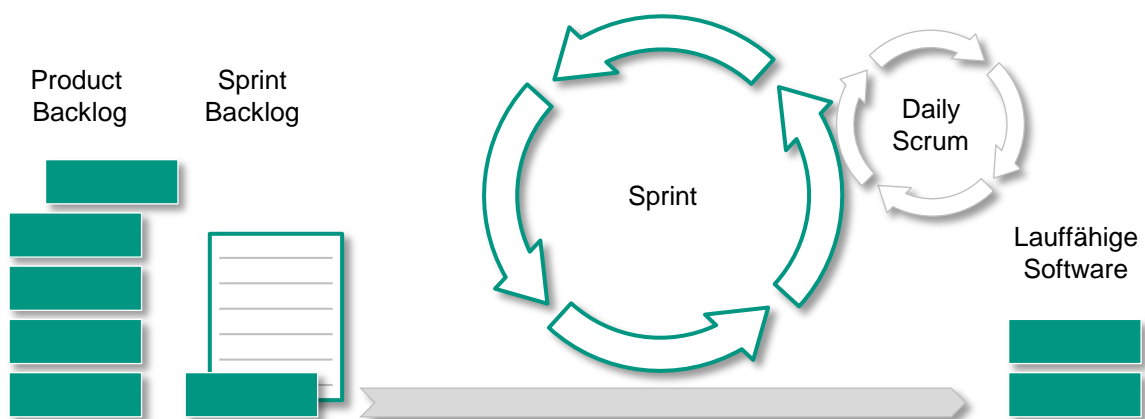


Abbildung 2.10: Scrum Framework nach SCHWABER⁷⁹

⁷⁴vgl. Albers, 1994. und Wynn, Eckert & Clarkson, 2007.

⁷⁵vgl. Albers, 2010.

⁷⁶Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer, 2012.

⁷⁷Krehmer, Meerkamm & Wartzack, 2009.

⁷⁸Schwaber & Sutherland, 2013.

⁷⁹nach Schwaber, 2004.

Die Intention bei iterativen Ansätzen ist, die zu Beginn unklaren Ziele und Lösungsansätze sukzessive zu konkretisieren. Dazu wird das Zielsystem des Produkts (bei Scrum „Product Backlog“ genannt) kontinuierlich weiterentwickelt. Die Ziele werden priorisiert und einzelne für einen Entwicklungszyklus („Sprint“ genannt) ausgewählt. Der Zyklus dauert maximal einen Monat und hat zum Ziel eine lauffähiges Inkrement des Produkts (z. B. der Software) dem Kunden zur Verfügung zu stellen. Zur Realisierung der ausgewählten Ziele werden Aktivitäten identifiziert und in einem Projektplan („Sprint Backlog“) detailliert. Dabei sollten die Aktivitäten nicht länger als einen Tag dauern. Die nächsten Aktivitäten werden jeden Morgen in einer 15 minütigen Besprechung („Daily Scrum“) im Entwicklerteam abgestimmt. Scrum ist für Entwicklerteams von mindestens drei bis höchstens neun Entwicklern geeignet. Hierbei werden die Rollen des Projektleiters („Product Owner“), des Methodenexperten („Scrum Master“) und der Entwickler unterschieden.⁸⁰ Dadurch eignet sich Scrum als eine Methode zur Projektierung des operativen Vorgehens in kleinen Entwicklungsteams.

CARLSON & TURNER stellen in einem Review von agilen Fallstudien, die nicht Software als Entwicklungsgegenstand haben, fest, dass die Übertragbarkeit der iterativen Ansätze grundsätzlich gegeben ist. Dabei erscheint die frühzeitige Validierung von funktionsfähigen Umfängen als ein zentraler Aspekt, um Informationen im Produktentstehungsprozess zu generieren. So können die üblichen Nachbesserungen und Projektverlängerungen vermieden werden, welche häufig dadurch entstehen, dass die Teilsysteme erst spät integriert werden. Darüber hinaus werden Potentiale in der selbstbestimmten Arbeitsweise der Entwickler sowie durch ein dynamisches und sich weiterentwickelndes Zielsystem gesehen.⁸¹

Eine Herausforderung in der Domäne des Maschinen- und Fahrzeugbaus liegt in der Wahl der Inkrementgröße und der Überprüfbarkeit der Inkrementergebnisse.⁸² Während in der Softwareentwicklung keine Bauraumkonflikte vorliegen und eine zusätzliche Funktionalität an bereits umgesetzte Inkremente „angeflanscht“ werden kann, ist bei der Entwicklung von Hardwarekomponenten eine frühzeitige Modellierung des Gesamtsystems notwendig. Dadurch wird vor allem in umfangreichen Entwicklungsprojekten, wie (z. B. der Entwicklung eines Fahrzeugs) erschwert, dem Kunden funktionsfähige Inkremente am Ende eines Sprints vorzustellen.

Ein Lösungsansatz zur frühzeitigen Modellierung des Gesamtsystems bietet die Nutzung von Komponenten und Informationen aus vorherigen Produktgenerationen.⁸³ Im

⁸⁰Schwaber & Sutherland, 2013.

⁸¹Carlson & Turner, 2013.

⁸²Braun, 2013.

⁸³vgl. Abramovici & Lindner, 2011. und Albers, Bursac, Reiß & Rachenkova, 2015.

Rahmen der „Karlsruher Schule“ werden Ansätze aufgezeigt, welche eine agile Vorgehensweisen ermöglichen. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Das integrierte Produktentstehungsmodell der „Karlsruher Schule“

Das iPeM - integrierte Produktentstehungsmodell⁸⁴ ist ein Framework zur Beschreibung der Produktentstehung, sowohl aus Management- als auch aus Entwicklersicht. Es basiert auf der Systemtheorie der Technik und ermöglicht eine Abbildung der vorgestellten Modelle. Dazu werden im Folgenden die zentralen Elemente des iPeM näher vorgestellt.

ZHO-System Die Grundlage des iPeM bildet das so genannten ZHO-Modell. Dabei wird die Produktentstehung mithilfe der drei miteinander wechselwirkenden Systeme Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem beschrieben (vgl. Abbildung 2.11).



Abbildung 2.11: ZHO-Modell bestehend aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem⁸⁵

Diese Einteilung lässt sich auf ROPOHL zurückführen. Er beschreibt die Produktentstehung als die Erstellung von technischen Systemen (als Sachsystem bezeichnet), mithilfe von Maßnahmen und Einrichtungen (Handlungssystem) auf Basis von Vorgaben (Zielsystem). Das Systemtripler stellt er als ein Regelkreis der Entwicklungstätigkeit dar.⁸⁶ Diese systemtheoretische Betrachtungsweise des Entwicklungsprozesses bildet die Basis für weitere Arbeiten⁸⁷ und wird von ALBERS für nachfolgende Definitionen verwendet.⁸⁸

⁸⁴Albers & Medoldt, 2007.

⁸⁵nach Albers & Medoldt, 2007.

⁸⁶Ropohl, 2009.

⁸⁷vgl. z. B. Patzak, 1982; Negele, 2006; Ehrlenspiel, 2009; Browning, Fricke & Negele, 2006.

⁸⁸Albers & Braun, 2011; Ziel- und Objektsystem übersetzt nach Ebel, 2015; Handlungssystem übersetzt nach Lohmeyer, 2013.

Definition 3: Zielsystem

Ein vollständiges Zielsystem beinhaltet alle relevanten Ziele, deren Wechselwirkungen, Randbedingungen und Begründungen, die für die Entwicklung des richtigen Produkts erforderlich sind.

Definition 4: Handlungssystem

Das Handlungssystem ist ein sozio-technisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist. Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem, beide Systeme sind durch das Handlungssystem miteinander verbunden.

Definition 5: Objektsystem

Das Objektsystem enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben Zwischenprodukten (z.B. Zeichnungen oder Prototypen) eines der Elemente des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentstehungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Synthese neue Ziele ab. Endergebnis eines Produktentstehungsprozesses ist neben dem eigentlichen Produkt auch die Summe aller Zwischenergebnisse im Objektsystem, das vollständige Zielsystem und nicht zuletzt das gesammelte Erfahrungswissen im Handlungssystem aus der Durchführung und Reflexion des Prozesses.

Auf Basis der vorgestellten Definitionen werden sowohl das Zielsystem als auch das Objektsystem als ein dynamisches System verstanden, welche iterativ während der Produktentstehung weiterentwickelt werden. Das iterative Vorgehen kann mithilfe des erweiterten ZHO-Systems beschrieben werden.

Das erweiterte ZHO-System Um den iterativen Charakter der Produktentwicklung abzubilden, wurde das Systemtripel von ALBERS & LOHMEYER um die elementaren Entwicklungsaktivitäten Analyse und Synthese erweitert. Das Handlungssystem wird dabei aus Sicht individueller Personen aufgefasst, welche eine Wissensbasis besitzen

und einen Lösungsraum erfassen können.⁸⁹ Das erweiterte ZHO-Modell wird in Abbildung 2.12 dargestellt.

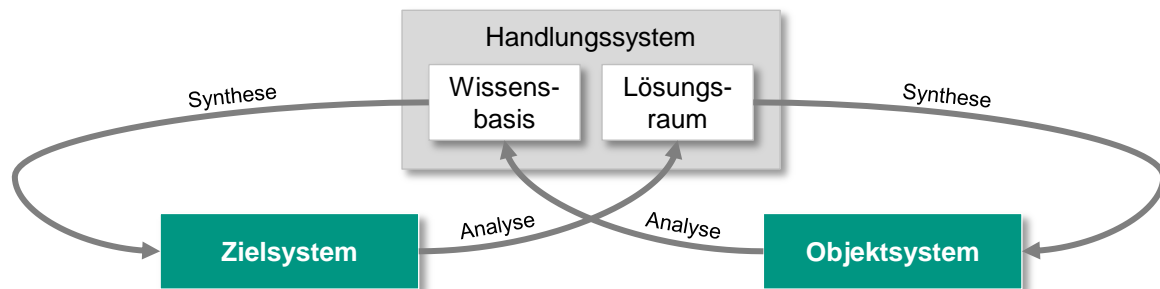


Abbildung 2.12: Das erweiterte ZHO-Modell nach ALBERS et al.⁹⁰

Die Wissensbasis steht für die Gesamtheit des fallspezifischen Wissens in einem Produktentstehungsprozess. Der Lösungsraum beschreibt die Menge der zulässigen Lösungen einer Problemsituation, welche durch die Freiheitsgrade anhand von Zielen und Randbedingungen eingegrenzt werden. Dabei entwickeln sich Zielsystem, Objektsystem und Handlungssystem (bestehend aus Wissensbasis und Lösungsraum) kontinuierlich weiter. So entsteht durch die Analyse bestehender Produkte Wissen. Dieses kann genutzt werden, um ein initiales Zielsystem zu synthetisieren. Auf Basis des Zielsystems wird der Lösungsraum definiert und es kann eine Synthese erster Ergebnisse entstehen. Diese Ergebnisse können wiederum analysiert werden, um die Wissensbasis zu erweitern und das Zielsystem weiter zu detaillieren.⁹¹ So können Ziele beispielsweise im Härtegrad und Reifegrad weiterentwickelt werden. Der Härtegrad beschreibt dabei, ob notwendige Entscheidungen gefällt wurden und der Reifegrad, wie fundiert das Ziel ist.⁹²

Um das Ziel- und das Objektsystem systematisch weiterzuentwickeln, bieten sich Problemlösungsmethoden an. Im Folgenden wird die Problemlösungsmethode SPALTEN vorgestellt.

SPALTEN als Problemlösungsmethode SPALTEN ist ein Akronym und steht für die Aktivitäten der Problemlösung:⁹³

- Situationsanalyse,

⁸⁹Albers & Lohmeyer, 2012.

⁹⁰nach Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012.

⁹¹Lohmeyer, 2013.

⁹²Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012.

⁹³Albers, Burkardt, Meboldt & Saak, 2005 und Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016, eingereicht.

- Problemeingrenzung,
- Alternative Lösungen,
- Lösungsauswahl,
- Tragweitenanalyse,
- Entscheiden und Umsetzen,
- Nachbereiten und Lernen

Dabei durchläuft das Problemlösungsteam systematisch die Teilschritte, welche sich der Problemanalyse, der Lösungssuche und der Lösungsumsetzung zuordnen lassen.⁹⁴ Die Problemlösungsmethode besitzt einen fraktalen Charakter, die einzelnen Aktivitäten lassen sich wiederum mithilfe von SPALTEN unterteilen und methodisch lösen.⁹⁵

Handlungsfelder der Produktentstehung Die Aktivitäten der Produktentstehung beschreiben Cluster von unterschiedlichen Aufgabenfeldern.⁹⁶ Diese werden in klassischen Modellen häufig als sequentielle Abfolge aufgefasst. Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen den Aktivitäten der Produktentstehung besteht die Gefahr, dass notwendiges Wissen erst am Ende der Produktentstehung durch die Validierung generiert wird. Daher werden agile Ansätze benötigt, welche eine parallele und iterative Vorgehensweise erlauben.⁹⁷ Schematisch ist dieser Sachverhalt anhand des Projektfortschritts in Abbildung 2.13 dargestellt.

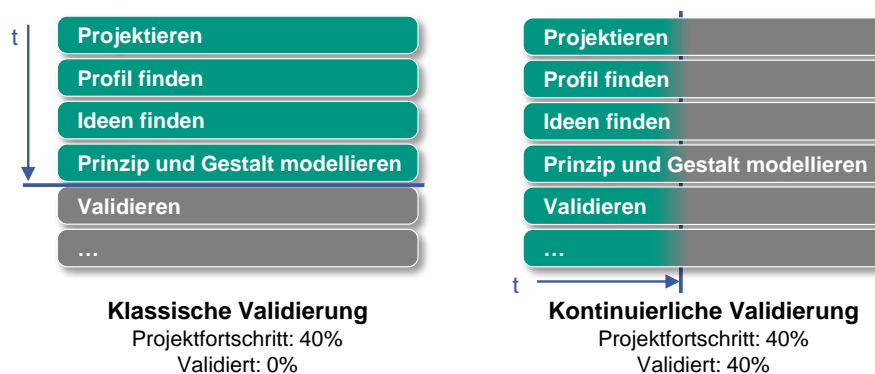


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung des Projektfortschritts bei klassischer und kontinuierlicher Validierung⁹⁸

⁹⁴Albers, Burkardt, Meboldt & Saak, 2005.

⁹⁵Albers, Braun & Muschik, 2010.

⁹⁶Braun, 2013.

⁹⁷Albers, Sadowski & Marxen, 2011.

⁹⁸nach Albers & Braun, 2011.; Darstellungsform in Anlehnung an Rasmusson, 2010.

Das in Abschnitt 2.1.2 diskutierte Problem der Validierung von Teilumfängen in der Domäne des Maschinen- und Fahrzeugbaus sowie der Mechatronik kann durch die Verwendung der IPEK-X-in-the-Loop (IPEK-XiL) Methodik gelöst werden. Dazu werden die Teilumfänge, welche sich in der Entwicklung befinden, als „System-in-Development“ bezeichnet und während der Entwicklung in das Supersystem eingebunden, um frühzeitig Erkenntnisse für die weitere Produktentwicklung zu gewinnen. Dabei wird die virtuelle und physische Modellbildung gekoppelt, um das dazugehörige Supersystem abzubilden. Auf diese Weise werden die relevanten Elemente des Supersystems (z.B. Bediener) modelliert und mit dem zu entwickelnden System gekoppelt.⁹⁹ Bei einer konsequenten Entwicklung in Produktgenerationen sind diese Modelle zum Teil vorhanden und können übernommen bzw. variiert werden.¹⁰⁰ So wird in Analogie zur „Beta-Version“ in der Softwareerprobung eine entwicklungsbegleitende Validierung ermöglicht; man spricht hierbei von „Test-based-Development“. Durch die Validierung werden neue Informationen im Entwicklungsprozess generiert und Entwicklungsaktivitäten ausgelöst. Dies wird als das „Pull-Prinzip“ der Validierung bezeichnet.¹⁰¹

Zur Unterstützung von agilen Prozessen werden Produktentstehungsmodelle benötigt, welche die beschriebenen Elemente beinhalten und abbilden können. Hierzu wird im Folgenden das integrierte Produktentstehungsmodell vorgestellt.

Das integrierte Produktentstehungsmodell Die zeitliche Abfolge von Produktentstehungsprozessen kann im dynamischen Phasenmodell abgebildet werden. Dabei werden das Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodell unterschieden. Im Referenzmodell können auf Basis von Erfahrungen wiederkehrende Prozesse abgebildet werden. Diese dienen als Grundlage für die konkrete Planung eines Projekts unter den jeweils gegebenen Randbedingungen im Implementierungsmodell. Mithilfe des Anwendungsmodells wird der tatsächliche Verlauf des Projekts beschrieben. Durch den Abgleich zwischen Implementierungs- und Anwendungsmodell kann der Projektfortschritt überprüft und ggf. angepasst werden. Durch die konsequente Modellierung von Implementierungs- und Anwendungsmodellen kann das Referenzmodell verfeinert werden.¹⁰²

Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Elemente Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem, Problemlösungsmethode „SPALTEN“, Aktivitäten der Produktentstehung und Phasenmodell werden im iPeM zusammengefasst (vgl. Abb. 2.14). Da-

⁹⁹Albers, Behrendt, Schroeter, Ott & Klingler, 2013.

¹⁰⁰Albers, Bursac & Behrendt, 2015.

¹⁰¹Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015.

¹⁰²vgl. Albers & Braun, 2011; Braun, 2013; Meboldt, 2009.

durch ist es möglich, die generischen Aktivitäten der Produktentstehung und die dynamischen Phasen zu koppeln.

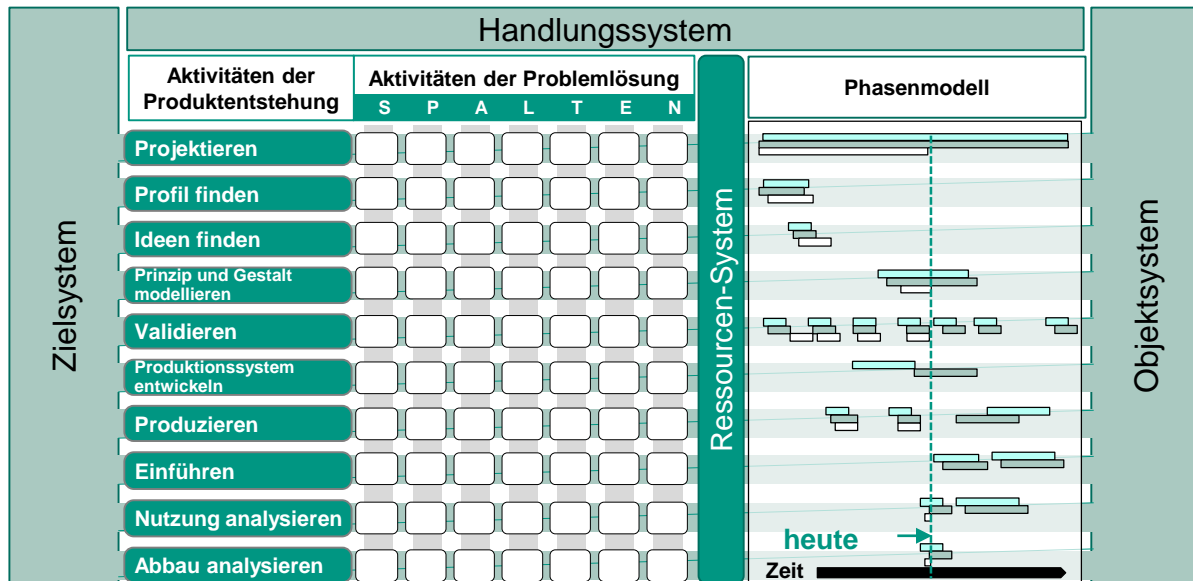


Abbildung 2.14: iPeM - integriertes Produktentstehungsmodell nach ALBERS¹⁰³

Durch das iPeM kann einerseits das Management bei der Planung des Produktentstehungsprozesses im dynamischen Phasenmodell unterstützt werden. Andererseits kann der Produktentwickler bei der Arbeit unterstützt werden, da durch das Phasenmodell das weitere Vorgehen und über die Aktivitätenmatrix die dazugehörigen Methoden empfohlen werden. Diese situationsspezifische Methodenempfehlung ist exemplarisch in der Applikation InnoFox umgesetzt.¹⁰⁴ Auf diese Weise können neu entwickelte Methoden in die Software implementiert und für die Entwicklungspraxis zur Verfügung gestellt werden.¹⁰⁵ Darüber hinaus bietet das iPeM einen Rahmen und eine Grundlage für diverse Forschungsarbeiten der Karlsruher Schule.

Abstraktionsgrade des iPeM Neben den vorgestellten Meta-, Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodell-Modell kann in einer zweiten Dimension die Individualität der Modelle aufgetragen werden. Dabei wird zwischen generell, domänenspezifisch und produktspezifisch unterschieden. Dies kann nach ALBERS & MUSCHIK auf Basis unterschiedlicher Abstraktionsgrade erfolgen. Die Abstraktionsgrade des iPeM sind in Abbildung 5.2 dargestellt.¹⁰⁶

¹⁰³nach Albers & Braun, 2011.

¹⁰⁴Albers, Reiß, Bursac, Walter & Gladysz, 2015.

¹⁰⁵vgl. z. B. Albers, Maul, Bursac & Heismann, 2015 oder Albers, Bursac, Maul & Mair, 2014.

¹⁰⁶Albers & Muschik, 2010.

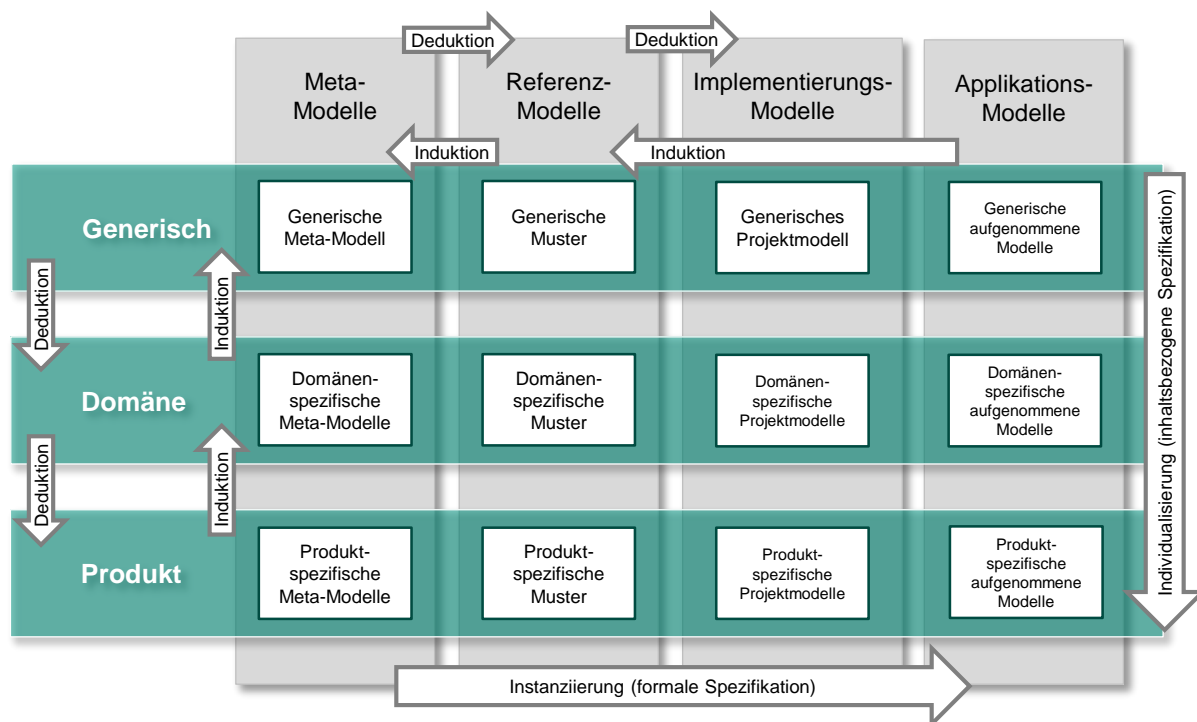


Abbildung 2.15: Abstraktionsgrade des iPeM¹⁰⁷

Mithilfe der Individualitäts-Dimension kann beschrieben werden, wie das generische Meta-Modell, welches sich für die Anwendung in unterschiedlichen Domänen eignet, in einem konkreten Projekt nutzbar gemacht werden kann. Dazu wird aus dem generellen Meta-Modell ein domänen- und projektspezifisches Meta-Modelle abgeleitet. Diese folgen den Regeln des generellen Meta-Modells, können aber im Kontext der jeweiligen Domäne bzw. des jeweiligen Projekts angepasst werden. Auf Ebene der Domäne wird beispielsweise die Anpassung des Meta-Modells für die Entwicklung von Fahrzeugen auf Methoden reduziert, welche sich für die Fahrzeugentwicklung eignen. Analog kann auf Produktebene das Meta-Modell für die Entwicklung eines spezifischen Fahrzeugs dargestellt werden.¹⁰⁸

2.1.3 Produktmodelle

Eine weitere Art von Modellen, die im Rahmen der Produktentwicklung verwendet werden, sind Produktmodelle. Diese werden u. a. erstellt, um den aktuellen Entwicklungsstand zu explizieren. Somit dienen sie als Kommunikationsgrundlage und unterstützen die Analyse des Objektsystems zur Erweiterung der Wissensbasis.¹⁰⁹ Dadurch wird

¹⁰⁷nach Albers & Muschik, 2010.

¹⁰⁸Albers & Muschik, 2010.

¹⁰⁹Andreasen, 1994.

ein iteratives Vorgehen erleichtert. Die Produktmodelle werden im Objektsystem abgelegt und verwaltet.¹¹⁰

Ein Beispiel für Produktmodelle, welche die Gestalt und Funktion verknüpfen, sind Contact und Channel Approach (C&C²-A) Modelle. Sie setzen sich aus den Elementen Wirkflächenpaare, Leitstützstrukturen und Connectoren zusammen. Sie sind beispielhaft in Abbildung 2.16 dargestellt. Dabei wird die Summe aller Leitstützstrukturen als Tragstruktur bezeichnet.¹¹¹

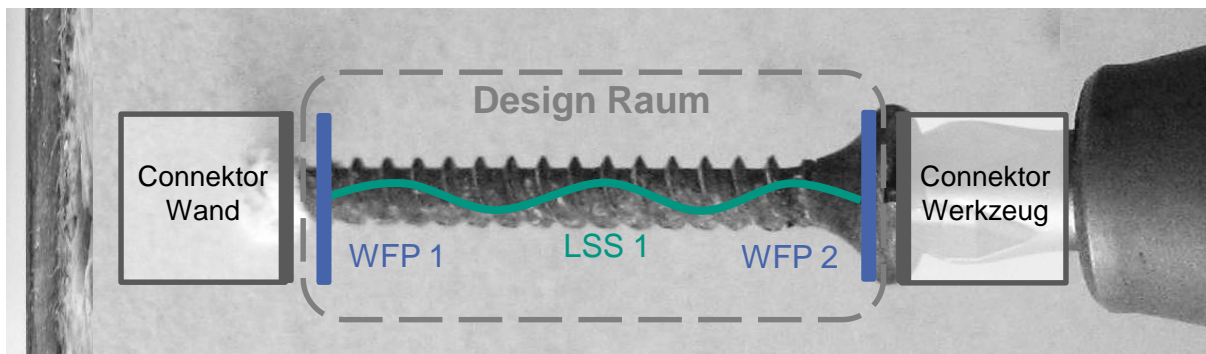


Abbildung 2.16: C&C²-A-Modell der Funktion Schraube in Wand drehen¹¹²

Während der Produktentwicklung entsteht eine Vielzahl heterogener Modelle, wie beispielsweise CAD-Modelle, Finite-Elemente-Modelle, Textdokumente wie Pflichten- und Lastenhefte sowie Tabellen und Stücklisten.¹¹³ Diese werden für einen bestimmten Zweck erstellt und in Wissensmanagementsysteme (WMS) verwaltet. So werden beispielsweise zur Verwaltung von Informationen aus Entwicklung, Produktion und dazugehörigen Dienstleistungen umfangreiche informationstechnische Lösungen des „Product Lifecycle Managements“ verwendet.¹¹⁴

Aufgrund des Reduktions-Dilemmas ist es jedoch eine große Herausforderung, diese heterogenen Modelle in iterativen Produktentwicklungsprozessen konsistent zu halten.¹¹⁵ Ein Ansatz, diesem Dilemma entgegenzuwirken, ist das MBSE.¹¹⁶ Hierbei wird ein domänenübergreifendes Modell erstellt, welches von den unterschiedlichen Stakeholdern bearbeitet werden kann. Dafür findet die Sprache Systems Modeling Lan-

¹¹⁰Albers & Lohmeyer, 2012.

¹¹¹vgl. Albers & Wintergerst, 2013. und Matthiesen, 2002.

¹¹²nach Albers & Wintergerst, 2013.

¹¹³vgl. z. B. Schabacker, Szélig & Vajna, 2013 sowie Szélig & Schabacker, 2012.

¹¹⁴Weiterführende Literatur z. B. in Abramovici & Sieg, 2002; Saaksvuori & Immonen, 2008 und Abramovici, Bellalouna & Neubach, 2009.

¹¹⁵vgl. Kapitel 2.1.1

¹¹⁶INCOSE Technical Operations, 2007.

guage (SysML) häufig Anwendung,¹¹⁷ welche auf der Meta Object Facility (MOF) basiert.¹¹⁸ Im Folgenden werden die Elemente MBSE, SysML und MOF näher vorgestellt.

Model Based Systems Engineering

Mit dem MBSE wird das Ziel verfolgt, einen Paradigmenwechsel in der Produktentwicklung von heterogenen, dokumentenzentrierten Produktmodellen hin zu einem konsistenten und vernetzten Produktmodell zu gestalten. Dabei wird der Begriff der modellbasierten Produktentwicklung bzw. des modellbasierten Systems Engineering (engl. Model Based Systems Engineering) verwendet. Im MBSE sollen Ergebnisse unterschiedlicher Aktivitäten der Produktentwicklung in einem Modell unterstützt und abgebildet werden. Dazu zählen die Aktivitäten der Zielsystembildung, der Modellierung von Prinzip und Gestalt sowie der Validierung.¹¹⁹

Bei der Systemmodellierung kommen drei wesentliche Elemente zum Einsatz: Sprache, Tool und Methode. Diese werden auch als Modellierungstripel bezeichnet und haben starke Wechselwirkungen untereinander. Die Sprachstandards geben die zu verwendenden Elemente sowie ihre Syntax vor. Tools werden verwendet, um die Modelle zu erstellen und zu verwalten. Methoden unterstützen bei der Modellierung, indem sie ein mögliches Vorgehen empfehlen.¹²⁰

Diverse Sprachstandards wurden zur Modellierung von Systemen herangezogen. Hierbei sind z. B. das „Function Flow Block Diagram“, die „Structured Analysis and Design Technique“ und die „Integration Definition for Function Modeling“ zu nennen.¹²¹ In den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde die Unified Modeling Language (UML) als grafische Modellierungssprache in der Softwareentwicklung konzipiert. Sie dient hierbei zur Beschreibung von Objekten, welche abgeschlossene Einheiten von Programmcode mit definiertem In- und Output darstellen und eine Wiederverwendung von Programmteilen ermöglichen.¹²² Auf Basis der UML entstand 2007 die SysML,

¹¹⁷Kaffenberger, Schulze & Weber, 2012.

¹¹⁸Tang, 2009.

¹¹⁹INCOSE Technical Operations, 2007.

¹²⁰Matthiesen, Schmidt, Moeser & Munker, 2014.

¹²¹Ramos, Ferreira & Barcelo, 2012.

¹²²Zingel, 2013.

mit dem Ziel, eine durch Tools unterstützte Standardsprache für das SE darzustellen.¹²³

Produktmodelle werden mit Tools modelliert. Diese können sowohl analog (Papier, Flipchart oder Whiteboard) als auch digital (Softwaretools wie Enterprise Architect, MagicDraw, Artisan Studio) sein. Der Mehrwert durch die Modelle entsteht dadurch, dass Entwickler ihre mentalen Modelle explizieren und sich auf deren Basis austauschen.¹²⁴ Die Softwaretools sind so gestaltet, dass der Entwickler bei der korrekten Anwendung der Sprache unterstützt wird, indem beispielsweise nur standardkonforme Relationen gesetzt werden können. Dadurch entstehen in sich konsistente Modelle, die auf unterschiedliche Sichten projiziert werden können. Auf diese Weise bewirken Änderungen in einer Sicht eine Änderung im gesamten Modell. Dies hat den Vorteil, dass das Modell konsistent bleibt und den Nachteil, dass die Modellbildung an sich komplexer wird, da nur konfliktfreie Änderungen durchgeführt werden können.¹²⁵ Die Unterscheidung zwischen Modell und Sicht (auch Diagramm) genannt sind in Abbildung 2.17 schematisch dargestellt.

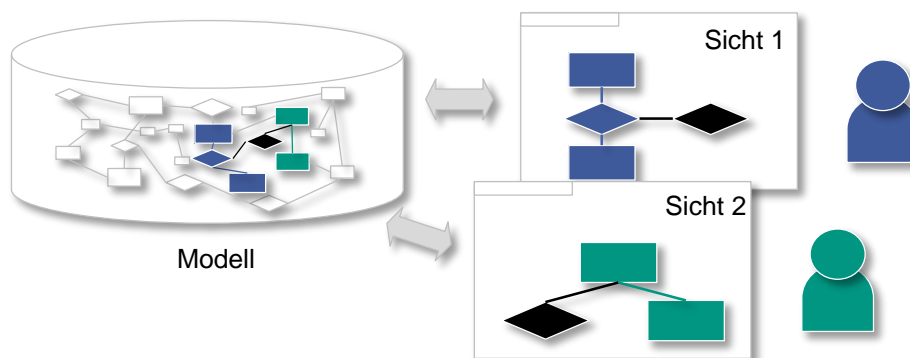


Abbildung 2.17: Trennung von Sicht und Modell im MBSE¹²⁶

Methoden unterstützen Entwickler dabei, die unterschiedlichen Sprachelemente aufeinander aufbauend zu verwenden. Das ist notwendig, da die Sprachen sehr generisch gehalten sind, um den Ziel nachzukommen, unterschiedliche Systeme abbilden zu können.¹²⁷ Als Beispiele können die Object-Oriented Systems-Engineering Method (OOSE)¹²⁸ oder SysMod¹²⁹ genannt werden. Durch Plugins können die Methoden in

¹²³Kaffenberger, Schulze & Weber, 2012.

¹²⁴Lamm & Weilkiens, 2014.

¹²⁵Albers, Matthiesen, Bursac, Moeser, Schmidt & Lüdcke, 2014.

¹²⁶nach Alt, 2012.

¹²⁷Object Management Group, 2011.

¹²⁸Kaffenberger, Schulze & Weber, 2012.

¹²⁹Weilkiens, 2008.

Tools integriert werden, um das Modellierungstripel (Methode, Sprache und Tool) aufeinander abzustimmen.

Systems Modeling Language

Die SysML wurde von der INCOSE - der größten Organisation für Systems Engineering - in Zusammenarbeit mit der Object Management Group (OMG) - einem Konsortium bedeutender Unternehmen der objektorientierten Programmierung - entwickelt und ist im Systems Engineering Handbuch beschrieben.¹³⁰ Die Modellierungssprache SysML gilt als Dialekt der UML und ist zur Modellierung technischer Systeme geeignet.¹³¹

Die SysML setzt sich aus unterschiedlichen Diagrammen zusammen.¹³²

- Mit **Strukturdiagrammen** wird der Aufbau und die Wechselwirkungen von Systemen beschrieben. Ausprägungen von Strukturdiagrammen sind zum einen das Blockdefinitionsdiagramm, welches zur Modellierung des hierarchischen Konzepts der Systemtheorie nach ROPOHL verwendet werden kann, und zum anderen das interne Blockdiagramm als das strukturelle Konzept. Weitere Ausprägungen sind das Zusicherungs- und das Paketdiagramm.
- Mit **Verhaltensdiagrammen** und deren Ausprägungen - den Aktivitätsdiagrammen, Anwendungsfalldiagrammen, Sequenzdiagrammen und Zustandsdiagrammen - wird das funktionale Konzept abgebildet. Durch die Diagramme können Funktionen, Zustände und Wechselwirkungen zwischen beispielsweise Kunden und dem technischen System abgebildet werden.
- **Anforderungsdiagramme** wurden für die SysML neu definiert und sind in der UML nicht vorhanden. Mit ihnen können Ziele, Anforderungen und Randbedingungen sowie ihre Wechselwirkungen mit dem technischen System modelliert werden.

Zahlreiche Studien belegen den Mehrwert durch die Systemmodellierung, weisen aber auch darauf hin, dass sie einen erheblichen Mehraufwand mit sich bringt.¹³³ EHRENSPIEL & MEERKAMM heben die Notwendigkeit einer disziplinübergreifenden Integration hervor. Gleichzeitig stellen sie in Frage,¹³⁴

¹³⁰Incose, 2011 übersetzt durch die Gesellschaft für Systems Engineering (GfSE) - die deutsche Sektion der INCOSE - in Kaffenberger, Schulze & Weber, 2012.

¹³¹Kaffenberger, Schulze & Weber, 2012.

¹³²Weilkiens & Soley, 2014.

¹³³vgl. beispielsweise Albers & Zingel, 2013, Zingel, 2013, Bone & Cloutier, 2010.

¹³⁴Ehrlenspiel & Meerkamm, 2016, S. 8.

„ob eine „Systems Modeling Language“ (SysML), die notwendigerweise sehr abstrakt sein muss, für das gemeinsame Entwickeln der Spezialisten so effektiv ist, dass es sich für sie lohnt, die Sprache zu lernen. Sie müsste Qualitäts- und Zeitvorteile bieten gegenüber dem jetzigen getrennten Erstellen von Plänen und Programmen, die von Zeit zu Zeit gegenseitig abgestimmt werden.“

Hierdurch wird deutlich, dass der Ansatz der SysML Potentiale bietet. Allerdings sollte näher untersucht werden, wie die abstrakte Sprache der SysML effizient in der Produktentwicklung eingesetzt werden kann.

Meta Object Facility als Meta-Meta-Modell

Meta-Modelle werden zur Beschreibung und Ableitung formaler Modelle verwendet. Sie besitzen keine Instanzinformationen, sondern geben die Struktur und Modellelemente vor. Besitzen mehrere Modelle das gleiche Meta-Modell und sind nach gleichen Abbildungskriterien erstellt worden, wird eine Vergleichbarkeit der Modelle erleichtert.¹³⁵

ALT vergleicht Meta-Modelle mit der deutschen Sprache. Sie besteht einerseits aus Modellelementen, den lateinischen Buchstaben und andererseits aus Regeln zur Anwendungsreihenfolge der Buchstaben und Satzstrukturen, der Grammatik. Zur Anwendung der Sprache wird folglich ein Meta-Modell benötigt, das die Elemente und Regeln vorgibt.¹³⁶

Die SysML ist entsprechend ein Meta-Modell. Damit die Anwender die Regeln nicht vollumfänglich kennen müssen, wird das Meta-Modell im Softwaretool so hinterlegt, dass Anwender regelkonforme Modelle erstellen. Auch Meta-Modelle lassen sich wiederum durch eigene Meta-Modelle beschreiben. Diese werden Meta-Meta-Modelle genannt. Diese Reihe endet erst, wenn eine Rekursion eintritt, also das Meta-Meta-Modell sich durch sich selbst vollständig beschreiben lässt. Es konnte gezeigt werden, dass für die SysML und die UML das gleiche Meta-Meta-Modell - die MOF - verwendet werden kann und dass nicht weitere „Meta-Meta-Metamodelle“ für die beiden Sprachen benötigt werden.¹³⁷

¹³⁵Meboldt, 2009.

¹³⁶Alt, 2012.

¹³⁷OMG, 2002.

Die MOF wird dabei von der OMG als Framework standardisiert und weiterentwickelt. Dabei handelt es sich um ein Metadaten Management Framework zur plattformunabhängigen Definition und Anpassung von Metadaten. Der Standard ist in Tools implementiert und ermöglicht dadurch den Austausch von Meta-Modellen. Dadurch können die Sprachen SysML und UML gemeinsam verarbeitet werden. Das Framework setzt sich aus vier Ebenen zusammen:¹³⁸

- Meta-Meta-Modelle (MOF-Modell)
- Meta-Modelle (z. B. SysML oder UML)
- Modelle (z. B. Beschreibung eines Fahrzeugs)
- Ausgeprägte Daten (z. B. Porsche Typ 911)

2.1.4 Zwischenfazit

Da jeder Entwicklungsprozess einzigartig und individuell ist,¹³⁹ sind iterative Ansätze in der Produktentwicklung immer stärker verbreitet. Hierbei ist es notwendig, sowohl das Zielsystem als auch das Objektsystem kontinuierlich weiterzuentwickeln. Hierfür bietet sich die Systemmodellierung des SE an. Allerdings folgt aus den Grundlagen der Modelltheorie das Reduktions-Dilemma bei der Erstellung von Modellen: Es können Modelle entstehen, die zwar dasselbe Original abbilden, aber durch unterschiedliche zweckgebundene Reduktionen inkonsistent sind. Es werden Meta-Modelle benötigt, die eine durchgängige Modellierung ermöglichen. Ansätze des MBSE zeigen das Potential, disziplinübergreifende, durchgängige Modelle zu erstellen. Hierfür sind allerdings abstrakte Meta-Modelle, wie die SysML, notwendig. Um diese in der Entwicklungspraxis anzuwenden, werden Ansätze benötigt, welche darstellen, wie die abstrakten Sprachen effizient für Entwickler anwendbar werden. In der Prozessmodellierung können Analogien gefunden werden, wie mithilfe der Abstraktionsgrade des iPeM der Weg zur Anwendung aufgezeigt wird.

2.2 Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung

Das im vorigen Abschnitt vorgestellte Verständnis des Systems Engineering, wird im Folgenden verwendet, um zunächst das Beschreibungsmodell der Produktgenera-

¹³⁸Tang, 2009.

¹³⁹Albers, 2010.

tionsentwicklung nach ALBERS einzuführen und anschließend eine Definition für die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung abzuleiten.

2.2.1 Produktgenerationsentwicklung

Nachfolgend wird ein Beschreibungsmodell vorgestellt, das die Produktentwicklung aus der neuen Perspektive der Produktgenerationsentwicklung darstellt. Dazu wird ein Bezug zu Forschungsarbeiten der klassischen Entwicklungsmethodik und zum Innovationsmanagement hergestellt. Das anschließend eingeführte Beschreibungsmodell der Produktgenerationsentwicklung stellt eine Weiterentwicklung dieser klassischen Ansätze dar. Die Produktgenerationsentwicklung wird mithilfe eines mathematischen Modells näher beschrieben und mit Beispielen aus der Produktentwicklungspraxis untermauert.¹⁴⁰

Klassische Einteilung der Produktentwicklung

In der klassischen Konstruktionsmethodik wird beim Konstruieren grundsätzlich zwischen einem korrigierenden und einem generierenden Vorgehen unterschieden. Unter dem korrigierenden Vorgehen wird eine Übernahme mit geringfügigen Änderungen an bestehenden Lösungsprinzipien verstanden. Hingegen wird bei einem generierenden Vorgehen in einem Abstraktions- und anschließendem Konkretisierungsprozess versucht, mehrere neue Lösungen zu generieren und eine geeignete auszuwählen.¹⁴¹

Ergänzend unterscheiden PAHL & BEITZ Produktentwicklungsprojekte in den folgenden Kategorien:¹⁴²

- Bei **Neukonstruktionen** werden neue Aufgabenstellungen und Probleme mithilfe neuer Lösungsprinzipien adressiert. Die technischen Lösungen können sowohl durch die Auswahl und Kombination bekannter Prinzipien als auch durch neuartige Lösungsprinzipien umgesetzt werden.
- Bei **Anpassungskonstruktionen** werden bekannte und bewährte Lösungsprinzipien verwendet. Die Gestalt eines technischen Systems wird hierbei an ver-

¹⁴⁰Die in Kapitel 2.2.1 dargestellten Erkenntnisse wurden im Rahmen der Publikation Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b veröffentlicht.

¹⁴¹Ehrlenspiel, 2009.

¹⁴²Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote, 2007.

änderte Randbedingungen angepasst. Bei komplexen Konstruktionsproblemen kann dies auch eine partielle Neukonstruktion einschließen.

- Bei **Variantenkonstruktionen** werden Größe oder Anordnung von Systemen innerhalb von Grenzen variiert. Sie erfordern initial einen wesentlichen Aufwand und können anschließend bei gleichbleibendem Lösungsprinzip durch die Veränderung gezielter Parameter die Lösungsvielfalt erhöhen.

Die Autoren räumen dabei ein, dass sich die genannten Konstruktionsarten in der Entwicklungspraxis meist nicht scharf abgrenzen lassen.¹⁴³

Es wird darüber hinaus häufig darauf verwiesen, dass reine Neukonstruktionen sehr selten vorkommen. Stattdessen wird aus ökonomischen und risikominimierenden Gründen meist das Ziel verfolgt, die angestrebten Ziele eines neuen Produktes mit möglichst geringfügigen Anpassungen bereits am Markt etablierter Produkte zu erreichen.¹⁴⁴ So merkt ECKERT beispielsweise an, dass die Verbesserung bestehender Produkte die häufigste Art der Produktentwicklung darstellt. Die meisten Produkte entstehen durch Anpassungen, um potenzielle technische Risiken und erforderliche Investitionen z. B. für Produktionsanlagen gering zu halten. Insbesondere bei komplexen Produkten werden bewährte Subsysteme soweit wie möglich übernommen, da kein zusätzliches Risiko bei der Entwicklung eingegangen werden soll.¹⁴⁵

Einteilung im Innovationsmanagement

Der Begriff Innovation ist auf SCHUMPETER zurückzuführen. Er beschreibt ihre Notwendigkeit für Unternehmen, um nachhaltig erfolgreich zu sein.¹⁴⁶ Dabei können Innovationen als erfolgreich am Markt etablierte Inventionen verstanden werden. HENDERSON & CLARK unterscheiden dabei folgende Arten der Innovation:¹⁴⁷

- **Inkrementelle Innovationen** entstehen durch geringfügige Änderungen an Komponenten und ihren Beziehungen. Durch den kleinen Änderungsumfang lassen sich inkrementelle Innovationen gut planen und steuern. Daher besteht häufig nur ein geringes technisches und ökonomisches Risiko. Gleichzeitig ist auch das wirtschaftliche Potential tendenziell kleiner.

¹⁴³Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote, 2007.

¹⁴⁴vgl. z. B. Deubzer & Lindemann, 2009 oder Eckert, Alink & Albers, 2010.

¹⁴⁵Eckert, Alink & Albers, 2010.

¹⁴⁶Schumpeter, 1934.

¹⁴⁷Henderson & Clark, 1990.

- **Architekturelle Innovationen** entstehen durch eine Neukonfiguration von bekannten und etablierten Funktionseinheiten. Sie bergen wirtschaftliche Potentiale bei moderaten technischen Risiken.
- **Modulare Innovationen** entstehen durch den Austausch einzelner Subsysteme, wobei die grundsätzliche Systemstruktur erhalten bleibt. Ökonomisch bieten sie erhöhte Potentiale, sind jedoch auch mit erhöhten Risiken verbunden.
- **Radikale Innovationen** entstehen durch die Entwicklung einer neuen Systemstruktur bei gleichzeitiger Neuentwicklung von Subsystemen. Da hierbei kaum Wissen von vorhandenen Produkten genutzt werden kann, ergibt sich ein unsicherheitsbehafteter und riskanter Entwicklungsprozess. Bei erfolgreicher Markteinführung kann eine Alleinstellung auf dem Markt erreicht werden, wodurch hohe ökonomische Potentiale erschlossen werden können.

Wissenschaftliche Arbeiten im Bereich des Innovationsmanagements fokussieren häufig auf radikale Innovationen, wobei diese in der Entwicklungspraxis überaus selten zu finden sind. Denn häufig können die Produkte erst nach diversen Variationen über mehrere Produktgenerationen hinweg wirtschaftlich und technisch dahingehend entwickelt werden, dass sie erfolgreich auf dem Markt etabliert werden können.¹⁴⁸

WESNER betrachtet Produktgenerationen von einem wirtschaftswissenschaftlichen Standpunkt und stellt diese innerhalb von Technologie- und Branchenlebenszyklen dar (vgl. Abbildung 2.18). Hierbei werden die Produktgenerationen den aktuellen Bedarfen und Randbedingungen am Markt angepasst.¹⁴⁹

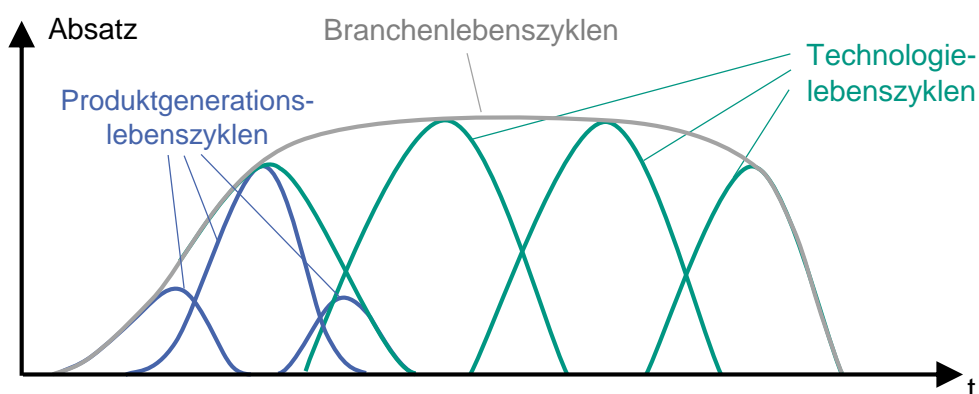


Abbildung 2.18: Lebenszyklen von Produktgenerationen nach WESNER¹⁵⁰

¹⁴⁸Albers, 1991.

¹⁴⁹Wesner, 1977.

¹⁵⁰nach Wesner, 1977.

Produkte weisen nach KANO unterschiedliche Arten von Attributen (Basis-, Leistungs- und Begeisterungsattribute) auf.¹⁵¹ Über mehrere Generationen hinweg degradieren Begeisterungsattribute zu Leistungs- und Basisattributen (vgl. Abb. 2.19). Neue Produkte benötigen daher regelmäßig neue Begeisterungsattribute.¹⁵² Lediglich eine Anpassung von Produkten an die veränderten Randbedingungen des Marktes genügt folglich kaum.

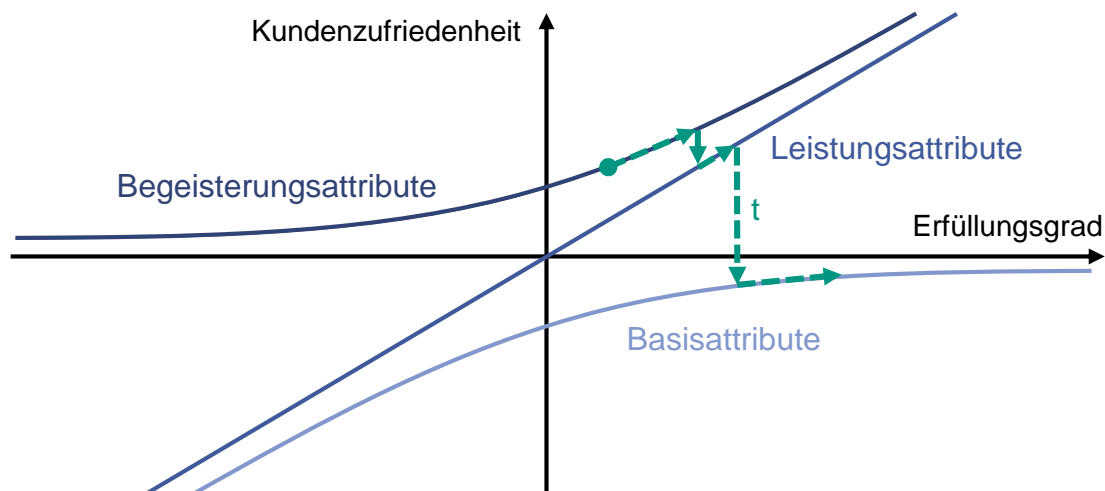


Abbildung 2.19: KANO-Modell nach BAILOM¹⁵³

Definition der Produktgenerationsentwicklung

Auf Basis der zuvor beschriebenen Randbedingungen entsteht der Zielkonflikt, gleichzeitig:¹⁵⁴

- aus ökonomischen und risikominimierenden Gründen möglichst wenige Subsysteme neu zu entwickeln und
- dennoch ein möglichst innovatives Produkt mit möglichst guten Leistungs- und neuen Begeisterungsattributen zu entwickeln.

Um diesen Zielkonflikt aufzulösen führt ALBERS den Ansatz der Produktgenerationsentwicklung ein und definiert ihn wie folgt:¹⁵⁵

¹⁵¹Kano, Seraku, Takahashi & Tsuji, 1984.

¹⁵²vgl. Bailom, Hinterhuber, Matzler & Sauerwein, 1996. und Albers, 1994.

¹⁵³nach Bailom, Hinterhuber, Matzler & Sauerwein, 1996.

¹⁵⁴Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014.

¹⁵⁵Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

Definition 6: Produktgenerationsentwicklung

Die Produktgenerationsentwicklung ist die Entwicklung einer neuen Generation eines technischen Produkts, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation als auch durch eine signifikante Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Neu entwickelte Anteile technischer Produkte können durch Gestalt- und durch Prinzipvariation realisiert werden. Neue Produktgenerationen basieren immer auf Referenzprodukten, welche die grundsätzliche Struktur beschreiben.

Die Entwicklung der nächsten Produktgeneration baut dabei immer auf mindestens einem bereits vorhandenen Produkt auf. Dieses Produkt wird als Referenzprodukt bezeichnet und ist wie folgt definiert:¹⁵⁶

Definition 7: Referenzprodukt

Referenzprodukte sind bestehende Produkte (z. B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte), auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden und deren Struktur in großen Teilen übernommen wird.

Durch die Referenzprodukte können Informationen und einzelne Teilsysteme bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen wieder verwendet werden. Es sollte versucht werden, Basisattribute mit möglichst geringen Veränderungen in neue Produktgenerationen zu übernehmen und gleichzeitig die verfügbaren Ressourcen auf die Entwicklung von Leistungs- und Begeisterungsattributen als Differenzierungsmerkmale zu konzentrieren. Dadurch kann das Innovationspotential eines Produktes bei vertretbarem Risiko gesteigert werden.¹⁵⁷ Gleichzeitig sollte sichergestellt werden, dass die Erfüllung von Basisanforderungen nicht unterschätzt wird. Eine Nichterfüllung dieser Attribute (z. B. Kaltstartverhalten eines Motors) führt zu großer Unzufriedenheit und muss ausreichend abgesichert werden.

Nach der Definition der Produktgenerationsentwicklung werden drei Arten von Variationen unterschieden:¹⁵⁸

¹⁵⁶Albers, Bursac & Wintergerst, 2015a.

¹⁵⁷Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014.

¹⁵⁸Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

- Die Neuentwicklung eines Subsystems ausgehend von einer **Prinzipvariation** ist dadurch gekennzeichnet, dass das Lösungsprinzip im Vergleich zum Referenzprodukt verändert wird. So ist beispielsweise die Veränderung einer Federanordnung von einer Parallelschaltung hin zur Reihenschaltung zu nennen. Dabei scheint das Hinzufügen und Weglassen von Wirkflächenpaaren ein Indiz für die Prinzipvariation zu sein. Diese Subsysteme (PS) werden als die Menge jener Teilsysteme (TS) definiert, die ausgehend von einer Prinzipvariation (PV) für die nächste Produktgeneration ($n+1$) neu entwickelt werden ($PS_{n+1} \{TS|PV_{(TS)}\}$).
- Die Neuentwicklung eines Subsystems ausgehend von der **Gestaltvariation** ist dadurch gekennzeichnet, dass das Lösungsprinzip des Referenzprodukts beibehalten wird und stattdessen die Gestalt verändert wird. So ist beispielsweise die Veränderung vom Ski hin zum Carving-Ski zu nennen. Dabei scheint die Veränderung der Wirkflächenpaare und Tragstrukturen ein Indiz für die Gestaltvariation zu sein. Diese Subsysteme (GS) werden als die Menge jener Teilsysteme definiert, die durch Gestaltvariation (GV) neu entwickelt werden ($GS_{n+1} \{TS|GV_{(TS)}\}$).
- Die Anpassung eines Subsystems durch **Übernahmevariation** ist dadurch gekennzeichnet, dass die Gestalt und das Lösungsprinzip des Referenzprodukts beibehalten werden und die konstruktiven Anpassungen minimiert werden. So ist beispielsweise die Wiederverwendung einer Bremse für die nächste Produktgeneration zu nennen. Dabei scheint die ausschließliche Veränderung von Wirkflächen an Systemgrenzen, die also an die Wirkflächen von Connektoren grenzen, ein Indiz für die Übernahmevariation zu sein. Diese Subsysteme (ÜS) werden als die Menge jener Teilsysteme definiert, die durch Übernahmevariation (ÜV) angepasst werden ($ÜS_{n+1} \{TS|ÜV_{(TS)}\}$).

Entgegen der starken Fokussierung wissenschaftlicher Arbeiten des Innovationsmanagements auf neuartige Lösungsprinzipien stellt die Gestaltvariation die häufigste Aktivität der Produktentwicklung dar. Dabei gilt es zu betonen, dass hierbei ebenfalls ein sehr kreativer und komplexer Vorgang durchgeführt wird. Die Ergebnisse der Gestaltvariation können in gleichem Maße inventiv und innovativ sein, wie die Neuentwicklung durch Prinzipvariation. Somit sollte die Gestaltvariation wegen ihrer Komplexität und ihres großen Einflusses auf die Ausprägung innovativer Produkte in ihrem Stellenwert in der Produktentwicklung durch geeignete Methoden gestärkt werden.¹⁵⁹ Ein Beispiel dafür sind Ansätze des Leichtbaus; hier kommt es in vielen Fällen durch starke Gestaltvariation zu hohem Innovationspotential.¹⁶⁰

¹⁵⁹Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

¹⁶⁰vgl. z. B. Albers, Wagner, Ruckpaul, Hessenauer, Burkardt & Matthiesen, 2013.

Nach ALBERS kann die Definition für die Produktgenerationsentwicklung in ein mathematisches Modell überführt werden. Demnach setzt sich eine neue Generation (G_{n+1}) aus der Vereinigung der Mengen der drei Teilsysteme zusammen.¹⁶¹

$$G_{n+1} = PS_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup \ddot{U}S_{n+1} \quad (2.1)$$

Auf Basis der Formel können die einzelnen Anteile (δ) berechnet werden:

$$\delta_{PS_{n+1}} = \frac{|PS_{n+1}|}{|PS_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup \ddot{U}S_{n+1}|} [\%] \quad (2.2)$$

$$\delta_{GS_{n+1}} = \frac{|GS_{n+1}|}{|PS_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup \ddot{U}S_{n+1}|} [\%] \quad (2.3)$$

$$\delta_{\ddot{U}S_{n+1}} = \frac{|\ddot{U}S_{n+1}|}{|PS_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup \ddot{U}S_{n+1}|} [\%] \quad (2.4)$$

Zahlreiche Beispiele belegen, dass Produkte in der Praxis in Produktgenerationen entwickelt werden. So kann exemplarisch die Entwicklung des iPhones von Apple, der Druckmaschinen von Heidelberger Druckmaschinen und des Zweimassenschwungrads von LuK genannt werden. Zur Veranschaulichung sind die zwei letztgenannten Beispiele in Abbildung 2.20 dargestellt.

Das Zweimassenschwungrad (ZMS) ist ein Subsystem im Antriebsstrang, das die vom Verbrennungsmotor verursachten Drehungleichförmigkeiten dämpft und dadurch einen Beitrag zum Fahrkomfort leistet. Es basiert auf der Trennung des Motorschwungrades in die zwei Teilschwungräder Primär- und Sekundärschwungrad. Diese sind gegeneinander drehbar gelagert und zwischen ihnen sind Federn angeordnet. Betrachtet man das Zweimassenschwungrad, so kann festgestellt werden, dass diese Struktur im Wesentlichen über die Generationen erhalten bleibt und alle drei Arten der Variation auftreten. Am Beispiel der Lagerung wird ersichtlich, dass von der Generation 1 zur Generation 2 eine Prinzipvariation erfolgt ist, da das Lagerungsprinzip variiert wurde. Die statisch bestimmte Lagerung mit einem zweireihigen Kugellager wurde zu einer statisch unbestimmten Lagerung mit einem einreihigen Rillenkugellager neu entwickelt (vgl. Abb. 2.21). Um das Entwicklungsrisiko gering zu halten, wurde das Lager im Rah-

¹⁶¹ Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

¹⁶² Bild Heidelberger Druckmaschinen und LuK, 2009.

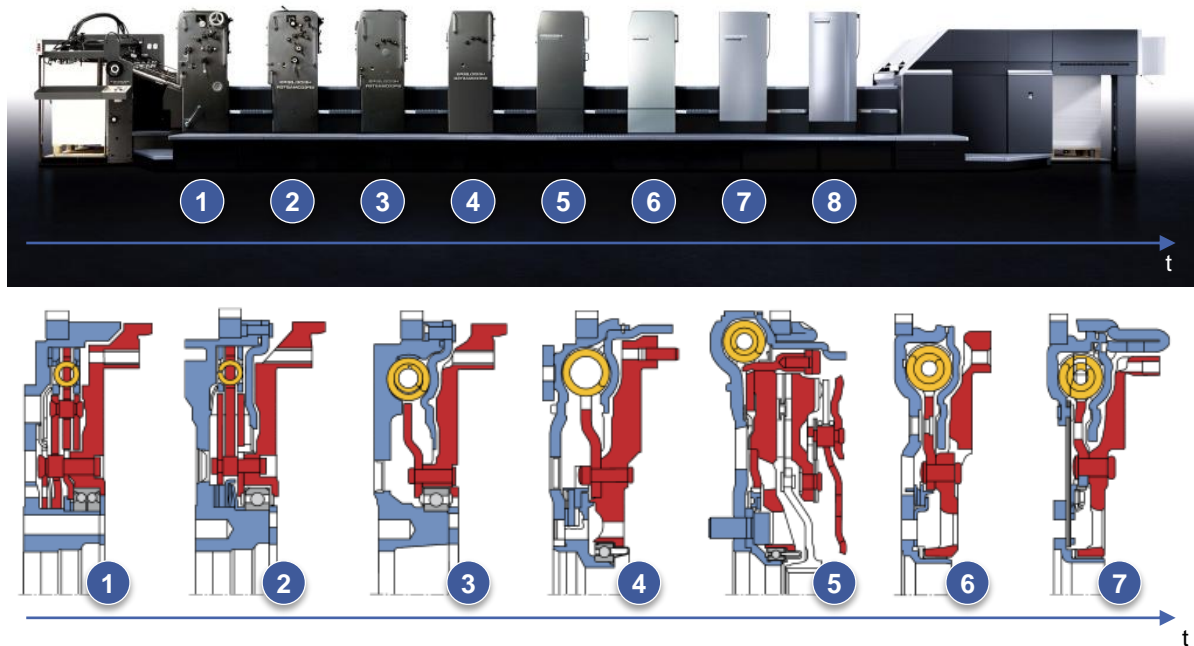


Abbildung 2.20: Beispiele für Produktgenerationsentwicklungen: Druckmaschine und Zweimassenschwunrad¹⁶²

men einer Übernahmevariation in der nächsten Produktgeneration (3) übernommen. Anschließend wurden in der 4. Produktgeneration mithilfe einer Gestaltvariation die Größe und der Durchmesser des Lagers stark variiert. Dies ermöglichte den Einsatz in Mittelklassefahrzeugen mit einem Front-Quer-Triebstrang.¹⁶³

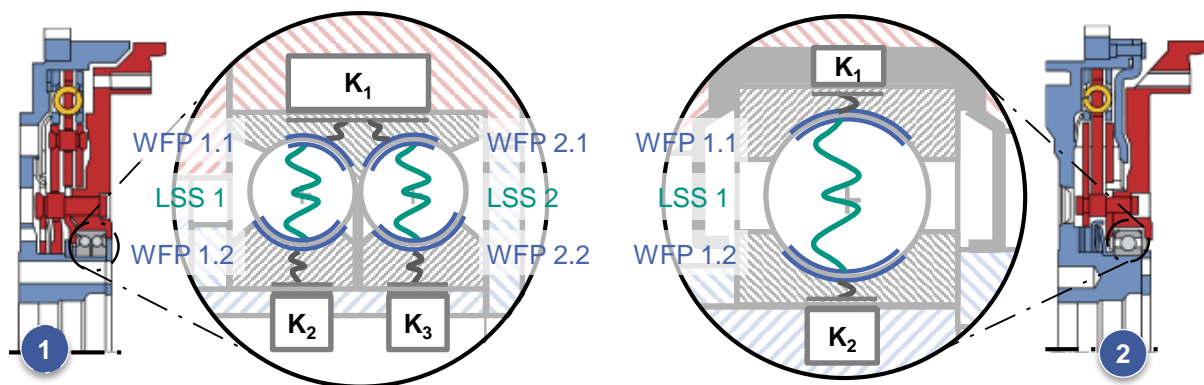


Abbildung 2.21: Lagerung der ersten und zweiten Produktgeneration des Zweimassenschwungrads modelliert mit dem C&C²-A¹⁶⁴

Ein Ziel künftiger Arbeiten der Entwicklungsmethodik und des -managements wird es sein, den Ansatz der Produktgenerationsentwicklung mithilfe des mathematischen Mo-

¹⁶³ALBERS in der Keynote des Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015 und Albers, Bursac & Rapp, 2016. eingereicht.

¹⁶⁴nach Albers, Bursac & Rapp, 2016. eingereicht.

dells dahingehend weiterzuentwickeln, dass dieser für die Steuerung des Entwicklungsprozesses und -risikos verwendet werden kann.¹⁶⁵

2.2.2 Frühe Phase der Produktentwicklung

Das Paradox der Produktentwicklung beschreibt u. a. GRABOWSKI, indem er darauf hinweist, dass man in der Frühen Phase zwar viel verändern kann, aber die Auswirkung der Entscheidungen kaum kennt; wogegen man in späteren Phasen leichter beurteilen kann, dafür aber kaum ändern kann.¹⁶⁶ Der Ansatz der Produktgenerationsentwicklung bietet das Potential, diesem Paradox zu begegnen. Im Folgenden werden zunächst die Merkmale der Frühen Phase dargestellt. Anschließend wird eine Definition der Frühen Phase im Kontext der Produktgenerationsentwicklung für die vorliegende Arbeit abgeleitet und zu weiteren Betrachtungsweisen abgegrenzt.

Merkmale der Frühen Phase

Fallstudien belegen, dass Entscheidungen in der Frühen Phase der Produktentwicklung einen großen Einfluss auf zukünftige Prozess- und Produkteigenschaften wie Qualität, Kosten und Entwicklungszeit haben und somit den Projekterfolg stark bestimmen.¹⁶⁷

Weitere Merkmale der Frühen Phase sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Merkmale der Frühen Phase nach VERWORN¹⁶⁸

Merkmale	Ausprägung
Auswirkungen auf den weiteren Prozess und das Ergebnis	Hoch
Unsicherheit	Hoch
Ressourceneinsatz	Gering
Strukturierung und Formalisierung	Gering
Dokumentationsgrad	Gering
Art des Wissens	Meist implizit
Kommunikation	Informell

¹⁶⁵Albers, Walch & Bursac, 2016, eingereicht.

¹⁶⁶Grabowski & Geiger, 1997.

¹⁶⁷Cooper & Kleinschmidt, 1993.

Die im Englischen teilweise verwendete Bezeichnung des „fuzzy front end“ geht auf den wenig strukturierten Charakter der Frühen Phase ein.¹⁶⁹ Dieser ist im Wesentlichen auf die hohe Unsicherheit zurückzuführen. Sie wird in der Literatur mit unterschiedlichen Ansätzen strukturiert, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

Die Unsicherheit kann durch die Differenz zwischen benötigten und vorhandenen Informationen zur Lösung eines Problems beschrieben werden.¹⁷⁰ Dies hat zur Folge, dass im Rahmen eines Entwicklungsprozesses bestimmte Prämissen angenommen werden, die möglicherweise nicht korrekt sind.¹⁷¹ Die Unsicherheit kann für das Problemlösungsteam sowohl bekannt als auch unbekannt sein und sich entweder auf die Produktdefinition oder auf die zugrunde liegenden Daten beziehen.¹⁷² McMANUS & HASTINGS schlagen eine Klassifizierung der Unsicherheit auf Basis ihrer Herkunft vor. Diese kann aufgrund einer Wissenslücke (engl.: „lack of knowledge“) oder einer Definitionslücke (engl.: „lack of definition“) entstehen. Während die Wissenslücke einen Mangel an akquiriertem Wissen zur rationalen Lösung einer Entwicklungsaufgabe beschreibt, wird unter der Definitionslücke ein Mangel an Festlegungen und Spezifikationen verstanden.¹⁷³ LOHMEYER bezeichnet dies als ein Unsicherheitsdilemma, denn einerseits wird problemspezifisches Wissen benötigt, um Definitionslücken zu schließen und andererseits sind Definitionen notwendig, um das Wissen zielgerichtet generieren zu können.¹⁷⁴ Ziel in der Produktentwicklung ist es folglich, mithilfe eines iterativen Vorgehens die Unsicherheit kontinuierlich zu reduzieren.¹⁷⁵ Nach dem erweiterten ZHO-Modell (vgl. Kapitel 2.1.2) ist es hierbei notwendig, iterativ sowohl das Zielsystem als auch das Objektsystem zu entwickeln und dieses mithilfe von Produktmodellen zu explizieren und zu dokumentieren.¹⁷⁶

¹⁶⁸nach Verworn, 2005.

¹⁶⁹Khurana & Rosenthal, 1997.

¹⁷⁰Galbraith, 1973.

¹⁷¹Weck, Eckert & Clarkson, 2007.

¹⁷²Earl, Johnson & Eckert, 2005.

¹⁷³McManus & Hastings, 2005.

¹⁷⁴Lohmeyer, 2013.

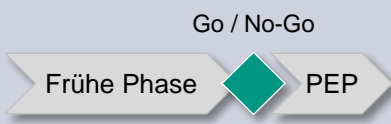

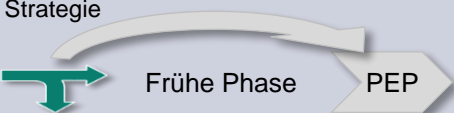
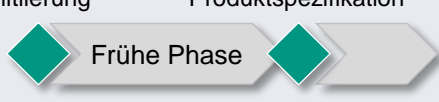
¹⁷⁵Lindemann & Lorenz, 2008.

¹⁷⁶Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014.

Definitionen der Frühen Phase

Betrachtet man Definitionen der Frühen Phase in der Literatur, wird hierbei meist der Kontext einer Neukonstruktion im Sinne von PAHL & BEITZ beschrieben.¹⁷⁷ Dementsprechend wird die Frühe Phase auch als „front end of innovation“ bezeichnet.¹⁷⁸ Folglich sind wesentliche Aktivitäten der Frühen Phase die Ideengenerierung sowie deren Bewertung.¹⁷⁹ Bei einer anschließenden Entscheidung für ein neues Entwicklungsprojekt kann eine klassische, strukturierte Produktentwicklung unter Erhöhung des Ressourceneinsatzs beginnen.¹⁸⁰ In Tabelle 2.2 werden einzelne Aspekte unterschiedlicher Definitionen vorgestellt und visualisiert.

Tabelle 2.2: Definitionen der Frühen Phase¹⁸¹

Autor	Spezifikum	Visualisierung
KHURANA & ROSENTHAL 1998	Finanzierung und Start der Produktentwicklung auf Basis einer „Go / No-Go“ Entscheidung	Go / No-Go 
KOEN et al. 2001	Alle Aktivitäten vor dem Beginn des formalen und strukturierten Produktentwicklungsprozesses	
JETTER 2005	Brücke zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung	Strategie 
MUSCHIK 2011	Zeitraum von der Initiierung eines Projektes bis zur Formulierung einer ersten Produktspezifikation	Initiierung Produktspezifikation 

ALBERS ergänzt, dass eine entsprechende Entscheidung meist nicht auf Basis von funktional orientierten Beschreibungen und konzeptionellen Lösungen gefällt werden kann. So kann es beispielsweise in der Automobilindustrie zielführend sein, erste Pro-

¹⁷⁷Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote, 2007.

¹⁷⁸Koen et al., 2001.

¹⁷⁹vgl. z. B. Cooper & Kleinschmidt, 1993, Khurana & Rosenthal, 1997 und Verworn & Herstatt, 2007.

¹⁸⁰vgl. z. B. Khurana & Rosenthal, 1997; Koen et al., 2001; Jetter & Schröder, 2007.

¹⁸¹Khurana & Rosenthal, 1998, Koen et al., 2001, Jetter, 2005 und Muschik, 2011; Darstellung nach Birk, 2013, betreute Abschlussarbeit

totypen und Konzeptfahrzeuge zu entwickeln, um das Zielsystem auf künftige Bedürfnisse abzustimmen und zu definieren.¹⁸²

Mithilfe der Produktgenerationsentwicklung als Beschreibungsmodell wird verständlich, wie es auch in der Frühen Phase ökonomisch vertretbar ist, den für die Entscheidung notwendigen Reifegrad z. B. durch Prototypen zu entwickeln. Dazu wird zunächst die Definition der Frühen Phase nach ALBERS vorgestellt und anschließend diskutiert.¹⁸³

Definition 8: Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung

Die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit der Bewertung einer Produktspezifikation endet. Die Produktspezifikation enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden Produkts hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen sowie des technischen und ökonomischen Risikos.

Dabei ist zu betonen, dass für diese Bewertung die Potentiale der Produktgenerationsentwicklung genutzt werden können. So ist es beispielsweise in einzelnen Branchen zielführend, für die Beurteilung des technischen Risikos Prototypen mit einem hohen Übernahmevarianteanteil aufzubauen. In den meisten Branchen ist eine valide Bewertung der zu entwickelnden Produkte anhand von Skizzen und funktionalen Betrachtungen nicht möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Komplexität der zu entwickelnden Produkte nicht in ausreichendem Umfang mit dieser Art der Modellierung abgebildet werden kann.

Ein Ziel künftiger methodischer Arbeiten wird es sein, die Validierung bereits in der Frühen Phase anhand von Prototypen mit potentiellen Kunden durchführen zu können. Dazu dienen beispielsweise die Ansätze des Test-based-Development im X-in-the-Loop Framework.¹⁸⁴

¹⁸²Albers im Vorwort des Herausgebers zu Band 50 in Muschik, 2011.

¹⁸³Albers, Maul, Bursac & Heismann, 2016, eingereicht.

¹⁸⁴Albers, Matros, Behrendt, Bohne & Ars, 2014.

Abgrenzung der Frühen Phase

In manchen Branchen ist es sinnvoll neben der Entwicklung einer Produktgeneration Vorentwicklungsprojekte oder Forschungsprojekte durchzuführen, um Technologien und Wissen für künftige Produktgenerationen aufzubauen.¹⁸⁵ Diese Projekte besitzen ebenfalls eine Frühe Phase und meist auch Referenzprodukte, auf deren Basis die Entwicklung einer neuen Produktgeneration begonnen wird. Als Beispiel kann in der Automobilbranche die Entwicklung einer neuartigen Bremse genannt werden, die aus Keramik als Werkstoff in der Bremsscheibe besteht und technologisch auf einer konventionellen Bremse basiert.¹⁸⁶ In Abbildung 2.22 ist der zeitliche Verlauf eines Vorentwicklungsprojektes und der Entwicklung einer neuen Produktgeneration abgebildet.

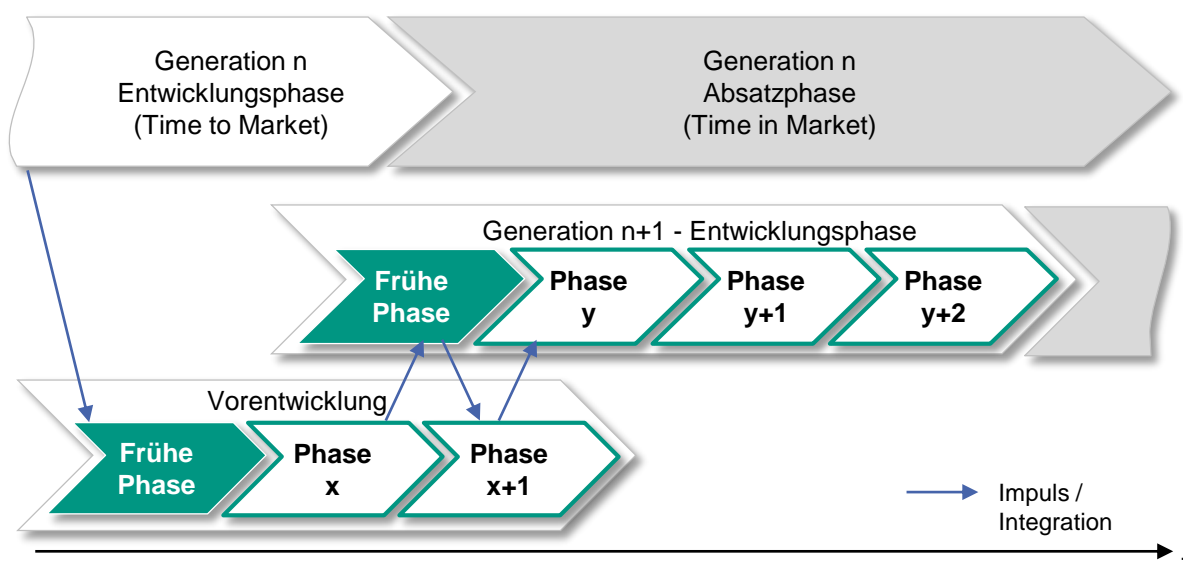


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der Frühen Phasen einer Produktgenerationsentwicklung und der dazugehörigen Vorentwicklung eines (Teil-)Systems

Aus der schematischen¹⁸⁷ Abbildung wird ersichtlich, dass ein Vorentwicklungsprojekt einen Produktentwicklungsprozess (auf Basis anderer Rahmenbedingungen) durchläuft. So ist es möglich, dass es im Rahmen des Vorentwicklungsprojektes einzelne Phasen gibt (Phase x), die nicht als Frühe Phase bezeichnet werden können, obwohl sie zeitlich gesehen früher als die Frühe Phase der neuen Produktgeneration liegen. Denn diese Phasen weisen innerhalb des Vorentwicklungsprojektes nicht die Spezifika der Frühen Phase auf. So ist zu diesem Zeitpunkt die Produktspezifikation hinsichtlich

¹⁸⁵vgl. Heismann & Maul, 2012.

¹⁸⁶Harrer, Görlich, Reuter & Wahl, 2013.

des Vorentwicklungsprojektes bewertet und wird im Rahmen eines Vorentwicklungsprozesses durchgeführt.

Im Kontext der neuen Produktgeneration bleibt in der Frühen Phase zu bewerten, ob die Ergebnisse der Vorentwicklung in die neue Produktgeneration aufgenommen werden können und in den darauf folgenden Phasen für die Produktgeneration weiterentwickelt werden sollen.¹⁸⁸

Aus den dargestellten Betrachtungen wird ersichtlich, dass der Begriff der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung im Rahmen der Karlsruher Schule von dem englischen Begriff des „front loadings“ abzugrenzen ist.¹⁸⁹ Hiermit ist gemeint, dass einzelne Aktivitäten z. B. durch neue Simulationsmethoden in einer früheren Phase (Phase y+1 in Abbildung 2.22) durchgeführt werden können als bisher (Phase y+2).

2.2.3 Zwischenfazit

Das Beschreibungsmodell der Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS bietet Potentiale, die in der Entwicklungspraxis beobachtbaren Vorgehensweisen, für entwicklungsmethodische Forschung nutzbar zu machen. Somit kann das Vorgehen in der Frühen Phase beschrieben werden, mithilfe der Übernahmevariation frühzeitig den Reifegrad der nächsten Produktgeneration zu erhöhen. Denn die Frühe Phase der Produktentwicklung ist in hohem Maß von Unsicherheit geprägt. Dem hierbei entstehenden Unsicherheitsdilemma kann durch ein iteratives Vorgehen begegnet werden. Dazu ist es notwendig, das Zielsystem und das Objektsystem kontinuierlich weiterzuentwickeln und zu explizieren. Hierfür können die in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Produktmodelle genutzt werden. Dadurch ist es möglich die Auswirkungen von Entscheidungen transparenter darzustellen und auf diese Weise einen Beitrag dazu zu leisten, das Paradox der Produktentwicklung nach GRABOWSKI aufzulösen.

¹⁸⁷In Abhängigkeit des Produktlebens- und Entwicklungszyklus sowie der Ressourcen können einzelne Phasen einer Produktentwicklung auch parallel zur Entwicklung der vorherigen Produktgeneration verlaufen. So ist es am Beispiel der Entwicklung von Smartphones zu beobachten, dass sich die Entwicklungen von mehreren Generationen überschneiden.

¹⁸⁸Heismann & Maul, 2012.

¹⁸⁹vgl. z. B. Thomke & Fujimoto, 2000.

2.3 Baukastenentwicklung als Standardisierungsmethode

Aufbauend auf dem systemtheoretischen Verständnis aus Kapitel 2.1 werden zunächst Modul, Plattform, Baureihe und Baukasten als Elemente von produktseitigen Standardisierungsmethoden vorgestellt. Anschließend werden die Aktivitäten der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung näher untersucht. Letztere wurde in Kapitel 2.2 dargestellt.

2.3.1 Systemtheoretische Betrachtung von Standardisierungsmethoden

Betrachtet man die in der Literatur verbreiteten Definitionen von Modul, Plattform, Baureihe und Baukasten ist festzustellen, dass die Definitionen nicht eindeutig voneinander abgegrenzt sind. Im Folgenden werden die Begriffe trennscharf definiert und es wird eine Ontologie gebildet, die auf Basis der Systemtheorie beruht und für mechanische Systeme verwendet werden kann. Anschließend werden die einzelnen Definitionen zusammengeführt, um mithilfe des fraktalen Charakters Kombinationen der Standardisierungsmethoden zu erklären.



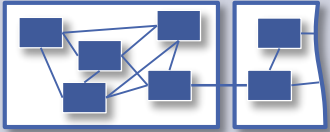
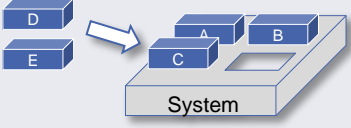
Modul

Module ermöglichen aufgrund von Kombinatorik eine hohe äußere Vielfalt (unterschiedliche Produkte) bei geringer innerer Vielfalt (zu entwickelnde und produzierende Komponenten).¹⁹⁰ Sie werden in der Literatur unterschiedlich definiert. Im Folgenden wird ein Überblick über ausgewählte¹⁹¹ Definitionen gegeben und anschließend eine Definition im Kontext der vorliegenden Arbeit gewählt. In Tabelle 2.3 sind unterschiedliche Definitionen aufgeführt und visualisiert.

¹⁹⁰Feldhusen & Gebhardt, 2008.

¹⁹¹Ein umfangreiches Review diverser Definitionen ist in Jiao, Simpson & Siddique, 2007 zu finden.

Tabelle 2.3: Definitionen des Begriffs Modul¹⁹²

Autor	Spezifikum	Visualisierung
FELDHUSEN & GEBHARDT 2008	Subsystem, dessen Grenzen nach fertigungstechnischen und funktionalen Gesichtspunkten festgelegt sind, mit dem Ziel, es unabhängig vom Gesamtsystem entwickeln und prüfen zu können.	 <p>Funktionale und fertigungstechn. Grenze</p>
PONN & LINDEMANN 2011	Physisch zusammenhängende, in der Regel austauschbare Einheit des Gesamtsystems, mit klar definierten Schnittstellen.	 <p>Gesamtsystem</p>
PAHL & BEITZ 2013	Funktional und physisch relativ unabhängige Einheit.	
SCHUH 2015	Anbauteile, die mit unterschiedlichen Funktionen, aber einheitlichen Schnittstellen, eine vielfältige Kombinierbarkeit der Komponenten und eine effiziente Vielfalterzeugung ermöglichen.	 <p>System</p>

ALBERS et al. leiten auf Basis der vorgestellten Definitionen eine Definition für Module ab, die auf der Systemtheorie basiert und für mechatronische Systeme verwendet werden kann. Hierbei kann beispielsweise in der Softwareentwicklung eine fertigungstechnische Sichtweise - obwohl sie ein wichtiges Element darstellt - nicht das Spezifikum sein. Die Definition wird nachfolgend vorgestellt und wird im Kontext der vorliegenden Arbeit verwendet.¹⁹³

Definition 9: Modul

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

Sonderfälle dieser Substitution von Subsystemen sind Hinzufügen und Weglassen von Modulen. Ein Modul kann sowohl in einem einzelnen oder mehreren Produkten zum Einsatz kommen. Die sich ändernden Funktionen des Systems können hierbei sowohl die Hauptfunktion als auch Nebenfunktionen sein. Neben den Funktionen können sich

¹⁹²Feldhusen & Gebhardt, 2008; Ponn & Lindemann, 2008 vgl. auch Renner, 2007 und Lindemann & Maurer, 2006; Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, Heusel, Bronnhuber, Hufenbach, Helms, Schlick, Klocke, Dilger & Müller, 2013 vgl. auch Lasch & Gießmann, 2009; Ulrich, 1995; Schuh, 2015 vgl. auch Schuh, 2005.

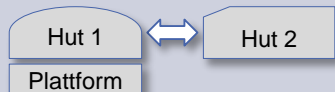



¹⁹³Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

auch Attribute wie z. B. das Gewicht ändern. Aufgrund der Austauschbarkeit von Modulen, ist es zielführend, einheitliche Schnittstellen an den Systemgrenzen der Module zu definieren.¹⁹⁴ So kann beispielsweise in Fahrzeugen meist das Standardlenkrad gegen ein Multifunktionslenkrad ausgetauscht werden. Um die Anzahl der Schnittstellen gering zu halten, ist es zielführend, die Module so zu definieren, dass sie baulich und funktional möglichst unabhängig sind.¹⁹⁵ Aufgrund von emergenten Effekten ist es allerdings kaum möglich, Subsysteme eines komplexen Produktes unabhängig vom Gesamtsystem zu entwickeln und zu prüfen. In diesem Kontext kann durch den IPEK-XiL-Ansatz eine Modulentwicklung effektiver durchgeführt werden, da die emergenten Effekt während der Entwicklung berücksichtigt werden können.

Plattform und Hut

Zur Definition der Plattform wird analog vorgegangen. Zunächst werden in Tabelle 2.4 ausgewählte¹⁹⁶ Definitionen vorgestellt und visualisiert, anschließend wird eine Definition für die vorliegende Arbeit vorgestellt.

Tabelle 2.4: Definitionen des Begriffs Plattform¹⁹⁷

Autor	Spezifikum	Visualisierung
LINDEMANN & MAURER 2006	Vereinheitlichte Trägerstrukturen, die durch Aufsetzen von variablen Modulen (so genannten „Hüten“) Varianten bilden.	
FELDHUSEN & GEBHARDT 2008	Ausführungsneutral und Schnittstellenträger. Die produktspezifischen Anbauten werden als Hutmodule bezeichnet.	
PAHL & BEITZ 2013	Ausführungsneutral, bildet eine einheitliche Basis für alle Varianten des Produktprogramms. Zur Variantenerzeugung werden individualisierte Elemente aufgesetzt.	
SCHUH 2015	Zusammenfassung von Komponenten, Schnittstellen und Funktionen, die über eine ganze Produktfamilie vereinheitlicht und daher zeitlich stabil sind.	

¹⁹⁴ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

¹⁹⁵ Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, Heusel, Bronnhuber, Hufenbach, Helms, Schlick, Klocke, Dilger & Müller, 2013.

¹⁹⁶ Ein umfangreiches Review diverser Definitionen ist in Jiao, Simpson & Siddique, 2007 zu finden.

¹⁹⁷ Lindemann & Maurer, 2006; vgl. auch Ericsson & Erixon, 1999; Feldhusen & Gebhardt, 2008; Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, Heusel, Bronnhuber, Hufenbach, Helms, Schlick, Klocke, Dilger & Müller, 2013; Schuh, 2015 vgl. auch Schuh, 2005, Ponn & Lindemann, 2011.

Um Plattformen im Kontext des MBSE darstellen zu können, definieren ALBERS et al. Plattformen wie folgt.¹⁹⁸

Definition 10: Plattform & Hut

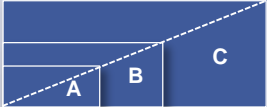

Eine Plattform ist die Menge jener Subsysteme, die in unterschiedlichen technischen Systemen unverändert zum Einsatz kommt. Der Hut hingegen umfasst die restlichen Subsysteme, die in den unterschiedlichen technischen Systemen die Menge aller Funktionen oder Attribute variieren.

Die Subsysteme der Plattform müssen nicht zwingend physisch miteinander verbunden sein (z. B. durchgängig verwendeter Softwarecode eines elektrischen Fensterhebers); dies ist jedoch häufig der Fall. Bei der Plattformbauweise ist es ebenfalls naheliegend, Schnittstellen einheitlich zu definieren, um die Hüte austauschen zu können. Sind die Subsysteme der Plattform durchgängig miteinander verbunden und besitzen die Hüte einheitliche Schnittstellen, kann die Plattform als Schnittstellen-Träger bezeichnet werden.¹⁹⁹

Baureihe

Baureihen werden in der Regel in der Literatur wie in Tabelle 2.5 dargestellt definiert. Wesentliches Element ist hierbei die Skalierbarkeit der Größen.

Tabelle 2.5: Definitionen des Begriffs Baureihe²⁰⁰

Autor	Spezifikum	Visualisierung
PONN & LINDEMANN 2011	Anpassungskonstruktion mit gleicher Funktion und Wirkkonzept, die in Leistungsdaten, Abmessungen und anderen Größen verschieden sind.	
PAHL & BEITZ 2013	Technische Gebilde, die dieselbe Funktion mit der gleichen Lösung, in mehreren Größenstufen und bei möglichst gleicher Fertigung in einem weiten Anwendungsbereich erfüllen	

¹⁹⁸Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

¹⁹⁹Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

ALBERS et al. definieren die Baureihe ebenfalls im Kontext der Systemtheorie wie folgt.²⁰¹

Definition 11: Baureihe

Eine Baureihe bezeichnet mehrere technische Systeme, die eine ähnliche Produktarchitektur aufweisen. Die jeweiligen technischen Systeme unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Attribute, die durch Skalieren variiert werden.

Unter der Produktarchitektur wird hierbei die Wirkstruktur sowie die Baustruktur und deren Relationen verstanden. Die einzelnen Attribute wie z. B. Größe und Leistung können dabei variiert werden. Zur Skalierung der Attribute werden häufig Ähnlichkeitsgesetze verwendet.

Die technischen Systeme erfüllen folglich dieselbe Funktion mit dem gleichen Lösungsprinzip. Daher ist es meist möglich, die gleichen Fertigungsverfahren und Werkstoffe zu verwenden.²⁰² Als Beispiel für eine Baureihe können Elektromotoren in unterschiedlichen Größenstufen genannt werden.

Baukasten

Ein Baukasten besteht aus unterschiedlichen Bausteinen, bei denen es sich um Komponenten oder Baugruppen handeln kann. Mit diesen Bausteinen ist es möglich, unterschiedliche Produkte zu konfigurieren. In Tabelle 2.6 sind ausgewählte²⁰³ Definitionen aufgeführt.

²⁰⁰Ponn & Lindemann, 2011 vgl. auch Ehrlenspiel, Kiewert & Lindemann, 2007; Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, Heusel, Bronnhuber, Hufenbach, Helms, Schlick, Klocke, Dilger & Müller, 2013 vgl. auch Schuh, Lenders, Nußbaum & Rudolf, 2012.

²⁰¹Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

²⁰²Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

²⁰³Ein umfangreiches Review diverser Definitionen ist in Jiao, Simpson & Siddique, 2007 zu finden.

Tabelle 2.6: Definitionen des Begriffs Baukasten²⁰⁴

Autor	Spezifikum	Visualisierung
PONN & LINDEMANN 2011	Eine möglichst große Zahl an Produktvarianten wird aus einer möglichst geringen Anzahl an Bausteinen mit unterschiedlicher Funktion und Gestalt zusammengesetzt.	
PAHL & BEITZ 2013	Besteht aus Bausteinen mit oft unterschiedlichen Lösungen, die durch Kombination verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen.	
SCHUH 2015	Besteht aus Bausteinen. Durch die Definition standardisierter Schnittstellen ist eine vielfältige Kombinierbarkeit möglich, sodass Varianten effizient erzeugt werden können.	

Baukästen werden im Kontext der vorliegenden Arbeit nach der Definition von ALBERS et al. verstanden.²⁰⁵

Definition 12: Baukasten

Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können.

Hierbei wird ein Baukasten als ein abstraktes Gebilde verstanden, das kein gebrauchsfertiges Produkt darstellt, sondern die Bausteine umfasst, aus welchen technische Systeme konfiguriert werden können. Das Baukasten-Regelwerk spezifiziert die Produktarchitektur (bestehend aus Wirkstruktur und Baustuktur) der Subsysteme mit dem Ziel, die Kompatibilität der Subsysteme zu gewährleisten. Dabei sind insbesondere die Schnittstellen der Bausteine zu beachten. Die Baukastenentwicklung setzt sich somit sowohl aus der Entwicklung von Subsystemen des Baukastens zusammen, die eine Konfigurierbarkeit von Produkten ermöglichen, als auch der Entwicklung des Baukasten-Regelwerks. Erfolgt die Konfiguration durch den Anwender (wie bei Elektroschraubern),

²⁰⁴Ponn & Lindemann, 2011 vgl. auch Biegert, 1971; Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, Heusel, Bronnhuber, Hufenbach, Helms, Schlick, Klocke, Dilger & Müller, 2013 vgl. auch Feldhusen & Gebhardt, 2008; Schuh, 2015 vgl. auch Arnoscht, 2013.

²⁰⁵Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

handelt es sich um einen Anwenderbaukasten. Erfolgt sie hingegen durch den Hersteller (wie bei Fahrzeugen), handelt es sich um einen Herstellerbaukasten.²⁰⁶

Neben diesem Merkmal unterscheiden PONN & LINDEMANN die in Tabelle 2.7 aufgeführten Merkmale. Die im Kontext der vorliegenden Arbeit primär betrachteten Ausprägungen sind blau hervorgehoben.

Tabelle 2.7: Merkmale von Baukästen²⁰⁷

Merkmal	Ausprägungen und Beispiele	
Baukastennutzer	Anwenderbaukasten z. B. Küchenmaschinen-Baukasten	Herstellerbaukasten z. B. PKW-Baukasten
System Abgrenzung	Geschlossener Baukasten z. B. Getriebe-Baukasten	Offener Baukasten z. B. Baugerüst-Baukasten
Baukastenstruktur	Strukturgebundener Baukasten z. B. Sitz-Baukasten Automobil	Strukturungebundener Baukasten z. B. Möbel-Baukasten
Reinheit	Reinsystem z. B. Werkzeug-Baukasten	Mischsystem z. B. Sondermaschinen-Baukasten

Unter geschlossenen Baukästen werden Baukästen verstanden, die eine endliche Anzahl an Produktvarianten besitzen. Dies steht im Gegensatz zu einem offenen Baukasten, wie beispielsweise dem Baugerüst-Baukasten, der immer wieder zu neuen Systemen konfiguriert werden kann. Bei einem strukturgebundenen Baukasten ist zusätzlich die Produktarchitektur festgelegt. Unter der Reinheit eines Baukastens versteht man, inwieweit sich die Produkte ausschließlich aus Bausteinen zusammensetzen.²⁰⁸

In Abbildung 2.23 ist schematisch ein Baukasten sowie ein Produkt auf Basis des Baukastens dargestellt.

²⁰⁶Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

²⁰⁷nach Ponn & Lindemann, 2011.

²⁰⁸Ponn & Lindemann, 2011.

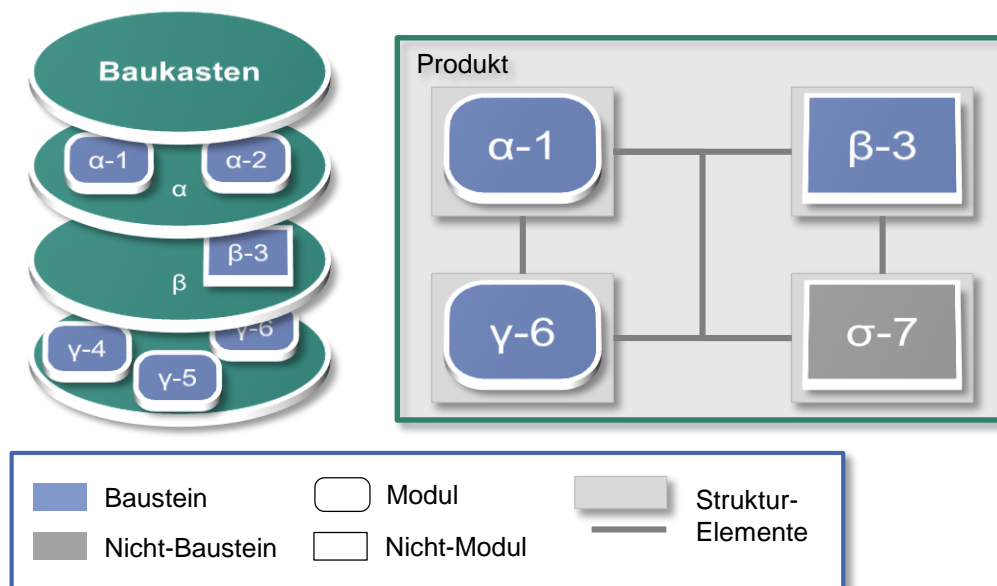


Abbildung 2.23: Schematische Darstellung eines Baukastens und eines auf dem Baukasten basierenden Produkts²⁰⁹

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass sowohl der Baukasten als auch das Produkt eine Struktur besitzen. Diese haben Wechselwirkungen zueinander, sind aber nicht zwangsläufig identisch, da sich das Produkt auch aus Nicht-Bausteinen zusammensetzt. Ein Baukasten beinhaltet dabei sowohl Module, die austauschbar sind, als auch Bausteine, für die keine Alternative vorgesehen ist. Kommen diese Bausteine also in allen Produkten vor, handelt es sich hierbei um eine Plattform. Diese Kombination der unterschiedlichen Bauweisen wird nachfolgend mithilfe des Fraktalen Charakters erklärt.

Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden

Aus den vorgestellten Definitionen nach ALBERS et al. für Module, Plattformen und Baureihen, die im Kontext der Systemtheorie definiert sind und daher einen fraktalen Charakter besitzen, ergibt sich die Möglichkeit, unterschiedliche Beobachtungen zur Kombination der Standardisierungsmethoden zu erklären.²¹⁰ Denn betrachtet man die Definitionen jeweils auf ihrer Systemebene und ihrer Subsystemebene, so können die unterschiedlichen Bauweisen miteinander kombiniert werden.²¹¹ Dies wird

²⁰⁹nach Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

²¹⁰vgl. fraktalen Charakter der Problemlösungsmethode SPALTEN in Kapitel 2.1.2 und Albers, Braun & Muschik, 2010.

²¹¹Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

anhand der Abbildung 2.24 erklärt und anschließend an einem Praxisbeispiel veranschaulicht.

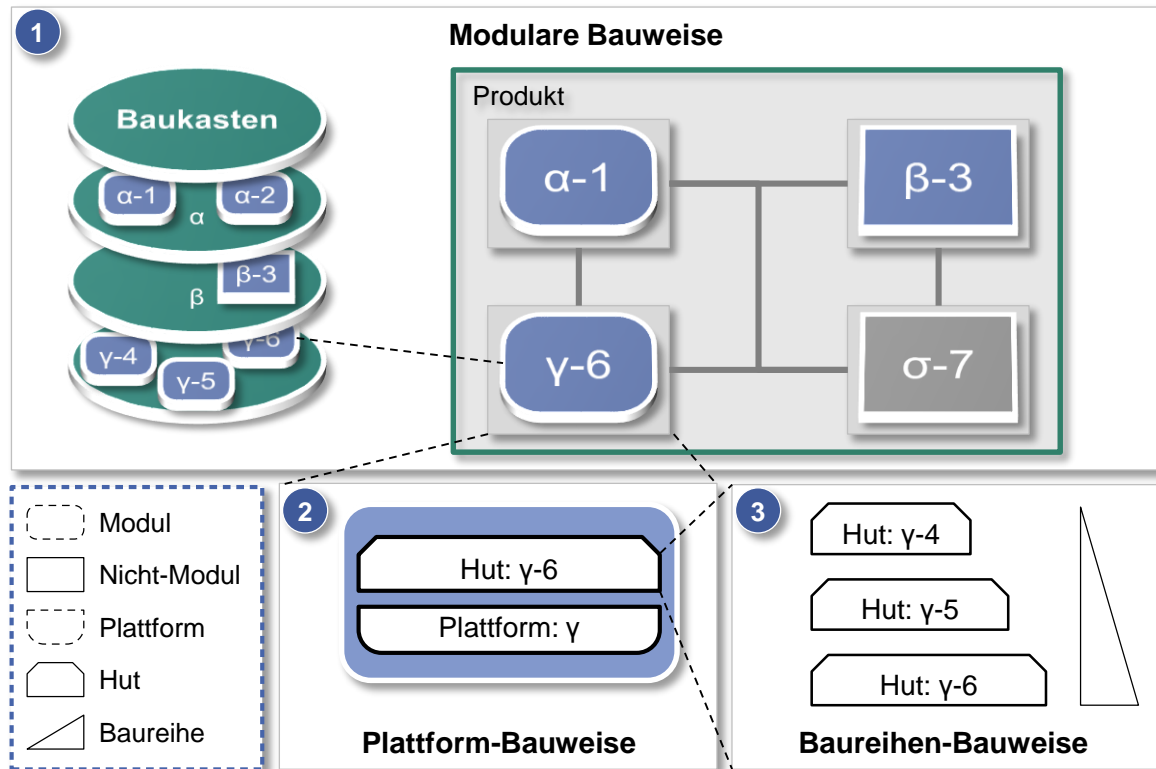


Abbildung 2.24: Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden²¹²

In dem abgebildeten Fall ist ein Produkt gemäß der modularen Bauweise aufgebaut, da dessen Subsysteme austauschbar sind, um die Menge aller Funktionen zu variieren (1 in Abb. 2.24). Ein Subsystem kann wiederum für sich betrachtet und auf dessen Ebene weitere Standardisierungsmethoden angewendet werden. So ist in diesem Fall auf der Subsystemebene eine Plattformbauweise dargestellt (2), da die unterschiedlichen Module so aufgebaut sind, dass deren Subsysteme eine gemeinsame Plattform bilden. Die Subsysteme werden ausschließlich anhand des Hutes in der Menge aller Funktionen variiert. Betrachtet man dabei den Hut (3), kann dieser wiederum durch eine Standardisierungsmethode entwickelt werden, wie beispielsweise eine Baureihe. Dies kann prinzipiell so weitergeführt werden und wird als fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden bezeichnet.²¹³

Die Kombination unterschiedlicher Standardisierungsmethoden beobachten diverse Autoren. So beschreiben HOFFMANN & VIETOR in einer Fallstudie bei der Volkswagen AG (VW), dass Module nach einem Grundumfang und einem Variierungsumfang

²¹²nach Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

²¹³Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

entwickelt werden.²¹⁴ Dies beschreibt nach dem fraktalen Charakter eine modulare Bauweise, deren Subsysteme anhand einer Plattform-Bauweise gestaltet werden. Weitere Beispiele für die Kombination von Standardisierungsmethoden sind bei KIESER & BLESSING²¹⁵ sowie bei ALGEDDAWY & ELMARAGHY²¹⁶ nachzulesen. Diese Autoren beschreiben Module, die durch Baureihen aufgebaut sind. Analog stellt SCHUH fest, dass Plattformen aus Modulen bestehen können, welche er als Basismodule bezeichnet.²¹⁷

Am Beispiel des Baukastens einer Werkzeugmaschine der Trumpf Gruppe wird der fraktale Charakter im Folgenden veranschaulicht (vgl. Abb. 2.25).

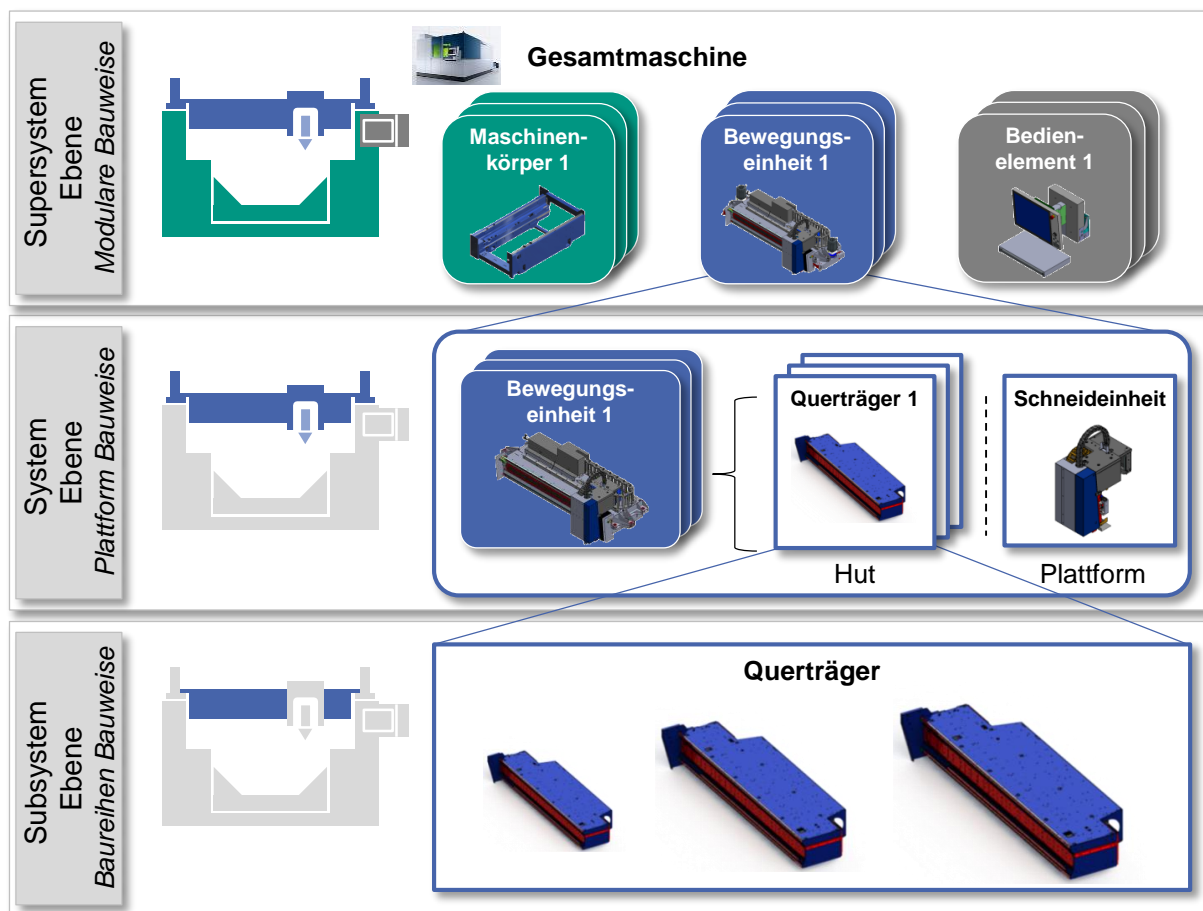


Abbildung 2.25: Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden am Beispiel eines Werkzeugmaschinen Baukastens²¹⁸

²¹⁴Hoffmann & Vietor, 2014.

²¹⁵Kieser & Blessing, 2010.

²¹⁶AlGeddawy & ElMaraghy, 2013.

²¹⁷Schuh, 2005.

²¹⁸Fraktaler Charakter in Anlehnung an Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015 nach Birk, 2015, betreute Abschlussarbeit. Bild Trumpf GmbH

Als höchste Systemebene wird die Werkzeugmaschine festgelegt. Diese ist aufgrund der Austauschbarkeit ihrer Teilsysteme nach einer modularen Bauweise aufgebaut. Betrachtet man das Modul Bewegungseinheit, stellt man fest, dass dieses selbst nach der Plattform-Bauweise entwickelt ist. Während die Schneideinheit über die unterschiedlichen Module hinweg identisch ist, werden Querträger in ihrer Größe variiert, um die unterschiedlichen Module zu generieren. Dieser Hut kann allerdings wiederum als Baureihe betrachtet werden, da die Varianten die gleiche Produktarchitektur aufweisen und in der Länge variieren. Dies ist ein Beispiel dafür, wie auf jeder Systemebene eine andere Standardisierungsmethode verwendet werden kann.

2.3.2 Baukastenentwicklung

Betrachtet man Baukästen nach der Definition von ALBERS et al., so beinhaltet die Baukastenentwicklung Aktivitäten zur Entwicklung des Baukasten-Regelwerks, zur Entwicklung von Bausteinen sowie Aktivitäten zur Entwicklung von Produkten, die auf Basis der Bausteine konfiguriert werden können. Daraus wird deutlich, dass starke Wechselwirkungen zwischen dem Baukasten-Regelwerk, den Bausteinen und den Produkten vorherrschen. Diese sind in Abbildung 2.26 schematisch dargestellt.

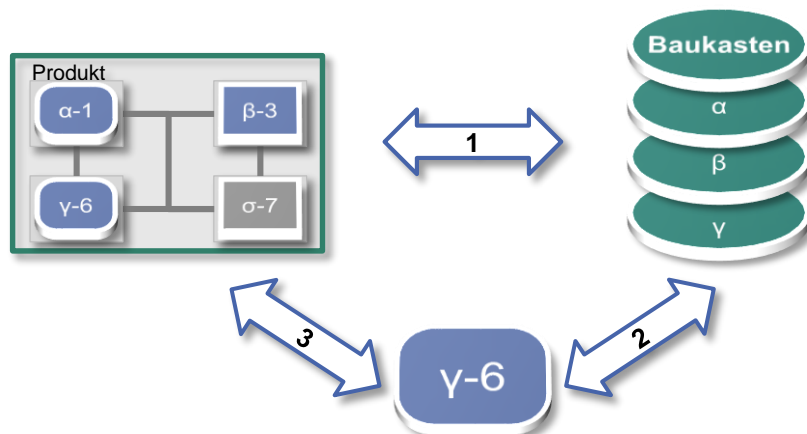


Abbildung 2.26: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Produkten, dem Baukasten-Regelwerk und den Bausteinen

Im Folgenden wird der Stand der Forschung zu den Aktivitäten der Baukastenentwicklung dargestellt und diskutiert. Anschließend werden sich daraus ergebende Herausforderungen speziell in der Frühen Phase der Baukastenentwicklung beschrieben.

Vorgehensmodell zur Baukastenentwicklung

Zur Entwicklung des Baukasten-Regelwerks gibt es umfangreiche Forschungsarbeiten, hierbei wird auch von Modularisierung gesprochen. Die Arbeiten befassen sich mit der Analyse bestehender - meist noch nicht modularer - Produktgenerationen (1 in Abbildung 2.26), auf deren Basis geeignete Schnittstellen sowie Modulausprägungen definiert werden. Hierbei ist beispielsweise die benötigte Anzahl an Modulausprägungen festzulegen, um die gewünschte Produktvarianz zu ermöglichen. Auf Basis der Arbeiten werden grundsätzliche Vorgaben abgeleitet, um Bausteine entwickeln zu können (2). Auf die Arbeiten wird im Folgenden eingegangen.

KOPPENHAGEN entwickelt eine Methode zur Ableitung modularer Produktarchitekturen. Diese basiert unter anderem auf Arbeiten zur „Design Structure Matrix“.²¹⁹ Dadurch wird eine Dekomposition bestehender Produktgenerationen ermöglicht und auf Basis der „Quality Function Deployment“ eine modulare Produktarchitektur abgeleitet.²²⁰ Die Produktarchitekturen werden in darauffolgenden Arbeiten um Aspekte der räumlichen Lage von Modulen²²¹ und der Modellierung des Funktion-Gestalt-Zusammenhangs erweitert.²²² Im Kontext der Automobilindustrie entwickelt RENNER einen Ansatz zur Konzeption von Baukästen auf Basis der Kundensicht²²³ und PFLIEGER einen Ansatz zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Auslegungsparametern und der Energieeffizienz eines Hybrid-Triebstrangs.²²⁴ KIPP untersucht des Weiteren, wie die interne Vielfalt minimiert und dies methodisch unterstützt werden kann.²²⁵

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Gestaltung innovativer Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen“ wird ein ganzheitlicher Ansatz entwickelt, der die Aktivitäten zur Entwicklung des Baukasten-Regelwerks, der Bausteine und der darauf basierenden Produkte darstellt. Das hierbei entstandene Vorgehensmodell ist in Abbildung 2.27 dargestellt.²²⁶

²¹⁹Eppinger, Whitney, Smith & Gebala, 1994.

²²⁰Kopenhagen, 2004.

²²¹vgl. Blees, 2011. und Krause, Kipp & Blees, 2012.

²²²Sedchaicharn, 2010.

²²³Renner, 2007.

²²⁴Pflieger, 2015.

²²⁵vgl. Kipp, 2012. und Kipp, Blees & Krause, 2010.

²²⁶Schuh, 2015.

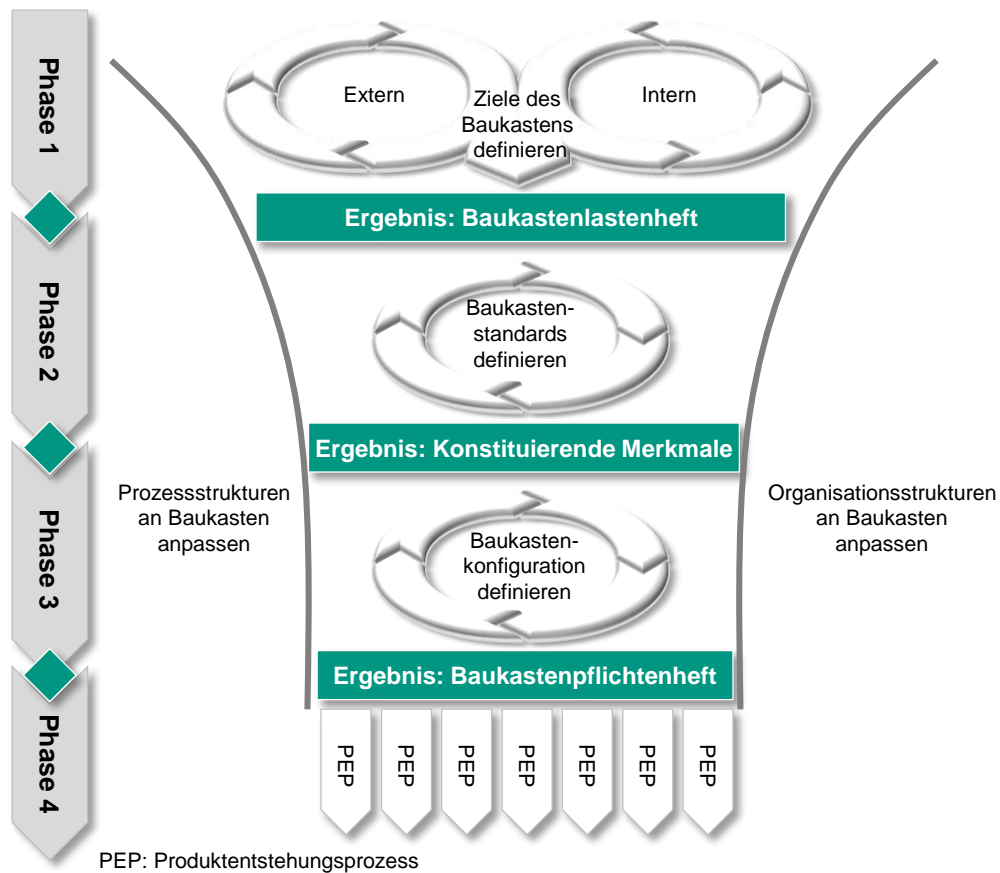


Abbildung 2.27: Vorgehensmodell zur Gestaltung von Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen²²⁷

Das Vorgehensmodell ist in 4 Phasen unterteilt. Die erste Phase beginnt mit einer „Aufnahme der externen und internen Anforderungen“ zur Definition eines Baukastenlastenhefts. Die externen Marktanforderungen setzen sich aus den Prozessschritten „maximalen Betrachtungsbereich festlegen“, „Wettbewerbsarenen für den Baukasten identifizieren“, „relevante Wettbewerbsarenen analysieren“ und „Absatzszenarien und Konfigurationsräume ableiten“ zusammen. Die internen Anforderungen beinhalten die Prozessschritte „generische Produktstruktur aufbauen“, „Ist-Varianz und Variantentreiber analysieren“, „maximale Wertschöpfungsstrukturen abbilden“ und „Varianz in den Prozessen analysieren“. In der zweiten Phase werden die „Baukastenstandards definiert“ und als Ergebnis konstituierende Merkmale abgeleitet. Die dritte Phase beinhaltet die „Definition der Baukastenkonfiguration“, die in einem Baukastenpflichtenheft mündet. Auf Basis dessen beginnen in der vierten Phase „Produktentstehungsprozesse“.²²⁸

²²⁷nach Schuh, 2015.

²²⁸Schuh, 2015.

Bei diesem Vorgehensmodell handelt es sich um ein klassisches Wasserfallmodell, bei dem einzelne Phasen durch Meilensteine unterteilt werden und zunächst die Ergebnisse einer Phase erzielt werden müssen, um die nächste Phase zu beginnen.²²⁹ Obwohl durch die Kreise Iterationen angedeutet werden, sind diese als Nachbesserung zu verstehen. Denn das ebenfalls entwickelte Bewertungsmodell fungiert „als Quality Gate. So muss bei unzureichender Wirtschaftlichkeit eine weitere Iteration der entsprechenden Phase im Vorgehensmodell durchgeführt werden, um mit der nächsten Phase des Vorgehensmodells zu beginnen“.²³⁰ Der sequentielle Charakter des Modells wird durch Ablaufdiagramme zur Entwicklung eines Baukastens unterstrichen. In Abbildung 2.28 ist exemplarisch das Ablaufdiagramm zur „Erstellung einer Modulstruktur“ dargestellt, welches den Prozessschritt „Module identifizieren“ in der 3. Phase („Baukastenkonfiguration definieren“) repräsentiert.²³¹

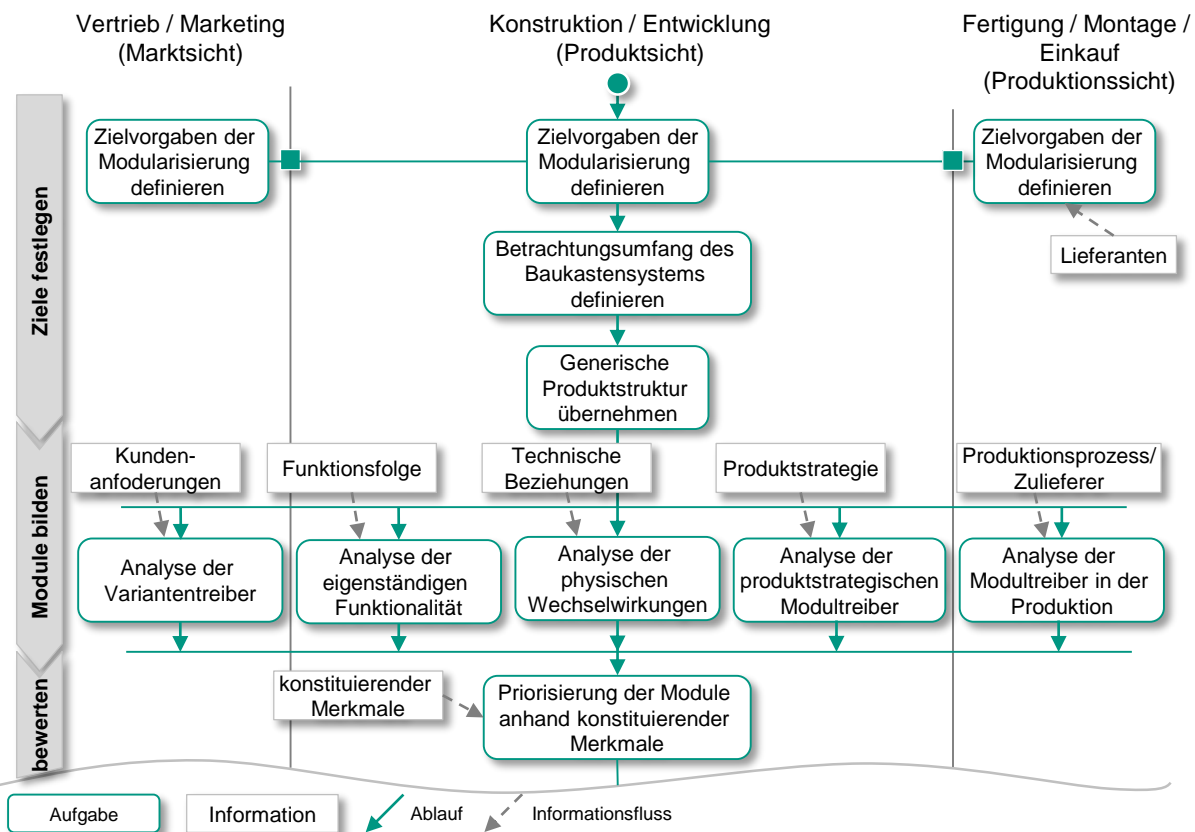


Abbildung 2.28: Ablaufdiagramm zur Erstellung einer Modulstruktur²³²

Bei dem vorgestellten Ablaufdiagramm wird vorausgesetzt, dass ein Zielsystem für die Modularisierung noch vor Beginn des eigentlichen Produktentstehungsprozesses

²²⁹Die Vor- und Nachteile von iterativen und sequentiellen Prozessen werden in Kapitel 2.1.2 diskutiert.

²³⁰Schuh, 2015, S. 35.

²³¹Schuh, 2015.

²³²nach Schuh, 2015.

(4. Phase) entwickelt werden kann. Gerade bei komplexen Produkten sind jedoch die Ziele, Funktionen und Gestalt eines Produktes sowie deren Wechselwirkungen nicht transparent. Daher zeigen Arbeiten zur Forschung an Zielsystemen die Notwendigkeit eines iterativen Vorgehens auf, um der Einzigartigkeit von Produktentstehungsprozessen gerecht zu werden.²³³

Auf die Herausforderung durch die zeitliche Entkopplung der Entwicklung des Baukastens und seiner Bausteine von den dazugehörigen Produkten wird nachfolgend eingegangen.

Herausforderungen in der Baukastenentwicklung

In Abbildung 2.29 sind schematisch die Entwicklungsprozesse eines Baukastens sowie darauf basierender Produkte dargestellt.

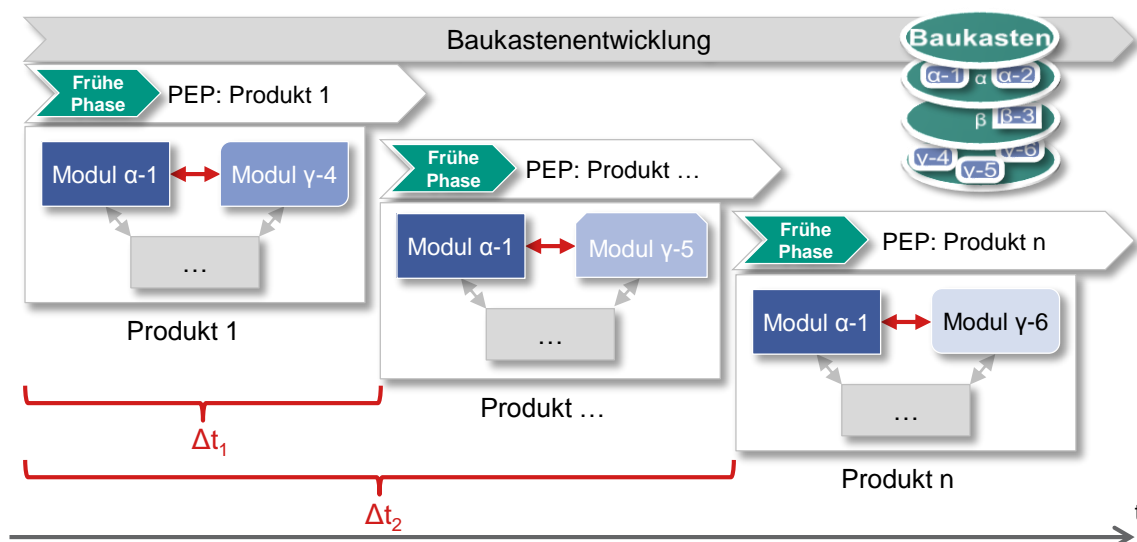


Abbildung 2.29: Entwicklungsprozesse des Baukastens und der Produkte²³⁴

Die einzelnen Produkte werden hierbei nicht gleichzeitig, sondern in einem zeitlichen Versatz, entwickelt. Dies wird in Branchen wie der Automobilindustrie angewendet, um die Mitarbeiter des Unternehmens kontinuierlich auszulasten. Auf diese Weise können sowohl die Hochphasen der Entwicklung als auch die Anlaufphasen der Produktion zeitlich verteilt werden. Die Entwicklung des Baukastens wird im dargestellten Prozess als eine Aktivität im Sinne des iPeM verstanden und verläuft kontinuierlich. Sie beginnt

²³³vgl. z. B. Albers, 2010; Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012; Lohmeyer, 2013; Ebel, 2015.

²³⁴nach Albers, Bursac & Scherer, 2014.

mit der Entwicklung des ersten Produkts und endet mit Abschluss des letzten Entwicklungsprojekts. Es sind exemplarisch drei Produkte abgebildet, die auf einem Baukasten basieren und das gleiche Modul verwenden. Dies führt zu unterschiedlichen Herausforderungen. Einerseits steigt die Unsicherheit durch den hohen Zeitversatz und andererseits entstehen Abhängigkeiten zwischen den Modulen, die berücksichtigt werden müssen.²³⁵ Ein Beispiel hierfür ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, die in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat und weitreichende Auswirkungen auf die Komponenten von Fahrzeugen mit sich bringt.²³⁶

Die Unsicherheit führt dazu, dass Elemente des Baukastens für Produkte entwickelt werden, deren Entwicklung erst Jahre später beginnt. Hieraus ergibt sich, dass bereits in sehr frühen Phasen unsicherheitsbehaftete Ziele abgeleitet werden müssen. Daher muss die Entwicklung des Baukastens und der Module kontinuierlich weitergeführt werden, um die abgeleiteten Ziele mit der Zeit zu validieren und gegebenenfalls Bausteine mittels Übernahmevariation anzupassen.²³⁷ Aufgrund des Zeitversatzes werden einzelne Subsysteme erst später entwickelt, um neue Ziele wie Kundenwünsche oder Gesetzesanforderungen zu erfüllen. Die Kompatibilität zwischen den Modulen kann bei komplexen Produkten allerdings nicht alleine durch eine Standardisierung der Schnittstellen sichergestellt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass häufig einzelne Effekte erst durch das Zusammenspiel mehrerer Subsysteme ersichtlich werden. Ein Beispiel hierfür sind Bauraumkonflikte.²³⁸

Die Abhängigkeit zwischen den Modulen bewirkt zusätzlich, dass notwendige Anpassungen nicht wie bei Entwicklungen ohne Baukasten erfolgen können. Stattdessen müssen die Änderungen an einem Modul mit den Entwicklern unterschiedlicher Produkte abgestimmt werden. Hierfür wird eine gemeinsame Kommunikationsgrundlage benötigt, die eine konsistente Abbildung des Baukastens und der zugehörigen Produkte ermöglicht.²³⁹

2.3.3 Zwischenfazit

Im Kontext der Baukastenentwicklung wird auch von Komplexitätsmanagement gesprochen; es ist jedoch zu hinterfragen, inwiefern dieser Begriff zutreffend ist. Betrachtet

²³⁵Albers, Bursac & Scherer, 2014.

²³⁶Tschöke, 2015.

²³⁷vgl. Kapitel 2.1.2

²³⁸Albers, Bursac & Scherer, 2014.

²³⁹Albers, Bursac & Scherer, 2014.

man die im vorherigen Kapitel dargestellten Merkmale der Baukastenentwicklung wird ersichtlich, dass bei der Entwicklung eines Moduls und der dazugehörigen Produkte folgende Herausforderungen einer herkömmlichen Produktentwicklung nochmals verstärkt auftreten: Die Anzahl der Relationen zwischen Modulen nimmt deutlich zu, da ein Modul in Wechselwirkung zu unterschiedlichen Modulen steht. Für die Entwicklung eines Moduls nimmt entsprechend auch die Anzahl an Elementen im Ziel- und Objektsystem zu. Außerdem erhöht sich durch den Zeitversatz die Unsicherheit und folglich die Dynamik des Systems. Nach der Definition von Komplexität,²⁴⁰ wonach sich diese aus der Anzahl der Elemente, deren Wechselwirkungen und ihrer Dynamik zusammensetzt, wird eine Entwicklung auf Basis von Baukästen komplexer. Da Produkte mit zunehmend mehr Funktionsumfang und mehr Wechselwirkungen mit anderen Produkten von Kunden gewünscht werden, sollte es auch nicht das Ziel der Entwicklungsmethodik sein, die Komplexität zu managen. Vielmehr sollten stattdessen Methoden und Prozesse entwickelt werden, die den Produktentwicklern einen Umgang mit der zunehmenden Komplexität ermöglichen.

2.4 Fazit

Zur Unterstützung der Baukastenentwicklung wurden zentrale Begriffe wie Modul, Plattform, Hut, Baureihe und Baukasten mithilfe der Systemtheorie definiert und in eine konsistente Ontologie für die vorliegende Arbeit überführt. Durch die Baukastenentwicklung kann der Übernahmevariationsanteil von Bausteinen erhöht und dadurch können Kostenpotentiale gehoben werden. Allerdings konnte gezeigt werden, dass dies - aufgrund zusätzlicher Wechselwirkungen und einer Erhöhung der Dynamik - eine nachhaltige Komplexitätssteigerung in der Entwicklung mit sich bringt. Hieraus wurde geschlussfolgert, dass es bei komplexen Produkten notwendig ist, die Baukastenentwicklung nicht als unabhängige, vorgelagerte Phase eines Produktentstehungsprozess zu verstehen, sondern als begleitende Aktivität im Sinne des iPeM. In Abbildung 2.30 ist dies schematisch dargestellt.

²⁴⁰vgl. z. B. Weber, 2005.

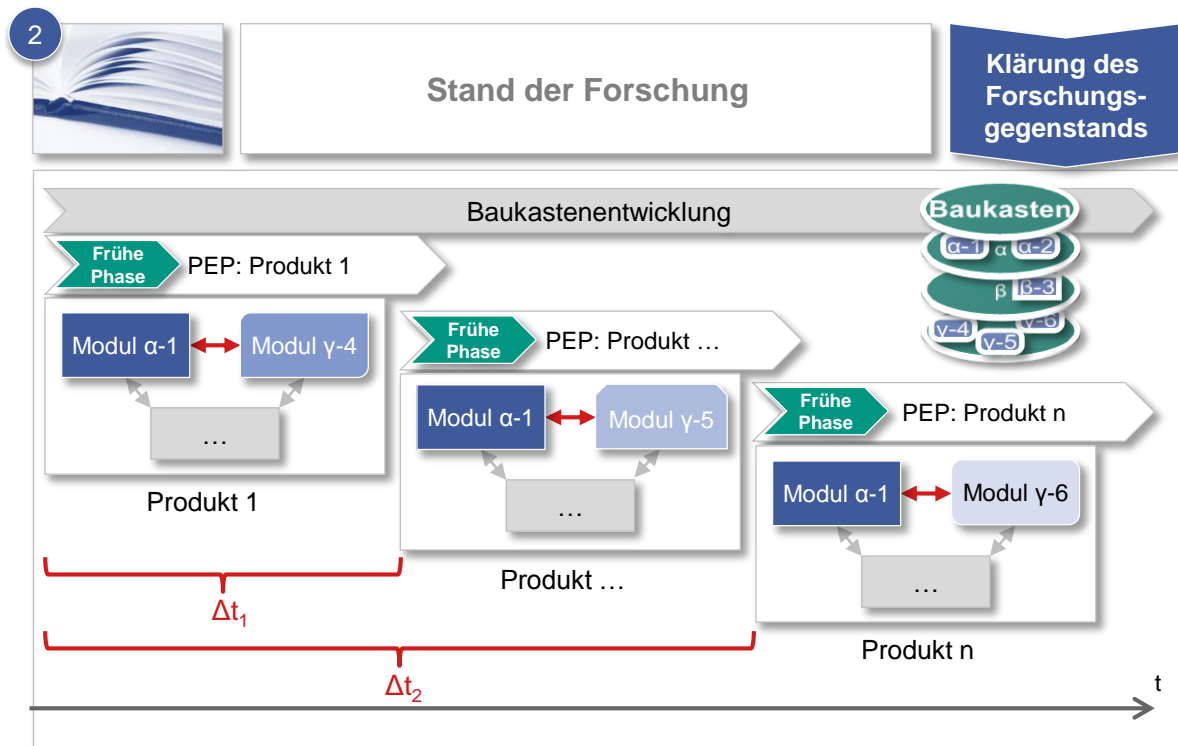


Abbildung 2.30: Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

Als grundlegendes Beschreibungsmodell wurde zunächst die Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS vorgestellt und auf Basis dessen eine Definition für die Frühe Phase abgeleitet. Das Unsicherheitsdilemma als zentrales Merkmal der Frühen Phase wurde diskutiert und es wurde aufgezeigt, dass diesem durch ein iteratives Vorgehen begegnet werden kann. Es wurden unterschiedliche Arten von Iterationen vorgestellt und es wurde dargelegt, dass hierfür eine kontinuierliche Entwicklung von Zielsystem und Objektsystem notwendig ist. Als Ansatz, um wesentliche Elemente des Ziel- und Objektsystems zu explizieren, wurde das MBSE und die Sprache SysML eingeführt. Dabei wurde der Bedarf ersichtlich, die abstrakte Sprache für die Entwicklungspraxis effizienter als bisher nutzbar zu machen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Zielsetzung der Arbeit eingegangen und anschließend die Vorgehensweise vorgestellt.

3.1 Zielsetzung

Zur Zielsetzung der Arbeit wird der Forschungsbedarf beschrieben. Dieser wird durch Forschungshypothesen im Kontext der vorliegenden Arbeit fokussiert und anschließend durch Forschungsfragen operationalisiert.

3.1.1 Forschungsbedarf

Durch die Entwicklung von Baukästen wird das Ziel verfolgt, den Übernahmevariationsanteil bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen zu steigern. Dabei dienen neben der Vorgängergeneration weitere Produkte, die auf demselben Baukasten beruhen, als Referenzprodukte. Werden Elemente des Baukastens weiterentwickelt, muss sichergestellt werden, dass diese Bausteine in verschiedenen Produkten mit stark unterschiedlichen Zeithorizonten zum Einsatz kommen können.

Die zusätzlichen Wechselwirkungen und eine erhöhte Dynamik führen zu einer nachhaltigen Komplexitätssteigerung in der Entwicklung. Um einen Umgang mit der Komplexität zu ermöglichen, ist es von zentraler Bedeutung, die Produktentwicklung als einen iterativen Prozess und dabei die Baukastenentwicklung als eine begleitende Aktivität im Sinne des iPeM zu verstehen.

Aus dieser neuen Betrachtung der Baukastenentwicklung ergeben sich Forschungsbedarfe. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, ein iteratives Vorgehen bei der Entwicklung von Baukästen und den dazugehörigen

Produkten zu erleichtern. Dazu sollen Produktmodelle entwickelt werden, die eine Modellierung von Baukästen und Produkten in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützen.

Zu diesem Zweck eignet sich der Ansatz des MBSE. Hiermit können interdisziplinäre Entwicklerteams mechatronische Produkte in einem Modell abbilden. Die Informationen werden nicht wie üblich in unabhängigen Dokumenten gespeichert, sondern in einem durchgängigen, rechnergestützten Produktmodell zusammengeführt und mithilfe einzelner Sichten situationsspezifisch ausgeleitet. Durch das konsistente Modell des Baukastens und der dazugehörigen Produkte können Wechselwirkungen zwischen Modulen transparent gemacht werden und damit die Unsicherheit in der Frühen Phase der Produktentwicklung reduziert werden.

Für das MBSE bietet sich die Sprache SysML an. Diese ist zwar in ihren Meta-Ebenen konsistent, allerdings für die Erstellung von Modellen relativ abstrakt und zeitintensiv. Bisher wurde noch nicht untersucht, wie mithilfe des Ansatzes der Produktgenerationsentwicklung Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden können, die Modellbildung effizienter zu gestalten.

Ziel der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, die Baukastenentwicklung durch das MBSE im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu unterstützen. Dazu soll untersucht werden, wie Informationen aus vorherigen Produktgenerationen dazu beitragen können, Baukästen und die darauf basierenden Produkte effizient zu modellieren.

3.1.2 Forschungshypothesen

Der dargestellten Zielsetzung liegen Forschungshypothesen zu Grunde. Sie stellen zentrale Annahmen dar, auf welchen die folgenden Untersuchungen aufbauen und die im Folgenden vorgestellt werden.

Forschungshypothese 1

Die Entwicklung eines Baukastens für komplexe Produkte führt zu einzigartigen Prozessen, die eine iterative Vorgehensweise erfordern.

Forschungshypothese 2

Eine iterative Vorgehensweise kann durch eine konsistente Modellierung des Baukastens und der dazugehörigen Produkte nach dem MBSE-Ansatz unterstützt werden.

Forschungshypothese 3

Die Modellierung nach dem abstrakten MBSE-Ansatz kann durch den Ansatz der Produktgenerationsentwicklung effizient gestaltet werden.

3.1.3 Forschungsfragen

Basierend auf dem Forschungsbedarf und den zugrunde liegenden Hypothesen werden folgende Forschungsfragen formuliert. Sie dienen der Operationalisierung der Zielsetzung und lauten:

1. Wie werden in der Entwicklungspraxis Produktmodelle für die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung effizient erstellt und verwaltet?
2. Wie können Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden, um die Modellierung von Baukästen und Produkten in der Frühen Phase effizient zu gestalten?
3. Wie kann durch die Modellierung nach dem MBSE-Ansatz die Baukastenentwicklung und die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützt werden?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird im folgenden Kapitel die Vorgehensweise erklärt.

3.2 Vorgehensweise

Zunächst wird die Vorgehensweise mithilfe der Spiral of Applied Research und der Design Research Methodology (DRM) vorgestellt und anschließend auf unterschiedliche empirische Methoden sowie die Untersuchungsumgebung eingegangen.

3.2.1 Forschungsmethode

Zur Beantwortung von Forschungsfragen haben sich in der Wissenschaftstheorie diverse Vorgehensweisen etabliert. Allerdings sind diese nur bedingt auf technikorientierte Forschung übertragbar, da diese spezifische Merkmale wie beispielsweise eine hohe Interdisziplinarität aufweist.²⁴¹ Daher haben sich im Bereich der technikorientierten Forschung folgende spezifische Ansätze bewährt:

- Spiral of Applied Research²⁴²
- DRM, a Design Research Methodology²⁴³

Beide Ansätze beinhalten Schritte zur Analyse und Synthese, außerdem weisen sie auf einen iterativen Charakter der Forschungsarbeiten hin. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen darin, dass der erstgenannte Ansatz ein längerfristiges Forschungsvorhaben mit mehreren Teilprojekten unterstützt, während der zweite Ansatz einen eher generischen Rahmen darstellt, um ein spezifisches Forschungsprojekt abzuleiten. Da beide Ansätze Vorteile aufweisen, werden in der vorliegenden Arbeit beide Ansätze verwendet. Zunächst wird die Arbeit in die „Spiral of Applied Research“ eingeordnet, um einen größeren Zusammenhang beschreiben zu können und anschließend wird mithilfe der DRM eine Vorgehensweise für die Untersuchungen abgeleitet.

Spiral of Applied Research

Die „Spiral of Applied Research“ ist primär für umfangreiche Forschungsvorhaben (z. B. das Forschungsprogramm eines Lehrstuhls) geeignet und umfasst insgesamt acht Stufen.²⁴⁴ Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird ein Teil der Spirale durchlaufen. Dieser ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

²⁴¹Eckert, Clarkson & Stacey, 2003.

²⁴²Eckert, Clarkson & Stacey, 2003.

²⁴³Blessing & Chakrabarti, 2009.

²⁴⁴Eckert, Clarkson & Stacey, 2003.

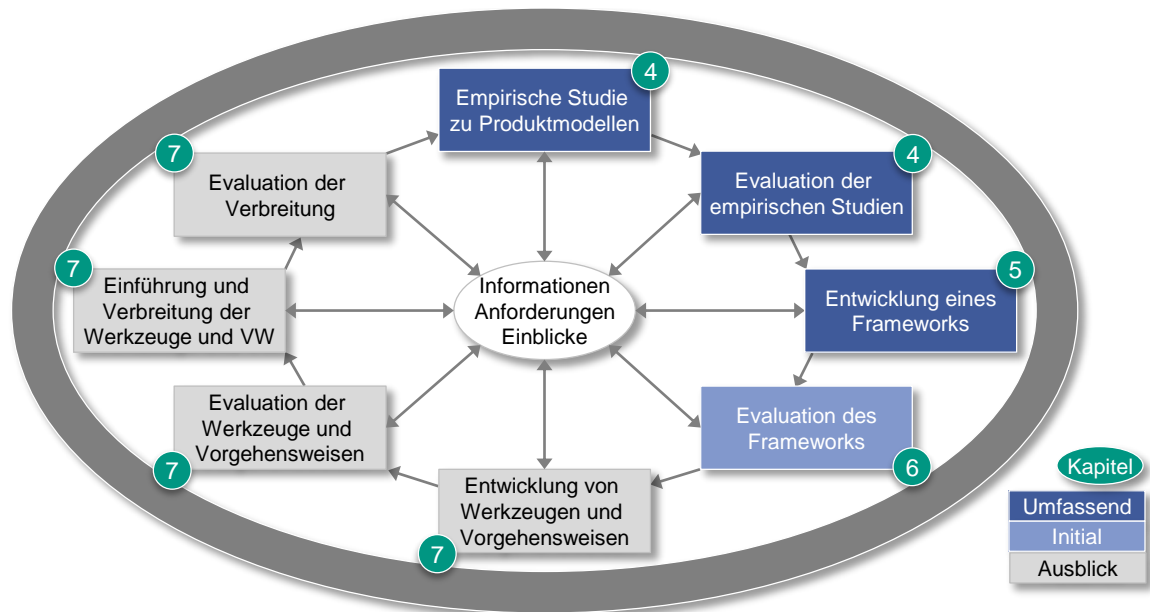


Abbildung 3.1: „Spiral of Applied Research“²⁴⁵ im Kontext dieser Arbeit

Die Stufen werden im Folgenden näher beschrieben:

- Die **empirische Studie zu Produktmodellen** dient der Analyse in der Entwicklungspraxis. Ziel der Untersuchung ist es, einen Einblick in die Vorgehensweise bei der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen zu gewinnen (vgl. Kapitel 4).
- Durch die **Evaluation der empirischen Studie** werden ebenfalls in Kapitel 4 die gefundenen Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Generalisierbarkeit diskutiert und mit bestehenden Ansätzen verglichen.
- Die **Entwicklung eines Frameworks** basiert auf den Erkenntnissen der vorherigen Schritte und hat zum Ziel, eine Grundlage für eine zielgerichtete Baukastenentwicklung in der Frühen Phase der Produktentwicklung zu bieten. (vgl. Kapitel 5).
- Die **Evaluation des Frameworks** erfolgt in Kapitel 6 auf Basis von Fallstudien, wodurch die Eignung des Frameworks hinsichtlich der Nutzung für Werkzeuge und Vorgehensweisen bewertet wird.
- Die verbleibenden Schritte werden im Ausblick (vgl. Kapitel 7.2) diskutiert.

²⁴⁵nach Eckert, Clarkson & Stacey, 2003.

Design Research Methodology

Die DRM basiert auf einem generischen Framework und beinhaltet unterschiedliche Phasen. Diese können für ein spezifisches Forschungsprojekt ausgeprägt werden.²⁴⁶ In Abbildung 3.2 ist dieses Framework im Bezug auf die vorliegende Arbeit dargestellt.

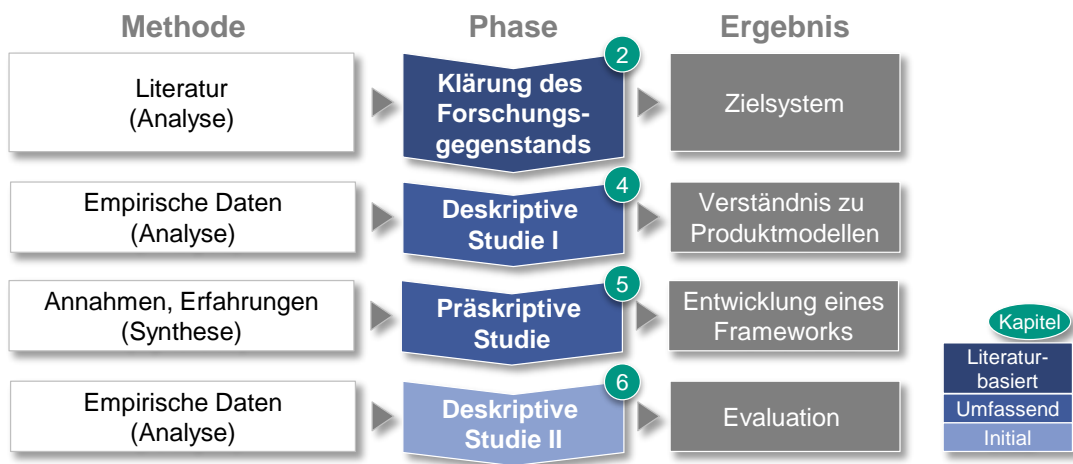


Abbildung 3.2: DRM²⁴⁷ im Kontext der vorliegenden Arbeit

Die Phasen können „Literatur-basiert“, „umfassend“ und „initial“ ausgeprägt werden. Daraus können die in Tabelle 3.1 dargestellten Typen von Forschungsprojekten klassifiziert werden.

Tabelle 3.1: Typen von technikorientierten Forschungsprojekten²⁴⁸

Typ	Klärung des Forschungsgegenstands	Deskriptive Studie I	Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
1	Literatur-basiert	→ Umfassend		
2	Literatur-basiert	→ Umfassend	→ Initial	
3	Literatur-basiert	→ Literatur-basiert	→ Umfassend	→ Initial
4	Literatur-basiert	→ Literatur-basiert	→ Literatur-basiert Initial / Umfassend	→ Umfassend
5	Literatur-basiert	→ Umfassend	→ Umfassend	→ Initial
6	Literatur-basiert	→ Literatur-basiert	→ Umfassend	→ Umfassend
7	Literatur-basiert	→ Umfassend	→ Umfassend	→ Umfassend

²⁴⁶Blessing & Chakrabarti, 2009.

²⁴⁷nach Blessing & Chakrabarti, 2009.

Die Phasen dieser Arbeit können auf Basis des Typ 5 wie folgt beschrieben werden:

- Die **Klärung des Forschungsgegenstands** wurde in Kapitel 2 beschrieben und daraus die Zielsetzung abgeleitet, die Baukastenentwicklung in der Frühen Phase der Produktentwicklung mithilfe des MBSE zu unterstützen.
- Durch die **deskriptive Studie I** wird in Kapitel 4 auf Basis einer empirischen Untersuchung ein Verständnis bzgl. der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen in der Entwicklungspraxis geschaffen.
- Im Rahmen der **präskriptiven Studie** wird hieraus ein Framework entwickelt und beschrieben, wie dadurch die Baukastenentwicklung unterstützt werden kann (vgl. Kapitel 5).
- Die **deskriptive Studie II** dient der Evaluation des Frameworks mithilfe analytischer Methoden. Sie wird in Kapitel 6 vorgestellt.

3.2.2 Empirische Methoden

Die in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Ansätze eignen sich dazu, Forschungsprojekte methodisch zu organisieren. So kann mithilfe der „Spiral of Applied Research“ ein Forschungsprojekt innerhalb eines größeren Forschungsvorhabens eingeordnet werden und durch die DRM ein Forschungsprojekt geplant werden. Die Ansätze weisen jedoch nicht auf konkrete Methoden hin, um den Methodenentwickler beim Vorgehen innerhalb der Forschung zu unterstützen. Zu diesem Zweck wurde auf Basis des iPeM das „integrated Design Support Development Modell“ von ALBERS & MARXEN entwickelt (vgl. Abbildung 3.3).²⁴⁹

²⁴⁸nach Blessing & Chakrabarti, 2009.

²⁴⁹Marxen, 2014.

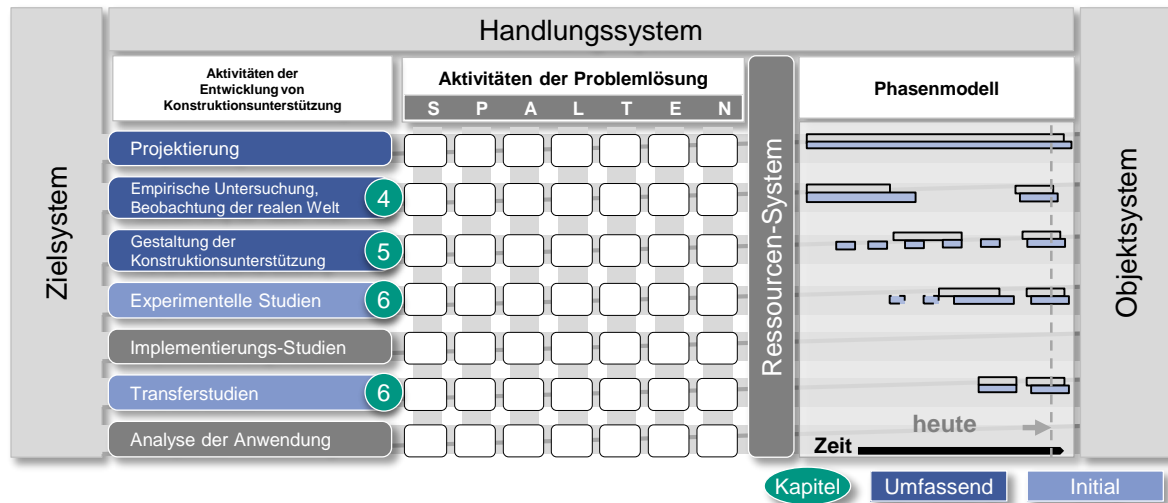



Abbildung 3.3: Integrated Design Support Development Modell²⁵⁰ im Kontext dieser Arbeit

Das Metamodell ermöglicht das Vorgehen im Phasenmodell abzubilden und den Forscher durch eine Methodenauswahl zu unterstützen. Aus dem Phasenmodell wird ersichtlich, dass die vorliegende Forschungsarbeit zwar linear im Text dargestellt wird, aber stark iterativ verlaufen ist. Durch die Methodenauswahl können konkrete Methoden für die einzelnen Bereiche ausgewählt werden. Im Folgenden werden einzelne Forschungsmethoden näher vorgestellt, welche im Kontext der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommen. Dabei wird farblich hervorgehoben, warum die Methoden für die einzelnen Studien geeignet sind. Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage kommt zunächst die Methode Fragebogen zum Einsatz. Diese ist in Form eines Steckbriefs in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Steckbrief zur Forschungsmethode: Fragebogen²⁵¹

Fragebogen 	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen • Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen • Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungs-Unterstützung in realen Prozessen • Felder der Entwicklungsmethodik, in der die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Datenerfassung • Einfacher Zugang zu großen Auswahlgruppen, vor allem mit online Umfragen • Es steht eine große Anzahl von Online-Umfrage-Tools zur Verfügung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Forscher kann nicht eingreifen • Präzise Fragen müssen formuliert werden. Missverständnisse durch die Teilnehmer können die komplette Studie ruinieren

²⁵⁰nach Marxen, 2014.

Anschließend wird mithilfe eines retrospektiven Protokolls (vgl. Tabelle 3.3) ein Einblick in ausgewählte Produktentstehungsprozesse gewonnen.

Tabelle 3.3: Steckbrief zur Forschungsmethode: retrospektives Protokoll²⁵²

Retrospektives Protokoll	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen • Menschzentrierte Forschung an Entwicklungsmethodik • Wenn eine Zusammenfassung gegenüber Details bevorzugt wird
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklungsaktivitäten bleiben durch Beobachter oder unnatürliche Situation unberührt • Entwicklungsaktivitäten sind von realen industriellen Prozessen zugänglich • Daten sind bereits zusammengefasst, wenn sie gesammelt werden
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Produziert nicht viele Details, sondern eine zusammengefasste Version • Indirekte Datensammlung, die Befragten können ungenaue Daten liefern (aufgrund von z. B. vergessenen Angaben und falschen Erinnerungen)

Abschließend wird zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage eine Baukastenentwicklung im Detail analysiert. Dazu wird eine teilnehmende Beobachtung durchgeführt. Der Steckbrief zur Forschungsmethode ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Steckbrief zur Forschungsmethode: teilnehmende Beobachtung²⁵³

Teilnehmende Beobachtung	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen • Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen • Langzeitprojekte, welche Einblicke in Entwicklungsaktivitäten und Prozesse ermöglichen, indem die Datenquelle eine soziale Gruppe ist, in der der Forscher Mitglied wird
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Datensammlung, da der Beobachter ein Teil der Datenquelle ist
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Beobachtung kann die Entwickler von den Aktivitäten ablenken, die natürlichen Abläufe innerhalb des Teams werden gestört • Gefahr der Unehrllichkeit, um sich in einem guten Licht darzustellen, wenn den Team-Mitgliedern bewusst ist, dass der Forscher unter ihnen ist

²⁵¹nach Marxen, 2014.

²⁵²nach Marxen, 2014.

Zur Anwendung der Ergebnisse aus der präskriptiven Studie werden zwei Fallstudien (vgl. Tabelle 3.5) in der Entwicklungspraxis durchgeführt.

Tabelle 3.5: Steckbrief zur Forschungsmethode: Fallstudie²⁵⁴

Fallstudie	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Explorative Forschung mit dem Ziel, Forschungsfragen zu identifizieren • Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen • Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen • Untersuchung von komplexen Situationen, wenn das Ziel ein ganzheitliches Bild ist • Identifikation von Hypothesen • Falsifizierung von Theorien • Zeigt Anwendbarkeit / Nutzen einer Entwicklungsunterstützung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Ganzheitlicher Ansatz • Funktioniert auch mit sehr komplexen Situationen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Andauernde Diskussion, ob es eine gültige Forschungsmethode ist oder nicht • Aufwand, durch die notwendige Anwendung von verschiedenen Forschungsmethoden

3.2.3 Untersuchungsumgebung

In diesem Kapitel wird auf die Untersuchungsumgebung eingegangen. In diesem Kontext wird das Forschungsprojekt „Von der Information zur Innovation (IN²)“ vorgestellt.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden diverse Untersuchungen durchgeführt; der Rahmen hierfür wird durch das Forschungsprojekt IN² gesetzt. Ziel des Verbundprojekts ist die Unterstützung der systematischen Entwicklung von Innovationen durch die Kombination von Prozess-, Methoden- und Wissensmanagement. Daraus resultierend sollen Konzepte und Einführungsstrategien für die systematische Entwicklung von Innovationen geschaffen werden. Das vom BMBF geförderte Projekt setzt sich aus einem Konsortium mit den Instituten IPEK und IPRI²⁵⁵ sowie sieben Unternehmen zusammen, welche in Abbildung 3.4 dargestellt sind.²⁵⁶

²⁵³nach Marxen, 2014.

²⁵⁴nach Marxen, 2014.

²⁵⁵International Performance Research Institute

²⁵⁶BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2012.

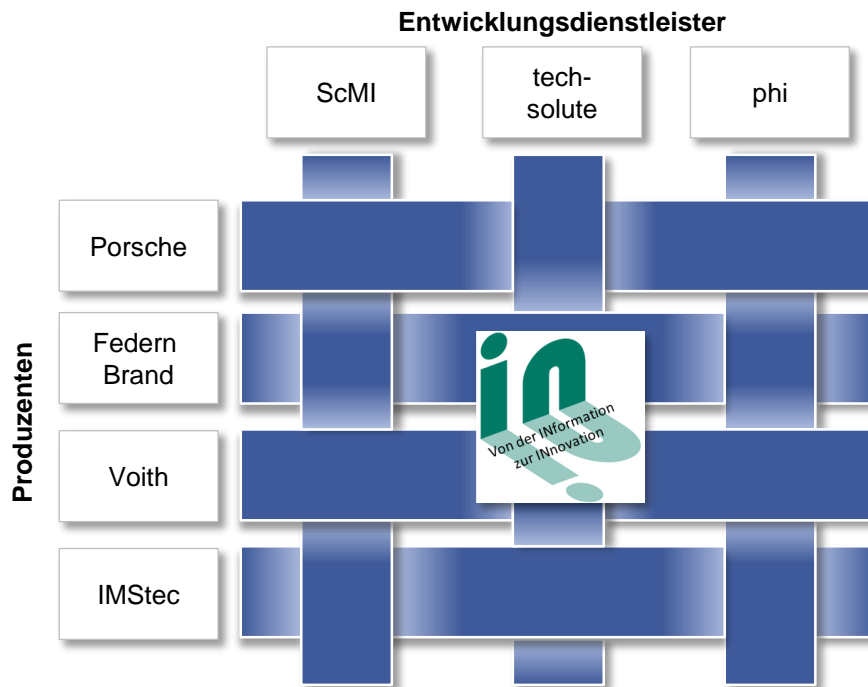


Abbildung 3.4: Zusammensetzung des IN²-Konsortiums²⁵⁷

Die Untersuchungsumgebung eignet sich für die empirische Studie, da durch das gemeinsame Projekt ein guter Einblick in die Produktentstehungsprozesse der Unternehmen gewonnen werden kann. Zudem ist das Konsortium in unterschiedlichen Branchen tätig und weist Teilnehmer mit unterschiedlichen Unternehmensgrößen auf. Die heterogenen Daten erleichtern anschließend die Übertragbarkeit der Ergebnisse, da diese aus unterschiedlichen Perspektiven entstanden sind. Die Konsortialpartner werden im Folgenden jeweils kurz vorgestellt.

Die ScMI AG ist mit mehr als 10 Mitarbeitern als Dienstleister in der strategischen Produktplanung tätig. Dabei entwickelt die Mitarbeiter in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Szenarien mithilfe der Methode Szenario-Management. Sie unterstützt dadurch die Unternehmen in der Strategie- und Produktentwicklung, beispielsweise durch Markt-, Technologie- und Umfeldszenarien.²⁵⁸

Die tech-solute GmbH & Co. KG Karlsruhe ist mit Dienstleistungen in den Bereichen Strategie, Innovationen und Qualität tätig. Unter Strategie-Dienstleistungen fallen beispielsweise Marktanalysen, Technologiescouting und Piraterieschutz. Im Bereich der Innovationen ist das Unternehmen im Bereich Ideengenerierung, Konstruktion, Proto-

²⁵⁷nach Albers & Seiter, 2015.

²⁵⁸ScMI AG, 2014.

typing und Testing tätig. Als Qualitäts-Dienstleistungen werden FMEA-Workshops und Prozess- und Produktoptimierungen angeboten.²⁵⁹

Die phi group ist als Entwicklungsbüro in den Branchen Luftfahrt, Automobil-, Landmaschinen- und Geräteindustrie tätig. Das Unternehmen beschäftigt mehr als 100 Mitarbeiter. Phi unterstützt ihre Kunden hauptsächlich durch Konstruktions- und Simulationsdienstleistungen.²⁶⁰

Die Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (Porsche AG) ist ein Sportwagenhersteller im Premiumsegment mit knapp 20.000 Mitarbeitern. Die Produktpalette ist in den letzten Jahren gewachsen und umfasst derzeit die Modelle Macan, Cayenne, 918-Spyder, 911 Carrera, Boxster/Cayman und Panamera. Diese sind in Abbildung 3.5 dargestellt.²⁶¹



Abbildung 3.5: Produktpalette der Porsche AG²⁶²

Die Brand Group entwickelt und produziert kaltgeformte Federn und Drahtbiegeteile. Die erzeugten Federn werden häufig im Antriebsstrang von Fahrzeugen eingesetzt. Neben der Automobilindustrie stellt das Unternehmen auch Federn für Tore und industrielle Anwendung her. Die Unternehmensgruppe beschäftigt mehr als 700 Mitarbeiter.²⁶³

Die Voith GmbH ist mit mehr als 42.000 Mitarbeitern in den Geschäftsfeldern Papier, Energie, Mobilität und Service tätig. Voith stellt u. a. Investitionsgüter für die Stoffaufbereitung sowie Komponenten zur Aufbereitung von Primärfasern und Altpapier her.²⁶⁴

²⁵⁹www.tech-solute.com, letzter Aufruf am 29.11.2015

²⁶⁰www.phi-group.com, letzter Aufruf am 29.10.2015

²⁶¹Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2013.

²⁶²Bild Porsche AG

²⁶³www.Federn-Brand.de, letzter Aufruf am 29.10.2015

²⁶⁴Voith GmbH, 2014.

Die IMSTec GmbH ist in der Medizintechnik tätig. Das Unternehmen ist im Bereich der Fertigungsautomation und Qualitätsüberwachung aktiv. IMSTec steht für „Integrated Manufacturing Systems and Technology“.²⁶⁵

3.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde auf Basis der „Spiral of Applied Research“ und der DRM das in Abbildung 3.6 dargestellte Vorgehen entwickelt.



Abbildung 3.6: Vorgehensweise im Kontext der vorliegenden Arbeit

Basierend auf dem Stand der Forschung wurde der Forschungsgegenstand untersucht und die Zielsetzung der Arbeit konkretisiert. Zur effizienten Unterstützung der Baukas-

²⁶⁵www.IMSTec.de, letzter Aufruf am 29.10.2015

tenentwicklung mithilfe des MBSE wurden Forschungsfragen abgeleitet. Die erste Forschungsfrage lautet:

1. Wie werden in der Entwicklungspraxis Produktmodelle für die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung effizient erstellt und verwaltet?

Um zu untersuchen, ob mithilfe der Informationen aus der Produktgenerationsentwicklung ein Lösungsansatz gefunden werden kann, wird eine deskriptive Studie durchgeführt. Ziel der Studie ist, mit unterschiedlichen empirischen Methoden das Verständnis im Hinblick auf die effiziente Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen in der Entwicklungspraxis zu verbessern. Dazu wird zunächst eine Fragebogenstudie durchgeführt. Anschließend wird im Rahmen der Teilnehmer des Projekts IN² ein retrospektives Protokoll erstellt und schließlich eine teilnehmende Beobachtung durchgeführt.

2. Wie können Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden, um die Modellierung von Baukästen und Produkten in der Frühen Phase effizient zu gestalten?

Basierend auf den Erkenntnissen soll mithilfe einer präskriptiven Studie ein Framework als Beschreibungsmodell entwickelt werden. Es soll aufzeigen können, wie aus Referenzmodellen eine durchgängige Modellierung von Baukästen und Produkten effizient erfolgen kann.

3. Wie kann durch die Modellierung nach dem MBSE-Ansatz die Baukastenentwicklung und die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützt werden?

Die Evaluation des theoretischen Modells erfolgt durch die zweite deskriptive Studie. Hierdurch soll aufgezeigt werden, wie das Framework dazu beitragen kann, Produktmodelle für die Unterstützung der Baukastenentwicklung zu erzeugen. Dazu werden zwei Fallstudien in der Entwicklungspraxis durchgeführt.

Gemäß der „Spiral of Applied Research“ soll im Ausblick aufgezeigt werden, wie künftig durch das theoretische Modell Werkzeuge und Vorgehensweisen entwickelt werden können, um die Baukastenentwicklung zu unterstützen.

4 Produktmodelle in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

Zunächst wird durch eine Vorstudie der Forschungsbedarf durch Experten aus der Entwicklungspraxis abgesichert und anschließend auf Produktmodelle näher eingegangen. Diese bilden den Entwicklungsstand in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung ab und helfen dadurch, Missverständnisse zu vermeiden. Sie werden in unterschiedlichen Objekten, welche durch diverse Entwicklungsaktivitäten entstehen, repräsentiert. In diesem Kapitel soll deshalb analysiert werden, wie in realen Produktentstehungsprozessen Modelle technischer Produkte entstehen. Dazu soll die in Kapitel 3.1.3 abgeleitete Forschungsfrage beantwortet werden.

1. Wie werden in der Entwicklungspraxis Produktmodelle für die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung effizient erstellt und verwaltet?

Dieser Forschungsfrage soll nach der DRM mithilfe einer deskriptiven Studie beantwortet werden. Um die Produktmodelle untersuchen zu können, werden die Objekte analysiert, welche im PEP entstehen. Außerdem werden die WMS betrachtet, in denen Objekte verwaltet werden. Die Forschungsfrage wird zunächst in folgende Unterfragen unterteilt:

- 1.1 Welche Herausforderungen bestehen bei der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung?
- 1.2 Wie werden die Produktmodelle in realen Produktentstehungsprozessen erstellt und verwaltet?
- 1.3 Welche Lösungsansätze können zur effizienten Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen gefunden werden?

Die Analyse umfasst eine Vorstudie zur Absicherung des Forschungsbedarfs und drei Studien zur Beantwortung der Forschungsfragen. Inhalt der ersten Studie ist die Analyse zu Produktmodellen in unterschiedlichen Firmen und Branchen mittels eines Fragebogens. In der zweiten Studie wird der Fokus auf eine detailliertere Untersuchung mittels der Prozessanalyse von fünf Unternehmen gelegt. Hier wird im Detail betrachtet, wie die Produktentstehungsprozesse ablaufen, wie dabei Objekte entstehen und wie sie verwaltet werden. Eine detaillierte Untersuchung wird in der dritten Studie während der Frühen Phase vorgenommen. Dazu wird eine 3-jährige teilnehmende Beobachtung im Baukasten-, Konzept- und Projektmanagement der Porsche AG durchgeführt.

4.1 Vorstudie

Die Vorstudie wurde im Rahmen des IPEK-Portfoliomanagement Roundtables durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen halbjährlich tagenden Arbeitskreis, an dem Industrievertreter teilnehmen, die sich mit dem Themengebiet des Portfoliomanagements beschäftigen. Die Unternehmen stehen nicht im Wettbewerb zueinander, um eine Offenheit der Teilnehmer zu gewährleisten.

Der abgeleitete Forschungsbedarf wurde mithilfe eines Sounding-Boards evaluiert. Das Sounding-Board ist eine Methode, um gezielt Feedback von Experten zu sammeln. Dazu werden ihnen durch einen unabhängigen Moderator zunächst die zu evaluierenden Aussagen vorgestellt. Die Teilnehmer haben anschließend die Möglichkeit, mithilfe von grünen, gelben und roten Klebepunkten diesen Aussagen zuzustimmen, bzw. zu widersprechen. Anschließend kann jeder Teilnehmer in wenigen Sätzen formulieren, welche kritischen Punkte aus seiner Sicht gegeben sind. Optional kann in einem zusätzlichen Durchgang gemeinsam an Verbesserungsvorschlägen gearbeitet werden. Das Projektteam konzentriert sich auf das Feedback der Teilnehmer und ist nicht in die Diskussion involviert. Das Feedback wird mittels Audioaufnahme aufgezeichnet und anschließend transkribiert.

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Annahmen wurden im Vorfeld negiert, um die Experten nicht zu beeinflussen und um Kritikpunkte aus Sicht der Experten am Stand der Forschung aufnehmen zu können. Im Folgenden werden zunächst die Aussagen und die Bewertung der 10 Experten vorgestellt und anschließend deren Kritikpunkte dargelegt. Die erste Aussage ist in Abbildung 4.1 dargestellt.



Abbildung 4.1: Bewertung der Aussage 1 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables

Die Experten stimmen der Aussage in Abbildung 4.1 im Wesentlichen nicht zu, stattdessen berichtet ein Teilnehmer, dass er „es im Alltag nicht [erlebe], dass [. . .] ein Baukasten, der doch relativ abstrakt ist, wirklich in den Köpfen überall gleich [sei. Denn die Vorstellungen seien] nicht einheitlich.“²⁶⁶ Vielmehr sei es zielführend, „dass man [sich den Baukasten] am Produkt vorstell[t], wie [. . .] er aufgebaut [ist und so] etwas Greifbares hat, [ansonsten könne man] es nicht so richtig fest machen.“²⁶⁷

Gelbe Punkte kamen dadurch zustande, dass „Verstehen [. . .] nicht digital [sei, es gebe auch] durchaus halb verstehen, drei Viertel verstehen oder zwei Drittel [. . .]. Das Ganze zu umfassen, zu begreifen und vollständig zu durchdringen [sei] es nicht. Aber so eine gewisse Vorstellung zu entwickeln, was in die Richtung [. . .] von Beispielen [ginge, das sei] durchaus möglich.“²⁶⁸ Dem stimmt ein weiterer Teilnehmer zu, es sei „bedingt möglich [wenn der Baukasten] gewisse Module hat [und] gewisse Regeln, wie die Module angeordnet werden können. [So sei es möglich, dass man es sich] ansatzweise vorstellen kann, nicht [aber] in der vollen Konsequenz“²⁶⁹

Aus den Aussagen kann geschlussfolgert werden, dass es den Experten schwer fällt, einen Baukasten vollständig auf einer abstrakten Ebene zu durchdenken. Stattdessen werden konkrete Produkte benötigt, um einen Baukasten zu beschreiben. Folglich sollte ein Baukasten und die dazugehörigen Produkte parallel und iterativ entwickelt werden. Dies wird auch anhand der zweiten Aussage deutlich (Vgl. Abb. 4.2).

²⁶⁶Teilnehmer 1

²⁶⁷Teilnehmer 2

²⁶⁸Teilnehmer 5

²⁶⁹Teilnehmer 6

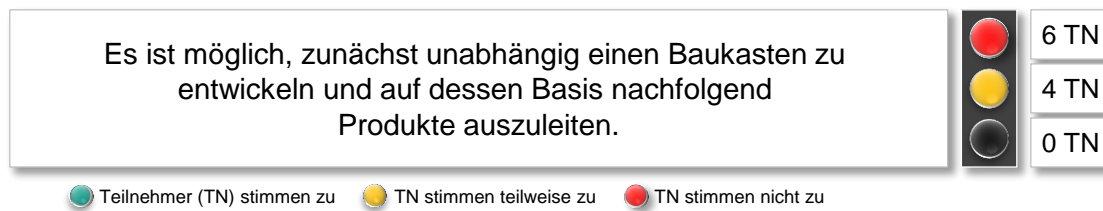


Abbildung 4.2: Bewertung der Aussage 2 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables

Die Teilnehmer merken zur Aussage 2 (vgl. Abbildung 4.2) an, dass sie es „für essentiell [halten], dass man gewisse Beispiele, also Ausprägungen von einem Produkt bei der Baukastenentwicklung, heranzieht [und] daran überprüft: funktioniert der Baukasten [und kann man konkrete] Produkte damit bilden? Wenn man das nicht gegenprüft [...] bevor man das erste Produkt erstellt, ha[be] man keinen Baukasten, der funktioniert.“²⁷⁰ Darüber hinaus würde sich das „Anforderungsprofil für den Baukasten [...] aus den Anforderungen vom Produkt [ableiten], daher [sei es] sehr schwer [den Baukasten und die Produkte] voneinander zu trennen.“²⁷¹ Die Trennung sehen die Teilnehmer als „sehr theoretisch [...] und auch nicht praxistauglich für Unternehmen“ an.²⁷²

Da das Zielsystem bei der Entwicklung neuer Produkte kontinuierlich weiterentwickelt wird, muss auch das Zielsystem des Baukastens parallel zum Produktentwicklungsprozess weiterentwickelt werden. Dies ist notwendig, da das meiste Wissen erst bei der Entwicklung der einzelnen Produkte entsteht. Folglich ist es notwendig, auf die neuen Erkenntnisse zu reagieren und die Projektierung anzupassen. Daher ist es naheliegend, dass jeder Produktentstehungsprozess einzigartig ist (vgl. Abb. 4.3).



Abbildung 4.3: Bewertung der Aussage 3 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables

Wie Abbildung 4.3 zu entnehmen ist, stimmen die Teilnehmer der Aussage nicht zu. Um der Einzigartigkeit gerecht zu werden, müsste „die Produktentwicklung immer noch wie

²⁷⁰Teilnehmer 6

²⁷¹Teilnehmer 4

²⁷²Teilnehmer 7

früher [durchgeführt werden, aber man müsse] Elemente hinzufügen, [um] den Baukasten [zu] etablieren.“²⁷³ Die Baukastenentwicklung würde auch nicht enden, denn man „mache viele Projekte parallel, um diesen Baukasten [. . .] zu füllen. Im Anschluss mache [man] Projekte um den Baukasten zu erweitern und zu verändern [sowie] zu modernisieren. Dies [sei] eine einzigartige Abfolge von Projekten, weil [man das] mit Produkt-Projekten gleichzeitig [mache] und der Ablauf eines Produkt-Projektes [. . .] jedes Mal sehr spezifisch [sei].“²⁷⁴ Gleichzeitig sei „ein paralleles Verfolgen einer Baukastenentwicklung und einer klassischen Produktentwicklung [. . .] herausfordernd, [da] gewisse Freiheiten in den Prozessen [aufgrund von zahlreichen] Abhängigkeiten“²⁷⁵ notwendig seien.

Um diese Abhängigkeiten transparent zu machen, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Produktmodell entwickelt werden, welches es ermöglicht, gleichzeitig den Baukasten und die Produkte abzubilden und somit Iterationen zu erlauben. Hierfür gilt es, in einem Unternehmen entsprechende Prozesse und Organisationsstrukturen zu etablieren, um den Informationsaustausch zwischen den Beteiligten zu fördern (vgl. Abb. 4.4).



Abbildung 4.4: Bewertung der Aussage 4 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables

Zu der Aussage in Abbildung 4.4 äußern sich die Teilnehmer wie folgt. Wie bei der Baukastenstruktur sei es „nicht notwendig, dass man [die Organisationsstruktur] von Anfang ha[be].“²⁷⁶ Es sei vielmehr „ein schrittweiser Entstehungsprozess, [bei dem] nicht alles von vornherein bekannt [sei], aber [man könne] sich schrittweise dem Ganzen nähern.“²⁷⁷ Denn es gebe „unter normalen Umständen [. . .] mehrere interessante Erwachen.“²⁷⁸

²⁷³ Teilnehmer 8

²⁷⁴ Teilnehmer 1

²⁷⁵ Teilnehmer 7

²⁷⁶ Teilnehmer 1

²⁷⁷ Teilnehmer 2

²⁷⁸ Teilnehmer 7

Die Bewertungen und das Feedback der Experten bestätigen, dass Methoden und Prozesse benötigt werden, die ein iteratives Vorgehen bei der Entwicklung von Baukästen fördern. Im Kontext der vorliegenden Arbeit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, damit für die Entwickler eine gemeinsame Kommunikationsbasis entsteht. Dazu soll zunächst analysiert werden, wie Produktmodelle in der Praxis entstehen und eingesetzt werden.

4.2 Herausforderungen bei der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen

Mithilfe der ersten Studie soll ein Überblick gegeben werden, welche Herausforderungen in der Entwicklungspraxis im Kontext der Produktmodellierung bestehen.²⁷⁹

4.2.1 Studiendesign

Im Rahmen des Projekts IN² wurde ein anonymer Online-Fragebogen erstellt. Wesentliche Aspekte des Fragebogens sind der Methodeneinsatz und das Wissensmanagement im PEP. Der Zugang zum Fragebogen besteht über den Internetauftritt des Projekts.²⁸⁰ Zudem wurde die URL von den Projektpartnern an diverse Unternehmen versendet, wodurch Unternehmen unterschiedlicher Branchen und Größen angesprochen werden konnten. Gleichzeitig ist es nicht möglich, eine Rücklaufquote zu berechnen.²⁸¹

Insgesamt haben 247 Entwickler an der Online-Umfrage teilgenommen. Davon haben 131 Teilnehmer alle 33 Fragen beantwortet. Dabei wurden ebenfalls Unternehmenscharakteristiken erhoben. In den folgenden Abbildungen ist die Verteilung der Befragten über Branchen (vgl. Abb. 4.5) und Unternehmensgrößen (vgl. Abb. 4.6) abgebildet.

²⁷⁹Die in Kapitel 4.2 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikationen Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014, Albers, Reiß, Bursac, Urbanec & Lüdcke, 2014 bzw. Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b veröffentlicht worden.

²⁸⁰Der Internetauftritt ist unter folgender URL zu finden: www.in2-Projekt.de, letzter Aufruf am 29.11.2015

²⁸¹Weitere Informationen zum Projekt in Albers & Seiter, 2015.

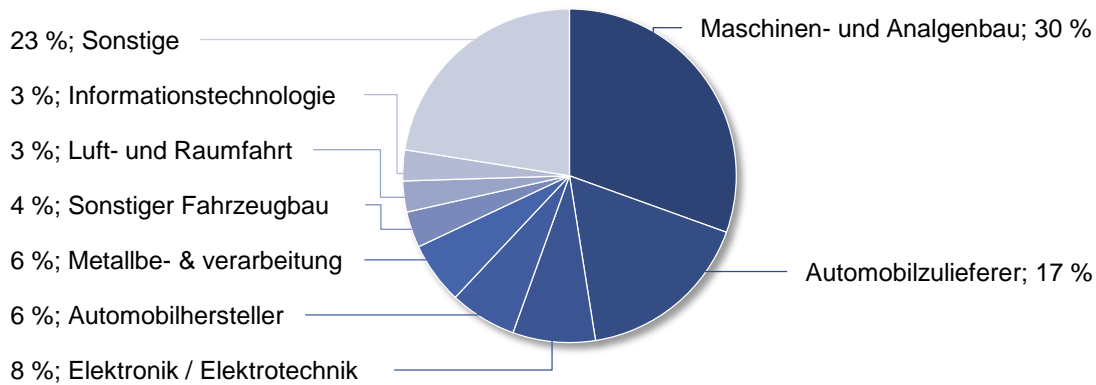


Abbildung 4.5: Verteilung der Befragten anhand der Branchen²⁸²

Die Firmen sind hauptsächlich im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus sowie der Automobilindustrie tätig. Insgesamt haben die Teilnehmer 23 verschiedene Branchen angegeben.

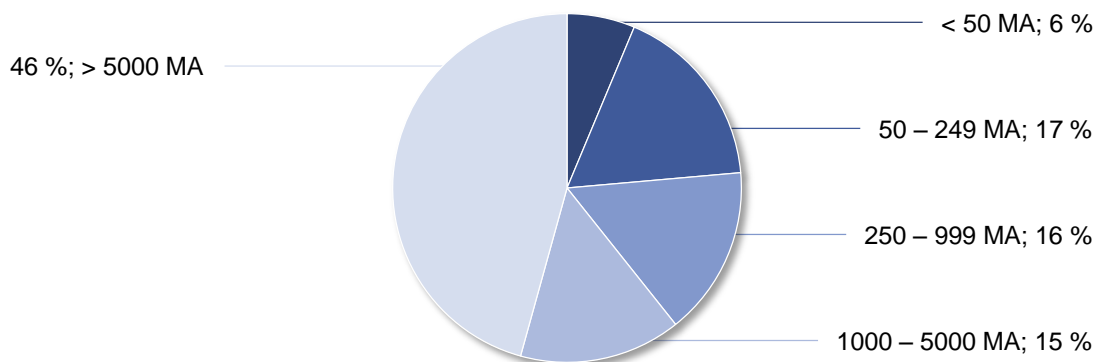


Abbildung 4.6: Verteilung der Befragten anhand der Unternehmensgröße²⁸³

Der Abbildung 4.6 kann entnommen werden, dass der größte Teil der Befragten großen Unternehmen (>5000 Mitarbeiter (MA)) zugeordnet werden kann. Gleichzeitig sind kleine Unternehmen (<250 MA) mit annähernd einem Viertel auch ausreichend vertreten.

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.²⁸⁴ Zu Gunsten der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse ausschließlich mithilfe des arithmetischen Mittels angegeben.

²⁸²nach Albers, Reiß, Bursac, Urbanec & Lüdcke, 2014.

²⁸³nach Albers, Reiß, Bursac, Urbanec & Lüdcke, 2014.

²⁸⁴siehe z. B. Fahrmeir, Künstler, Pigeot & Tutz, 2012.

4.2.2 Ergebnisse der Fragebogenstudie

Basierend auf der Forschungshypothese, dass Informationen aus der Produktgenerationsentwicklung dazu beitragen können, Produktmodelle effizienter zu erstellen, wird zunächst untersucht, ob die Vorgehensweise der Produktgenerationsentwicklung in der Praxis beobachtet werden kann. Darauf aufbauend werden die Herausforderungen bei der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen analysiert.

Produktgenerationsentwicklung

Aus der Definition für die Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS in Kapitel 2.2.1 und den vorgestellten Formeln, ergibt sich der Neuentwicklungsanteil wie folgt:

$$\delta_{n+1} = \frac{|\text{PS}_{n+1} \cup \text{GS}_{n+1}|}{|\text{PS}_{n+1} \cup \text{GS}_{n+1} \cup \text{ÜS}_{n+1}|} [\%] \quad (4.1)$$

Folglich ergibt sich für ein $\delta_{n+1} = 0\%$ eine reine Anpassungskonstruktion und für ein $\delta_{n+1} = 100\%$ eine komplette Neukonstruktion aus der Perspektive der klassischen Konstruktionsmethodik.²⁸⁵ In diesem Kontext wurden die Befragten der Studie gebeten, den Entwicklungsfokus ihres Unternehmens einzuschätzen. Dazu wird ein Schieberegler in 100 Schritten zwischen einer reinen Anpassungsentwicklung (1) und einer kompletten Neuentwicklung (100) bewegt. Die Ergebnisse sind der Abbildung 4.7 zu entnehmen.

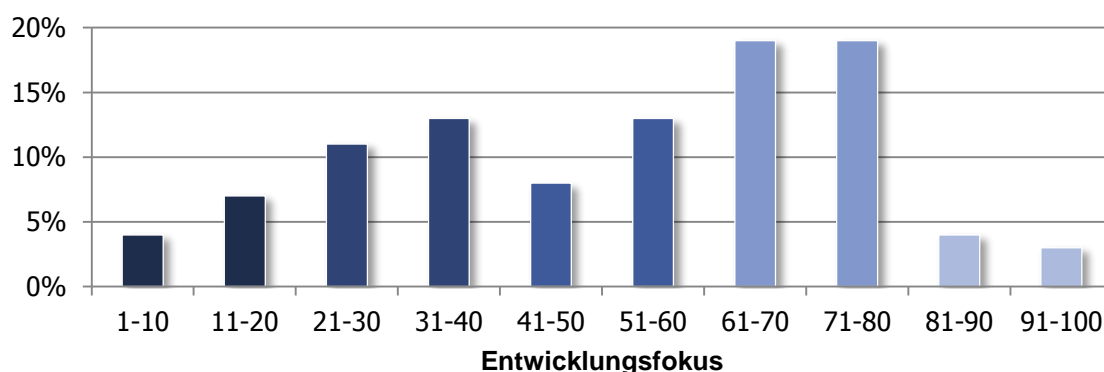


Abbildung 4.7: Entwicklungsfokus der Unternehmen: Zwischen reiner Anpassungskonstruktion (1) und kompletter Neukonstruktion (100) im Sinne von PAHL & BEITZ²⁸⁶

²⁸⁵vgl. Kapitel 2.2.1 und Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote, 2007.

²⁸⁶nach Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014.

Obwohl die Einschätzungen der Befragten subjektiver Natur sind, wird der Bedarf nach der Definition der Produktgenerationsentwicklung bestätigt. Denn lediglich 11 % ordnen sich dem Bereich der Anpassungskonstruktion (1-20) und 7 % der Neukonstruktion (81-100) zu.

Eine Verteilung der Antworten, welche nach den Branchen gruppiert ist, kann Abbildung 4.8 entnommen werden. Dabei sind die Branchen nach den Durchschnittswerten sortiert.

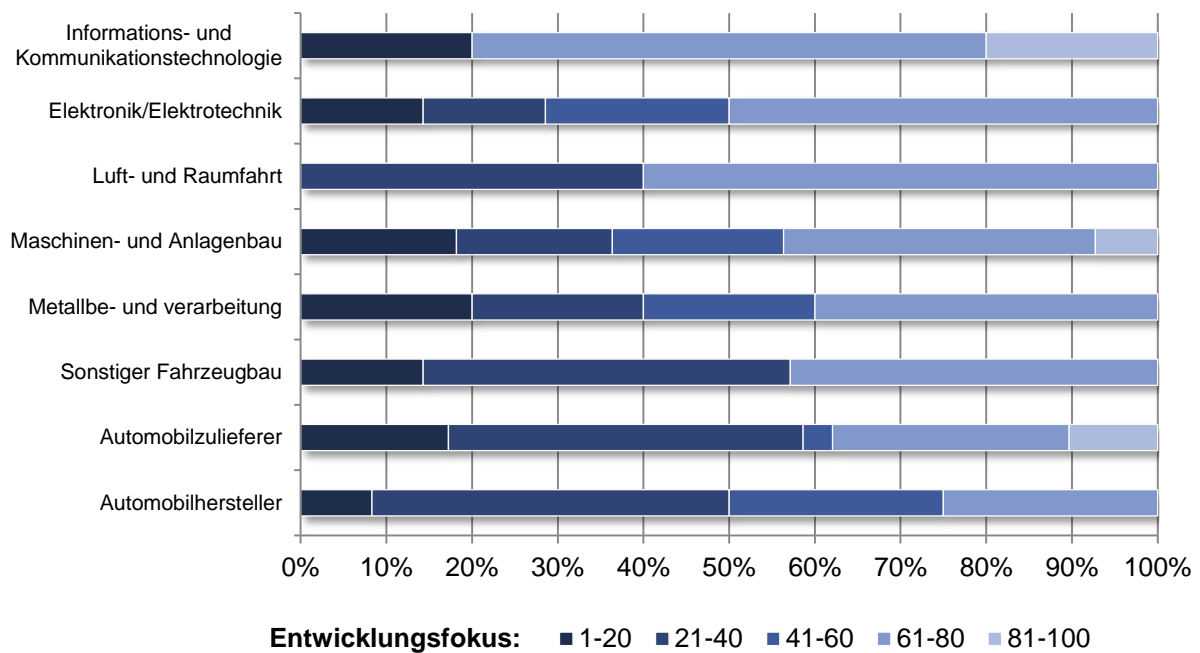


Abbildung 4.8: Entwicklungsfokus der Unternehmen geclustert nach Branchen²⁸⁷

Über die unterschiedlichen Branchen hinweg zeigt sich eine ähnliche Verteilung. Auch hier lassen sich maximal 20 % der Antworten den Extremfällen zuordnen. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass die Branchen wie die Informations- und Kommunikationstechnologie oder die Elektronik und Elektrotechnik eher Unternehmen aufweisen, die einem höheren Neuentwicklungsanteil nachgehen als z.B. in der Automobilindustrie.

Die Verteilung des Entwicklungsfokus kann auch über unterschiedliche Unternehmensgrößen und Unternehmensalter hinweg bestätigt werden. Diese sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

²⁸⁷nach Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

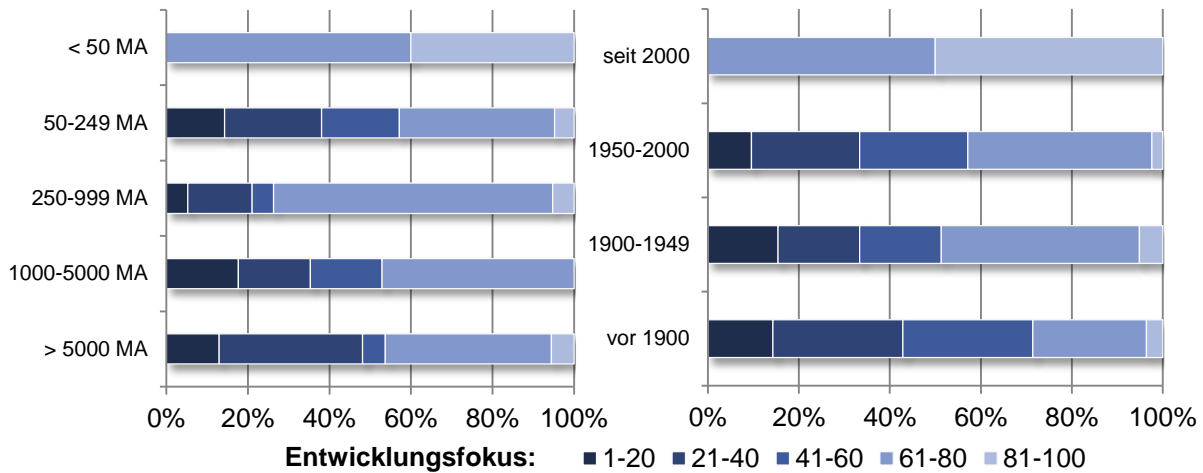


Abbildung 4.9: Entwicklungsfokus der Unternehmen gruppiert nach Unternehmensgröße (links) und -alter (rechts)²⁸⁸

Einzig bei relativ kleinen oder jungen Firmen ist der Anteil an Firmen, die einer Neuentwicklung nachgehen, deutlich höher.

Überblick über aktuelle und abgeschlossene Projekte

Da häufig eine Produktgenerationsentwicklung vorliegt und viele Produkte auf bestehenden basieren, ist es für die Entwicklung neuer Produkte wichtig, dass die Entwickler einen guten Überblick über abgeschlossene Produkte haben, um effizient auf bestehende Informationen zugreifen zu können. Zu diesem Zweck wird ebenfalls untersucht, wie gut der Überblick der Entwickler über bestehende und vergangene Projekte ist. In Abbildung 4.10 ist die Einschätzung der Befragten anhand einer Skala mit sechs Stufen über die zugehörige Unternehmensgröße aufgetragen.

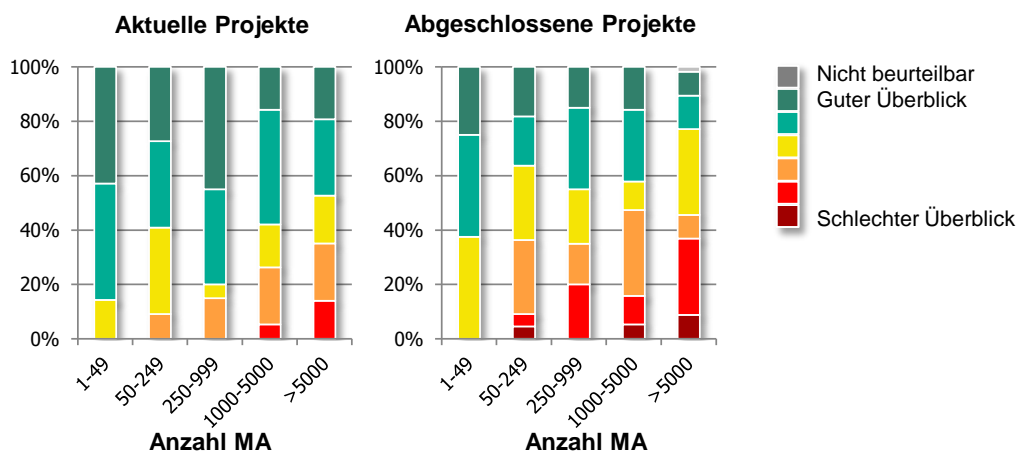


Abbildung 4.10: Überblick über aktuelle (links) und abgeschlossene Projekte (rechts) aufgetragen über unterschiedliche Unternehmensgrößen²⁸⁹

²⁸⁸nach Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

Zum einen zeigt sich, dass tendenziell der Überblick über die Unternehmensgröße abnimmt und zum anderen, dass der Überblick über vergangene Projekte schlechter ist als über die aktuellen. Bei großen Unternehmen (mit mehr als 5000 MA) geben über 75 % der Befragten an, keinen guten Überblick über vergangene Produkte zu haben.

Wissensmanagementsysteme

Objekte, die während der Entwicklung entstehen, werden in WMS gespeichert. Dadurch kann der Überblick der Entwickler über vergangene und akute Projekte gesteigert werden. Diese werden verwendet, um neue Informationen einzugeben und bestehende Informationen aufrufen zu können. In diesem Kontext wurden die Befragten gebeten in einem Freitextfeld das WMS einzugeben, welches sie im Rahmen ihrer Tätigkeit am häufigsten verwenden. In Abbildung 4.11 ist das Ergebnis einer Tag Cloud Analyse der nativen Daten zu sehen.²⁹⁰



Abbildung 4.11: Tag Cloud Analyse der Nennungen der meistgenutzten WMS

Wie der Tag Cloud Analyse entnommen werden kann, ist das am häufigsten verwendete WMS die Windows Ordnerstruktur. Dies bestärkt den Stand der Forschung, wonach

²⁸⁹nach Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014.

²⁹⁰Bei einer Tag Cloud handelt es sich um eine Visualisierungsmethode, wobei die Größe der abgebildeten Worte mit der Häufigkeit ihrer Nennung korreliert. Zur Erstellung dieser Tag Cloud wurde das online Werkzeug TagCrowd verwendet (zu finden unter folgender URL: <http://www.TagCrowd.com/>). Dabei wurde das Werkzeug so eingestellt, dass alle Worte, die zumindest zwei Mal vorkommen angezeigt werden.

häufig eine dokumentenzentrierte Produktentwicklung vorliegt. Die in Abbildung 4.12 dargestellten Ergebnisse zeigen eine Gruppierung der Daten.

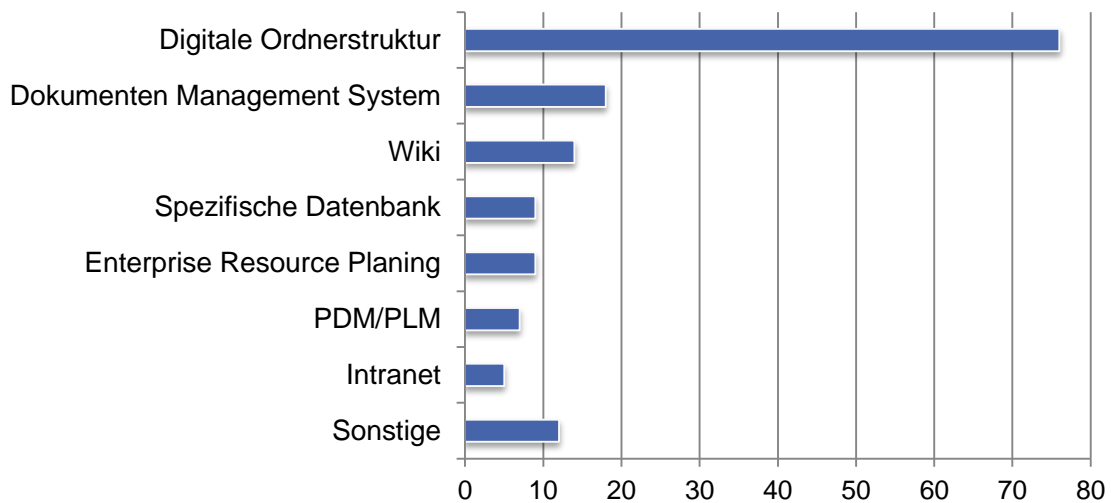


Abbildung 4.12: Gruppierung der Nennungen zu den meistgenutzten WMS²⁹¹

Durch die Gruppierung werden die genannten Begriffe zu einem Oberbegriff zusammengeführt. Unter digitalen Ordnerstrukturen werden z. B. auch Netzlaufwerke verstanden. Ein Beispiel für ein Dokumenten Management System ist Microsoft SharePoint bzw. SAP für Enterprise Resource Planning. Als spezifische Datenbanken werden individuelle Systeme, wie beispielsweise die genannte „Innovationsdatenbank“ oder die „Wettbewerberdatenbank“ verstanden. Unter Sonstiges fällt z. B. „Eigenentwicklung: *Firmenname* Development System“. Die Ergebnisse bestärken zum einen, dass Produktmodelle häufig dokumentenzentriert vorliegen, zum anderen zeigen sie aber auch, dass relativ viele WMS bestehen, welche spezifische Informationen über die Produktmodelle verwalten.

Die Ergebnisse der Bewertung der WMS hinsichtlich Effizienz der Daten Ein- und Ausgabe, der Struktur, der Anwenderfreundlichkeit und der Sicherheit können Abbildung 4.13 entnommen werden. Zu Gunsten der Übersichtlichkeit wird unter Sicherheit das arithmetischen Mittel folgender Bewertungen zusammengeführt: „Sicherheit vor Datenverlust“, „Sicherheit vor unerlaubtem Zugriff“ und „Ausfallsicherheit“.

²⁹¹nach Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014.

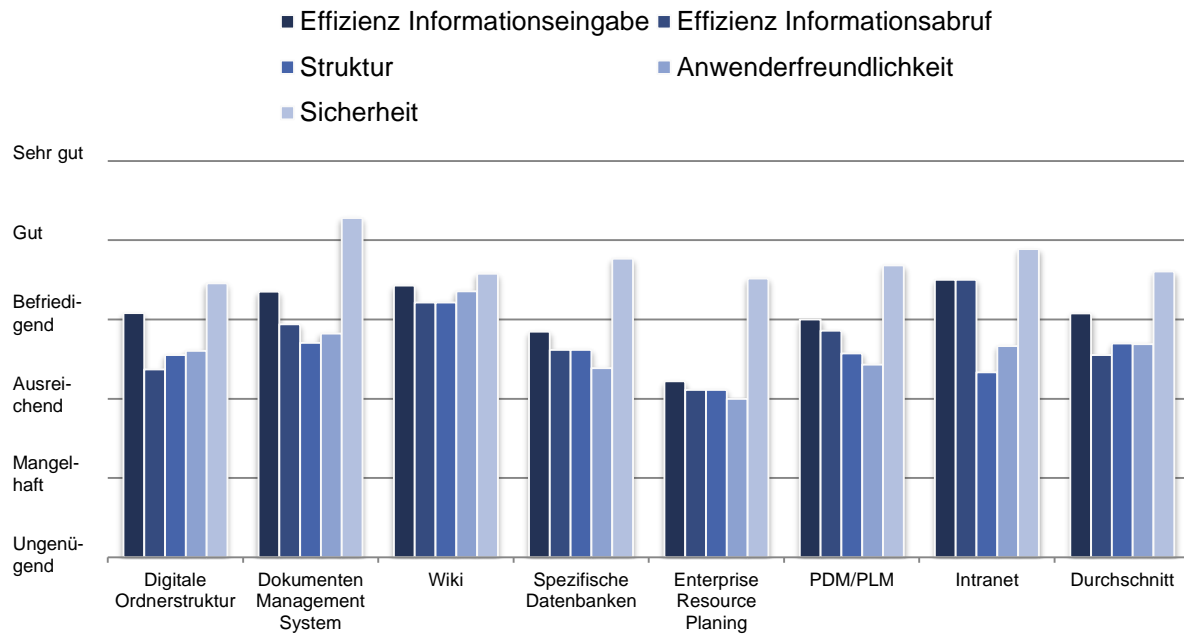


Abbildung 4.13: Bewertung der meistgenutzten WMS hinsichtlich der Effizienz der Daten Ein- und -Ausgabe, der Struktur, der Anwenderfreundlichkeit und der Sicherheit²⁹²

Die auf einer Schulnotenskala bewerteten WMS fallen durchschnittlich schlechter als befriedigend aus. Dabei werden die Sicherheit und die Eingabe von Informationen relativ zum Durchschnittswert gut bewertet, während der Abruf von Informationen unterdurchschnittlich bewertet wird.

4.2.3 Zwischenfazit

Obwohl 93% der Entwicklungen nicht reinen Neuentwicklungen zuzuordnen sind, sondern auf vorherigen Produkten basieren, ist der Überblick über vergangene Projekte schlecht. Denn über 75% der Befragten bei großen Unternehmen (> 5000 MA) geben an, keinen guten Überblick über vergangene Projekte zu besitzen. Die Informationen werden häufig in WMS gespeichert, wobei die Eingabe- und Ausgabefunktionalität häufig als schlecht eingeschätzt wird. Am häufigsten wird die Windows Ordnerstruktur verwendet, was eine dokumentenzentrierte Entwicklungen nahelegt. Gleichzeitig werden aber auch häufig individuelle WMS in den befragten Unternehmen eingesetzt.

²⁹²nach Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova, 2014.

4.3 Prozessanalyse zur Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen im PEP

Ziel der Untersuchung ist zu analysieren, wie Produktmodelle entstehen und wie sie in den einzelnen WMS verwaltet werden. Um einen detaillierteren Einblick in reale Produktentstehungsprozesse zu bekommen, wird eine Prozessanalyse bei den IN²-Projektpartnern durchgeführt. Dazu werden in 5 Unternehmen retrospektiv tatsächlich abgelaufene Entwicklungsprozesse untersucht. Während im Rahmen von Kapitel 4.2 untersucht wurde, welche die meist verwendeten WMS sind, soll im Rahmen dieses Kapitels untersucht werden, wie Objekte im PEP entstehen und in welchen WMS sie verwaltet werden. Dazu wird zunächst das Studiendesign mit der Modellierungstechnik und dem Vorgehen bei den Projektpartnern vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Studie in Kapitel 4.3.2 aufgezeigt.

4.3.1 Studiendesign

Aktivitätenbasierte Modellierungstechnik

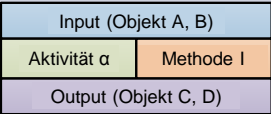
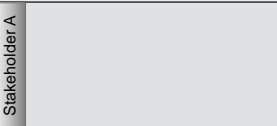


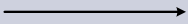
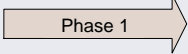

Um die Prozesse der Partnerunternehmen zu untersuchen, wird eine Modellierungstechnik benötigt, welche zum einen aktivitätenbasiert ist, um Iterationen darstellen zu können und zum anderen das Zusammenspiel aus den erstellten Objekten und dazugehörigen WMS abbilden kann. Als Basis für die Modellierungstechnik wird das iPeM als Metamodell verwendet, da dieses die benötigten Grundbausteine zur Verfügung stellt. So kann die Modellierungstechnik in einem Workshop angewendet werden und die Ergebnisse in das iPeM überführt werden. Dazu wird im Rahmen einer explorativen Vorstudie²⁹³ zunächst eine Modellierungstechnik entwickelt und anhand des Karlsruher Formula Student Teams „KA-RaceIng“ ihre Anwendbarkeit validiert.

Formula Student Teams entwickeln und fertigen in interdisziplinären Teams in ca. einem dreiviertel Jahr einen konventionellen und einen elektrischen Rennwagen und treten in Wettbewerben gegeneinander an, wobei die Team-Zusammensetzung jährlich wechselt. KA-RaceIng eignet sich als Untersuchungsumgebung für die explorative Vorstudie, da sie zum einen relativ kurze Entwicklungszyklen hat und dadurch eine begleitende Studie erlauben und zum anderen, da sie interdisziplinäre Produkte bei

²⁹³Die in Kapitel 4.3.1 dargestellten Untersuchungen wurden im Projekt IN² durchgeführt und sind im Rahmen der Publikation Albers, Reiß, Bursac, Schwarz & Lüdcke 2015 veröffentlicht worden.

einer hohen Fluktuation entwickeln. Eine starke Interdisziplinarität ebenso wie eine hohe Fluktuation erhöhen die Notwendigkeit für Wissensmanagement. Folglich weisen die Studien-Teilnehmer eine höhere Bereitschaft für die Untersuchung auf. Die Modellierungstechnik basiert auf einem klassischen Swimlane-Diagramm.²⁹⁴ Dabei stellen die einzelnen Swimlanes die Stakeholder im Prozess dar. Die Bausteine der Modellierungstechnik können Tabelle 4.1 entnommen werden.

Tabelle 4.1: Elemente der Modellierungstechnik zur Repräsentation von Informationsflüssen im Produktentstehungsprozess²⁹⁵

Element	Name	Beschreibung
	Aktivitätenboxen	Aktivitätenboxen repräsentieren einzelne Prozessschritte. Sie dienen häufig der Umwandlung und Erstellung von Objekten (Input & Output). Zur Ausführung der Aktivitäten können Methoden und Werkzeuge eingesetzt werden.
	Stakeholder	Sind die Personen, die im Prozess direkt beteiligt sind. Aktivitäten, die in den Swimlanes abgebildet werden, werden von den Stakeholdern ausgeführt.
	Informationsquellen	Informationsquellen (Datenblätter, Materialtabellen, etc.) dienen als Input für den Prozess und sind außerhalb der Systemgrenzen lokalisiert.
	Wissensmanagementsysteme	Wissensmanagementsysteme dienen der Archivierung von Objekten, welche im Produktentstehungsprozess erstellt werden und im weiteren Verlauf wieder benötigt werden können.
	Informationsflüsse	Informationsflüsse verbinden einzelne Aktivitäten in der Regel mithilfe der Übertragung von Objekten.
	Phasen	Phasen beschreiben einen Zeitabschnitt zwischen zwei Meilensteinen und dienen der Orientierung im Management des Prozesses. Sie sind nicht mit den Aktivitäten gleichzusetzen.
	Meilensteine	Meilensteine geben die Grenzen einzelner Phasen an. Zu diesen Zeitpunkten werden definierte Ergebnisse vorgestellt und der Projektfortschritt gemessen.

²⁹⁴Bei einem Swimlane-Diagramm handelt es sich um ein Flussdiagramm, bei welchem die Prozess-Beteiligten in horizontalen (oder vertikalen) Bereichen angeordnet werden. Da diese an Bahnen in einem Schwimmbecken erinnern, wird hierfür der englische Begriff „Swimlane“ verwendet. Siehe z. B. Browning & Ramasesh, 2007.

Die Elemente der Modellierungstechnik werden verwendet, um Prozesslandkarten abzubilden. Wie die Elemente verwendet werden können, wird exemplarisch in Abbildung 4.14, anhand der analysierten Prozesse des Formula Student Teams, aufgezeigt.

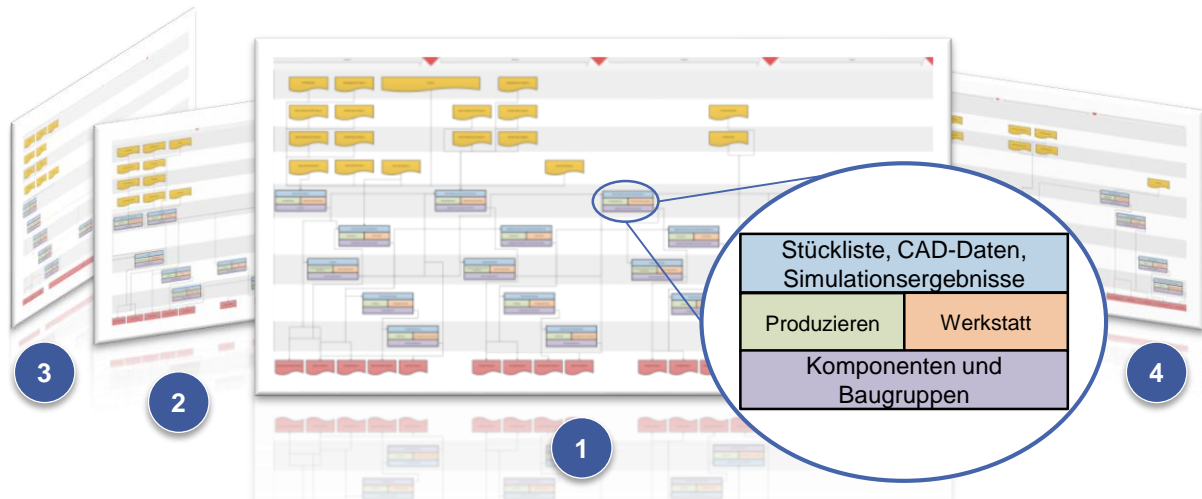


Abbildung 4.14: Exemplarische Darstellung von Prozesslandkarten des Gesamtprozesses (1) sowie der Subprozesse (2-4)²⁹⁶

Mithilfe der explorativen Vorstudie wurde zum einen die Anwendbarkeit der Modellierungstechnik validiert und zum anderen Handlungsbedarfe im Ist-Prozess von KA-Racing festgestellt. Beispiele hierfür sind im Folgenden aufgeführt:

- **Informationssenken:** Stakeholder erhalten Informationen, welche sie nicht benötigen und nicht weiterverarbeiten.
- **Fehlende Dokumentation:** Objekte werden nicht in einem WMS gespeichert, sondern ausschließlich an weitere Stakeholder weitergegeben.
- **Redundante Speicherung:** Objekte werden in unterschiedlichen WMS gespeichert, dadurch kann die Datenintegrität verletzt werden.

Anwendung bei den Projektpartnern

Im Rahmen der Fallstudie wurden mithilfe der Modellierungstechnik fünf reale Prozesse der IN²-Projektpartner modelliert.²⁹⁷ Dazu wird ein dreistufiges Vorgehen verwendet, welches in Abbildung 4.15 skizziert ist.

²⁹⁵nach Albers, Reiß, Bursac, Schwarz & Lüdcke, 2015.

²⁹⁶nach Albers, Reiß, Bursac, Schwarz & Lüdcke, 2015.

²⁹⁷Die in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 dargestellten Untersuchungen wurden im Projekt IN² durchgeführt sind im Rahmen der Publikation Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß 2014 veröffentlicht worden.

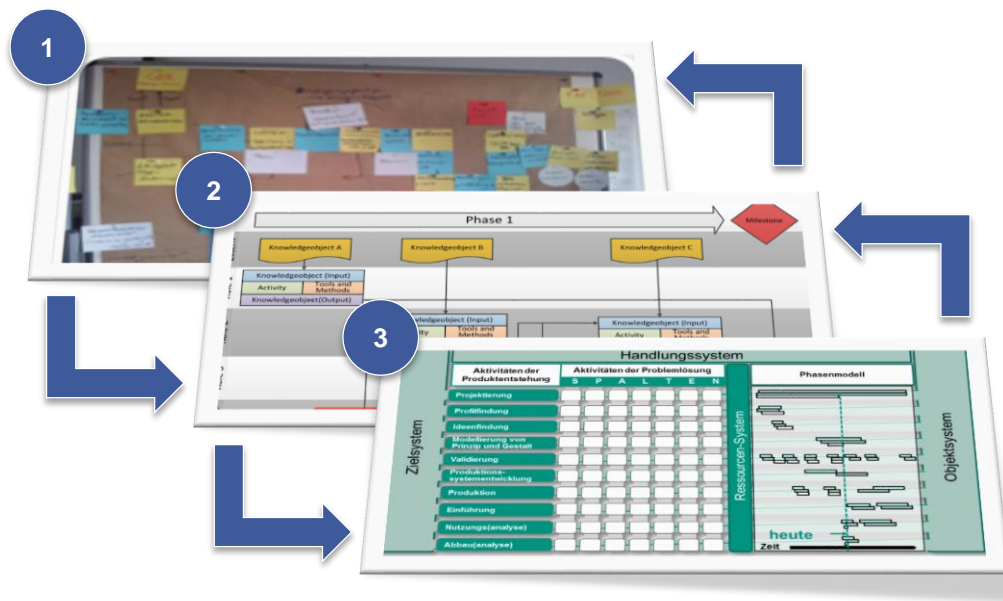


Abbildung 4.15: Dreistufiges Vorgehen zur Prozessanalyse: (1) Workshop zur Prozessaufnahme, (2) Digitalisierung mithilfe der Modellierungstechnik, (3) Überführung in das iPem²⁹⁸

Während eines eintägigen Workshops werden i. d. R. fünf erfahrene Teilnehmer gebeten, mithilfe der Metaplantchnik die wesentlichen Objekte eines konkreten PEP retrospektiv zusammenzutragen und diese anschließend zeitlich anzuordnen. Bei zeitlich längeren Entwicklungsprozessen wurde die Frühe Phase der Produktentstehung betrachtet. Dazu wurden die Workshopteilnehmer aus Abteilungen, welche in der Frühen Phase tätig sind, zusammengesetzt. Den zeitlich angeordneten Objekten werden die zur Erstellung notwendigen Aktivitäten sowie die dabei eingesetzten Methoden und Werkzeuge zugeordnet. Abschließend werden den Objekten die WMS und den Aktivitäten die Stakeholder zugeordnet. Um die Workshopergebnisse zu digitalisieren, wird die Modellierungstechnik angewendet. Dazu werden in einem iterativen Vorgehen die Prozesslandkarten mit den Workshopteilnehmern abgestimmt. Im letzten Schritt werden die Prozessergebnisse in das iPem überführt, um die unterschiedlichen Prozesse zu vergleichen.

²⁹⁸nach Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014.

4.3.2 Ergebnisse der Prozessanalyse

Wissensmanagementsysteme und Objekte im PEP

Im Rahmen dieser Untersuchung wird der Fokus auf die im PEP entstehenden Informationen gelegt. Dazu wird analysiert, welche Objekte entstehen und in welchen WMS sie gespeichert werden. Auf Basis der Prozesslandkarten ist die Anzahl der im PEP ermittelten WMS und Objektarten in Abbildung 4.16 dargestellt.

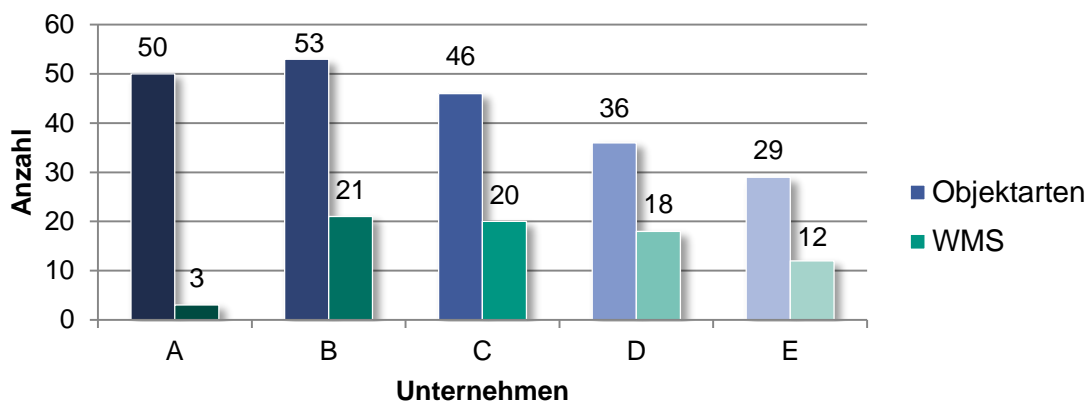


Abbildung 4.16: Anzahl der analysierten WMS und Objektarten im PEP²⁹⁹

Wie in Abbildung 4.16 zu sehen ist, werden die Objektarten in bis zu 21 ermittelten WMS verwaltet. Dabei handelt es sich neben der „Windows Ordnerstruktur“ häufig um speziell entwickelte „Datenbanken“, aber auch um analoge WMS wie „Leitz-Ordner“ oder „Parkplätze“, auf welchen z.B. „Prototypen“ oder „Wettbewerbsfahrzeuge“ stehen.

Verteilung der Objekte in den WMS

Basierend auf den Prozesslandkarten ist in Abbildung 4.17 auf der X-Achse der kumulierte Wert der WMS und auf der Y-Achse der kumulierte Wert der Objektarten aufgetragen. Mithilfe der Lorenz-Kurve³⁰⁰ wird dazu untersucht, wie die Objektarten auf die unterschiedlichen WMS verteilt sind.

²⁹⁹nach Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014.

³⁰⁰Die Lorenz-Kurve bildet die statistische Verteilung ab. Sie wird in der Ökonomie häufig verwendet um die Einkommensverteilung einer Bevölkerung zu repräsentieren. Dazu wird auf der X-Achse der kumulierte Anteil der Bevölkerung und auf der Y-Achse der kumulierte Anteil des Einkommens aufgetragen. Die 1. Winkelhalbierende stellt in diesem Fall eine absolute Gleichverteilung des Einkommens über die Bevölkerung dar. Je kleiner die Fläche unter der Kurve wird, desto größer ist das Einkommensgefälle zwischen „Gut-“ und „Geringverdienern“. Siehe z. B. Fahrmeir, Künstler, Pigeot & Tutz, 2012.

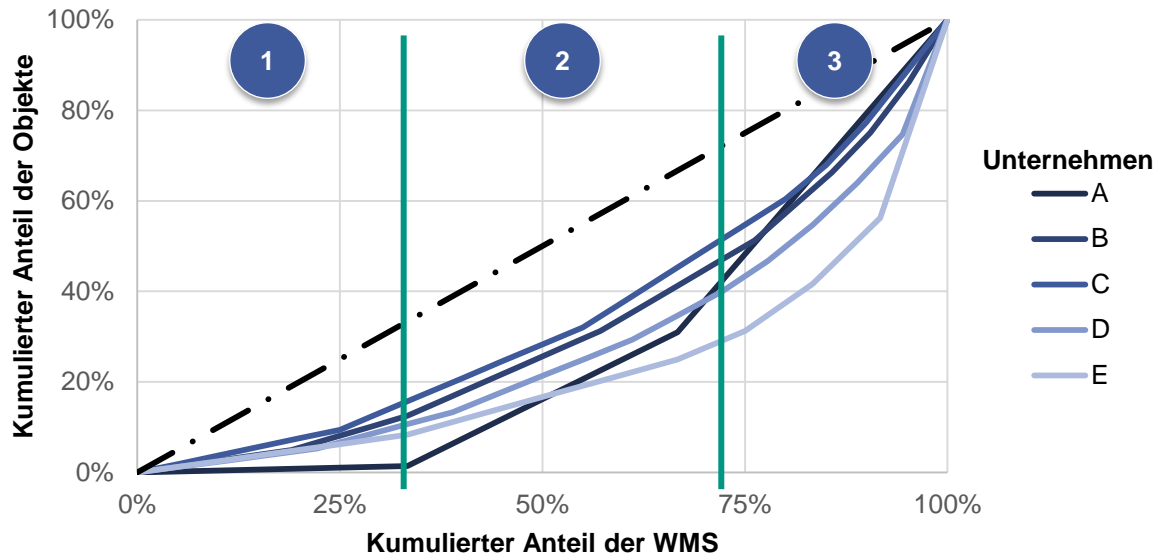


Abbildung 4.17: Verteilung des Anteils von kumulierter Objektarten über die kumulierten WMS³⁰¹

Die strichpunktiierte Linie würde eine Gleichverteilung der Objektarten auf die WMS darstellen. Das heißt, für jede Art von Objekt (z. B. Patent) würde es ein entsprechendes WMS geben (z. B. Patentdatenbank). Das andere Extrem würde für eine starke Ungleichverteilung sprechen, also viele WMS, welche nur für eine Art von Objekten verwendet und ein WMS welche alle Arten beinhaltet. Wie Abbildung 4.17 entnommen werden kann, weisen die Kurven der Projektpartner einen ähnlichen Verlauf auf. Dadurch können die vielen unterschiedlichen WMS in drei Klassen untergliedert werden:

1. Individuelle WMS, welche eine Art von Objekten verwalten (z.B. Patentdatenbanken)
2. WMS, welche mehrere Arten von Objekten verwalten (z.B. PLM/PDM Systeme)
3. Universelle WMS, welche viel unterschiedliche Arten von Objekten verwalten (z.B. digitale Ordnerstrukturen)

Da eine Art von Objekt gleichzeitig in unterschiedlichen WMS gespeichert werden kann, aber die Achsen auf 100 % normiert sind, kann die Information über die Redundanz nicht in Abbildung 4.17 dargestellt werden. Diese Information wird deshalb in Abbildung 4.18 abgebildet.

³⁰¹nach Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014.

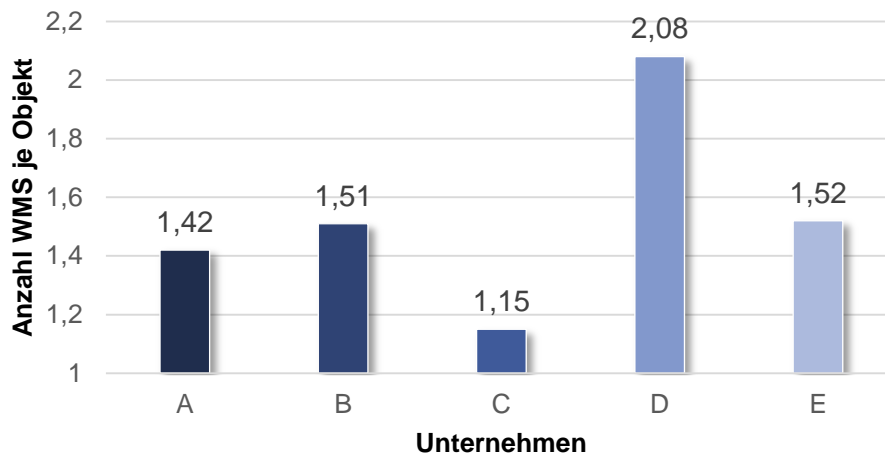


Abbildung 4.18: Durchschnittliche Anzahl der WMS, in denen ein Objekt gespeichert wird³⁰²

Dem Diagramm kann entnommen werden, dass beispielsweise in Unternehmen D ein Objekt durchschnittlich in 2,08 WMS gespeichert wird. Dies birgt die Gefahr des Verlustes von Datenintegrität, da mit der Zeit nicht mehr sichergestellt werden kann, dass die unterschiedlichen Produktmodelle konsistent sind. Darüber hinaus haben häufig nicht alle Beteiligten die notwendigen Zugänge zu den Systemen.³⁰³

4.3.3 Zwischenfazit

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine Vielzahl von WMS identifiziert. Diese sind teilweise individuell und verwalten ausschließlich eine Art an Objekten, während andere eher universeller Natur sind und unterschiedliche Objektarten verwalten. Durch die vielen unterschiedlichen WMS entstehen redundante Produktinformationen, welche die Konsistenz der Produktmodelle herabsetzen können. So können in der Vielzahl unterschiedlicher WMS divergierende Produktmodelle entstehen, obwohl sie das gleiche Produkt beschreiben. Dies kann zu Zeitverlust führen und Missverständnisse fördern.

³⁰²nach Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014.

³⁰³Bei der Betrachtung fließen redundante Systeme zur Datensicherheit, wie beispielsweise RAID-Systeme, nicht in die Auswertung ein.

4.4 Lösungsansätze zur Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen

Um Lösungsansätze zur Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen zu finden, ist eine detaillierte Untersuchung notwendig. Dazu werden im Folgenden die Ergebnisse einer 3-jährigen teilnehmenden Beobachtung bei der Porsche AG vorgestellt. Zunächst wird auf das Studiendesign eingegangen.

4.4.1 Studiendesign

Untersuchungsumgebung Porsche AG

Die Porsche AG eignet sich als Untersuchungsumgebung, da sie mit ca. 20.000 Mitarbeitern im Bereich großer Unternehmen anzusiedeln ist und hierbei, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ein hoher Handlungsbedarf besteht, die Informationen aus vergangenen Projekten transparent zu machen. Ein zweiter Grund liegt darin, dass die Porsche AG im integrierten Automobilkonzern VW der Baukastenentwicklung nachgeht. Darüber hinaus ist sie ein typisches Beispiel für ein Unternehmen, welches nach dem Ansatz der Produktgenerationsentwicklung entwickelt. Dies kann am Beispiel der Modells „911 Carrera“ verdeutlicht werden (vgl. Abb. 4.19).

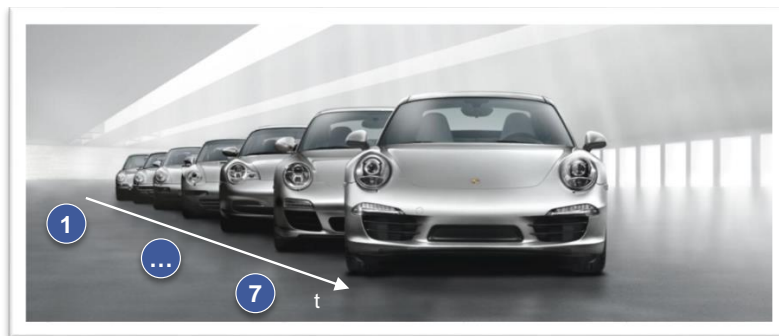


Abbildung 4.19: Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Porsche Typ „911“³⁰⁴

Das Modell „911 Carrera“ der Porsche AG besitzt seit über 50 Jahren ein ähnliches Konzept. Wesentliche Produktmerkmale sind seit dem „Ureifer“ erhalten geblieben, wie z. B. das 2+2 Sitze Konzept oder das Boxer-Heckmotor-Konzept. Gleichzeitig finden sich in allen Generationen auch Differenzierungsmerkmale. Als Beispiel können hier

³⁰⁴Bild Porsche AG

der adaptive Bug-Spoiler der aktuellen Generation (Typ 991), die variable Turbinengeometrie der vorherigen Generation (Typ 997) oder die Keramik Bremse in der vorletzten Generation (Typ 996) genannt werden.³⁰⁵

Vorgehen zur Analyse der WMS

Die Studie findet im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung im Baukasten-, Modul- und Projektmanagement statt. Eine teilnehmende Studie hat den Vorteil, dass ein besserer Einblick gewonnen werden kann, gleichzeitig besteht die Gefahr, dass Einfluss auf die Untersuchungsumgebung genommen wird und diese dadurch verändert wird.

Während der Studie wurde die Prozessanalyse in ausgedehnter Form angewendet, dabei stand neben der Frühen Phase die Baukastenentwicklung im Fokus. Statt eines Eintages-Workshops wurden 12 Workshops mit einer durchschnittlichen Dauer von 2,5 Stunden durchgeführt. Diese fanden mit jeweils 5-8 Teilnehmern aus 4 unterschiedlichen Abteilungen statt. In Summe waren an der Analyse 17 Entwickler über 3 Hierarchie-Stufen beteiligt. Nach der Prozessaufnahme wurde zur detaillierteren Untersuchung das in Abbildung 4.20 dargestellte Vorgehen³⁰⁶ verwendet, um die Produktmodelle und ihre Speicherung in den WMS im Detail zu betrachten.

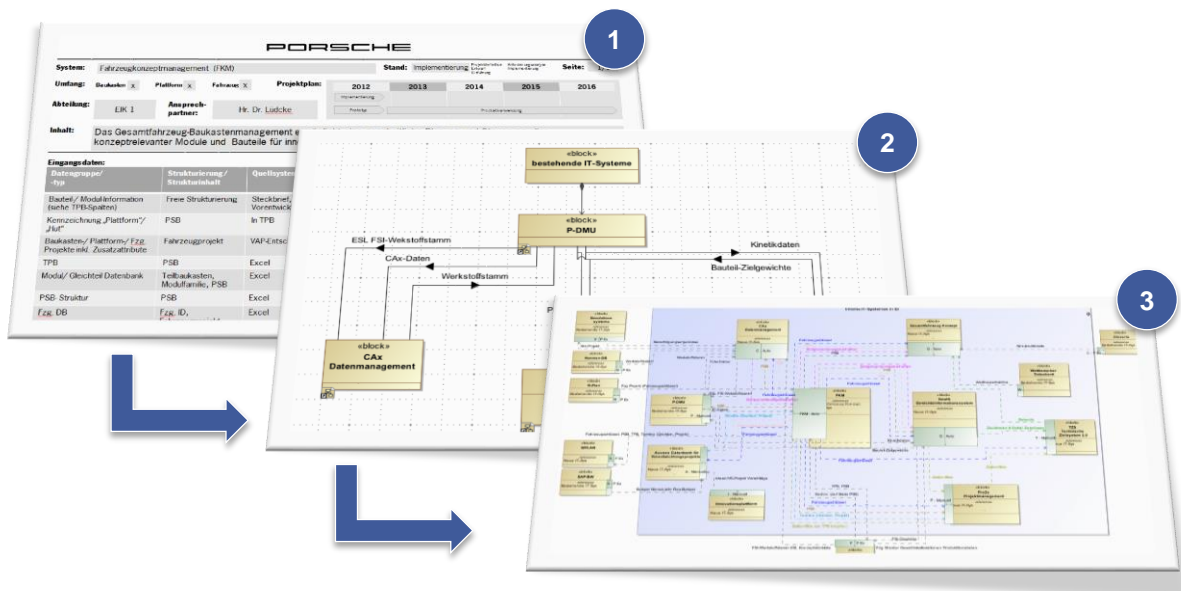


Abbildung 4.20: Vorgehen zur Untersuchung der Produktmodelle und der WMS: (1) Steckbriefe der WMS; (2) SysML Modelle der WMS; (3) WMS-Landkarte³⁰⁷

³⁰⁵Harrer, Görich, Reuter & Wahl, 2013.

³⁰⁶Das beschriebene Vorgehen wurde im Rahmen der Arbeit von Rachenkova, 2014 mit dem Autor der vorliegenden Arbeit als Co-Betreuer durchgeführt.

Dazu wird zunächst eine Steckbrief-Vorlage erstellt, welche die Fachbereichsverantwortlichen für die einzelnen WMS in der frühen Phase ausfüllen. Diese Steckbriefe werden im zweiten Schritt in SysML Modelle überführt und mit benachbarten Systemen verbunden. Dabei werden die Modelle mit weiteren Informationen ergänzt, z. B. „WMS A ist ein bestehendes System“. Aus der Gesamtheit der überführten Steckbriefe ergibt sich eine Landkarte aller WMS in der Frühen Phase sowie der Informationen, welche übertragen werden. Inkonsistenzen der Steckbriefe können dadurch auffindig gemacht und in einer zusätzlichen Iteration mit den Experten eliminiert werden.

4.4.2 Ergebnisse der teilnehmenden Beobachtung

Prozessbeschreibung

Im Folgenden wird kurz auf den analysierten Prozess der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung³⁰⁸ näher eingegangen. Basierend auf der Analyse bestehender Fahrzeuge und der strategischen Ausrichtung des Unternehmens wird ein initiales Zielsystem beschrieben. Dazu werden sowohl die Ergebnisse der Marktanalyse und von Fachzeitschriften eigener Fahrzeuge als auch die Wettbewerbsanalyse von Konkurrenzfahrzeugen in Betracht gezogen. Dabei werden viele individuelle Methoden eingesetzt.

Das Ergebnis der Analyse mündet in der Synthese eines initialen Zielsystems auf Basis von Eigenschaften und den wichtigsten Zielgrößen. Die Ergebnisse werden im WMS „technisches Zielsystem“ beschrieben, dazu gibt es eine Gliederungsstruktur der unterschiedlichen Ziele auf einer generischen Ebene (z. B. „Höchstgeschwindigkeit“), welche projektspezifisch ausgeprägt werden. Im ersten Schritt werden die Ziele mit dem größten Einfluss festgelegt, anschließend in einem iterativen Vorgehen immer mehr Parameter konkretisiert. Das dazugehörige Produktmodell wird zunächst durch einen „Steckbrief“ beschrieben, hier wird neben den wichtigsten Eckdaten auch angegeben, welche Bauteile übernommen werden sollen und welche Innovationen für das Fahrzeug aus Vorenwicklungsprojekten vorgesehen sind.

Im Folgenden werden weitere Erkenntnisse durch die Analyse gewonnen und erste Simulationen durchgeführt. So entstehen durch zusätzliche Iterationen mehr Erkennt-

³⁰⁷nach Rachenkova, 2014, betreute Abschlussarbeit.

³⁰⁸vgl. Kapitel 2.2.2

nisse und der Reifegrad des Steckbriefes steigt. Dieser Steckbrief sowie die initialen Ziele dienen weiteren Fachbereichen zur detaillierten Beschreibung der Produktmodelle. Dazu wird auf Basis einer generischen Produktbeschreibung eine Excel Tabelle ausgefüllt. Hierzu werden die generischen Parameter (z. B. „Motor“) projektspezifisch definiert (z. B. „6-Zylinder Boxer-Motor“). Entstehen durch die Entwicklung einer neuen Generation Bauteile, welche bisher nicht generisch vorgesehen sind, kann die Struktur induktiv ergänzt werden (vgl. 4.21)

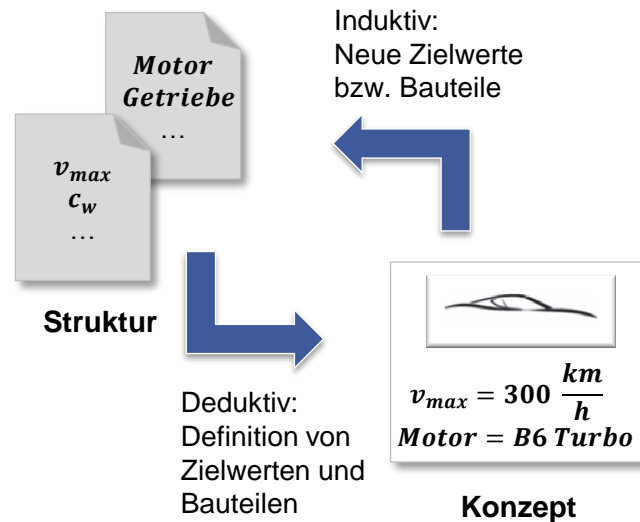


Abbildung 4.21: Deduktive Ableitung von Konzepten anhand einer Struktur und induktive Ergänzung der Struktur z. B. durch neue Zielwerte

Diese Einträge werden mit der Information versehen, ob es sich hierbei um eine Neuentwicklung, eine Übernahmevariation oder eine Übernahme handelt. Außerdem wird vermerkt, ob es sich hierbei um Module handelt und welche Fahrzeuge die Referenzprodukte sind. Das entstandene Produktmodell wird im Folgenden von unterschiedlichen Fachbereichen bewertet (z. B. hinsichtlich Kosten wie Materialeinzelkosten, Produktionsinvest, Entwicklungsaufwand sowie Gewicht und Bauraum). Durch die Erkenntnisse wird das Konzept mithilfe von weiteren Iterationen verfeinert, bis ein konsistentes Konzept und Zielsystem entsteht und durch die Serienentwicklung weitergeführt werden kann.

Baukastenentwicklung

Die Entwicklung in der Frühen Phase wird im Kontext der Baukastenentwicklung durch zusätzliche Aspekte ergänzt. Da ausschließlich eine Beschreibung des Baukastens zu abstrakt ist, werden gleichzeitig zur Definition des Baukastens die dazugehörigen

Fahrzeuge beschrieben. Dazu werden aus Zielwerten des Baukastens deduktiv Zielwerte für Fahrzeuge abgeleitet und induktiv die entstehenden Fahrzeugkonzepte mit den Komponenten und Zielwerten des Baukastens abgeglichen und bei Bedarf angepasst. Dadurch entstehen mit den benötigten Iterationen einerseits Fahrzeuge, welche dem Regelwerk des Baukastens folgen und gleichzeitig eine Beschreibung des Baukastens. Mithilfe der Fahrzeuge und der Spannweite ihrer Ziele wird das Regelwerk und durch die verwendeten Bauteile (vgl. Abb. 4.22) der Baukasten konkreter beschrieben.



Abbildung 4.22: Iterationen bei der Baukasten- und Konzeptentwicklung

Ohne die parallele Entwicklung der Fahrzeugkonzepte bleibt die Entwicklung des Baukastens rein abstrakt und kann nicht validiert werden. Dadurch wären die Iterationen nicht möglich und somit würde die Reife des Baukastens nicht zunehmen können. Eine Vergleichbarkeit der Produktmodelle bleibt dadurch gegeben, dass diese der gleichen generischen Struktur folgen und ihre Ausprägungen verglichen werden können. Eine Herausforderung bei der Entwicklung unterschiedlicher Produkte auf Basis eines Baukastens stellt das Änderungsmanagement dar, denn Änderungen können nicht singulär erfolgen, sondern müssen mit allen Baukastennutzern abgestimmt werden.³⁰⁹

³⁰⁹Eine Prozessverbesserung des Änderungsmanagements konnte auf Basis einer Prozessanalyse mit der vorgestellten Modellierungstechnik identifiziert und mithilfe eines neu entwickelten WMS umgesetzt werden. Mehr Details können den Publikationen Albers, Lüdcke, Bursac & Will, 2014 sowie Lüdcke, Bursac, Reiß & Will, 2015 entnommen werden.

Produktmodelle in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchung der Produktmodelle und WMS in der Frühen Phase der Produktentstehung näher vorgestellt.³¹⁰ Es stellt sich heraus, dass die entstehenden Produktmodelle in unterschiedlichen WMS gespeichert werden. Dabei haben die Systeme häufig einen bestimmten Fokus und werden für die Modellierung einer Objektart (z. B. Gewicht) verwendet. Dies hat für die Entwickler den Vorteil, dass sie die einzelnen WMS bei Bedarf agil anpassen können und keine Abstimmungen mit anderen Entwicklern eingehen müssen. Die einzelnen WMS bilden dabei die Produkte nach dem Verkürzungsmerkmal so ab, dass nur die relevanten Attribute abgebildet werden. Dies führt dazu, dass die WMS auf unterschiedlichen Strukturen aufbauen und dadurch isoliert und nicht miteinander kompatibel sind. Dadurch kann das gleiche Produkt wie in Abbildung 4.23 in unterschiedlichen WMS auf unterschiedliche Arten modelliert werden und eine Inkonsistenz entstehen.

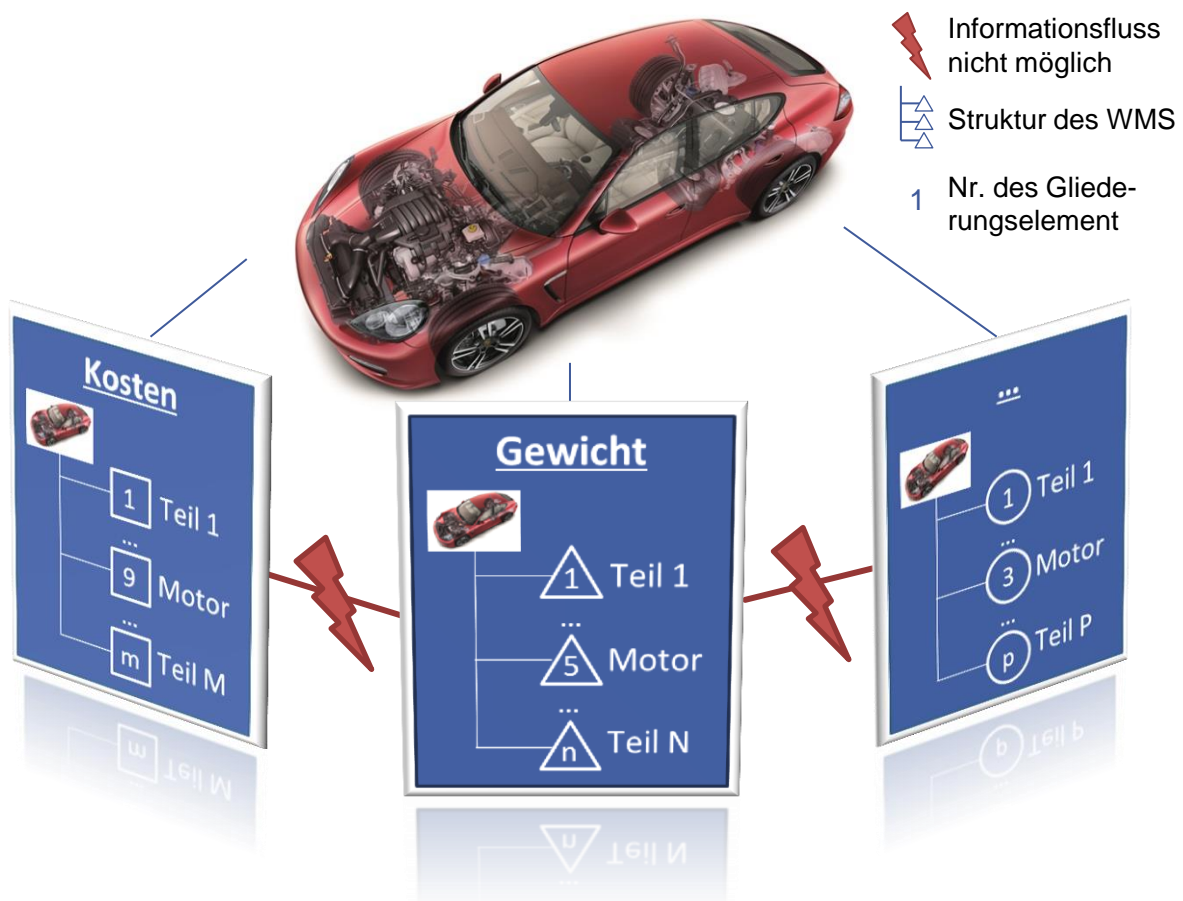


Abbildung 4.23: Abbildung der Produktmodelle in unterschiedlichen WMS³¹¹

³¹⁰Die in Kapitel 4.4.2 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikation Albers, Reiß, Bursac, Schwarz & Lüdcke 2015 veröffentlicht worden.

Ein verwendeter Lösungsansatz hierbei ist die Nutzung von Referenz-Produktmodellen. Sie besitzen eine generische Struktur, wodurch die Verbindung der isolierten WMS sichergestellt werden kann und gleichzeitig den unterschiedlichen Bereichen ein pragmatischer Ansatz der Modellierung erlaubt wird. Das Referenz-Produktmodell ergibt sich aus den Erfahrungen vorheriger Produktgenerationen und stellt eine Wissensbasis für die Entwicklung neuer Produktgenerationen dar. Es dient in der Frühen Phase als eine Art Checkliste, da sichergestellt werden kann, dass keine Aspekte vergessen werden, welche in vorherigen Generationen wichtig waren.

Dabei erscheinen drei Dimensionen als notwendig, um durchgängige Produktmodelle zu gewährleisten. Diese sind wie in Abbildung 4.24 dargestellt: (1) die zeitliche Durchgängigkeit (auch über Produktgenerationen), (2) die Durchgängigkeit auf unterschiedlichen hierarchischen Detaillierungsgraden und (3) die Durchgängigkeit über verschiedene Produkte (z. B. in einem Baukasten) hinweg.

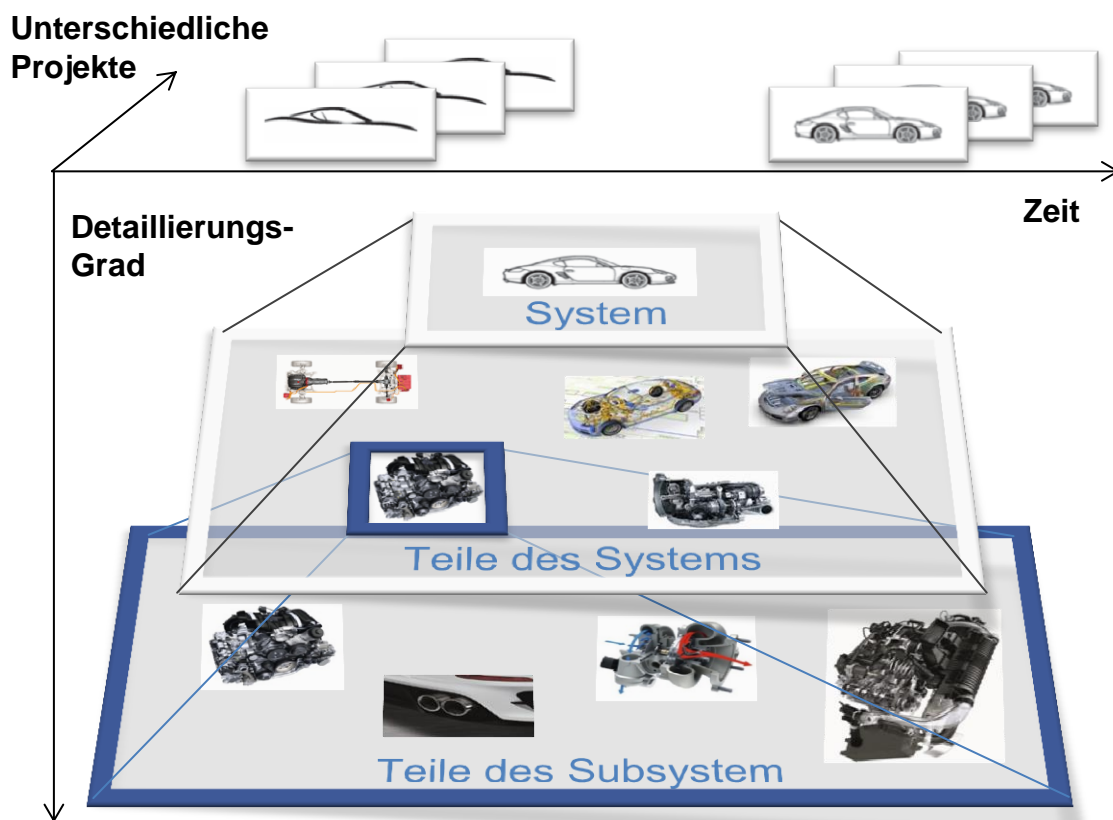


Abbildung 4.24: Durchgängiges Referenz-Produktmodell³¹²

Die zeitliche Durchgängigkeit beschreibt die Nutzung der gleichen Struktur über mehrere Produktgenerationen hinweg, so können Informationen der Übernahmeteile kon-

³¹¹nach Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014, Bild Porsche AG

³¹²nach Albers, Lüdcke, Bursac & Reiß, 2014, Bild Porsche AG

sistent verbunden werden. Darüber hinaus sind unterschiedliche Detaillierungsebenen notwendig, welche je nach Phase unterschiedlich genau ausgeprägt werden können. Während in früheren Phasen lediglich eine Beschreibung des Produktes auf den obersten Ebenen möglich ist (z. B. „der Motor kann aus dem Fahrzeug xy mit kleinen Veränderungen übernommen werden“), kann in späteren Phasen eindeutig spezifiziert werden, welche Anpassungen notwendig sind, um die Anforderungen im Zielsystem zu erfüllen. Die Durchgängigkeit über verschiedene Projekte ist notwendig, um einen Gleichteile- bzw. Baukastenansatz realisieren zu können. Denn dadurch wird ermöglicht, die Informationen bei der Veränderung einer Komponente in einem Produkt auch in den betroffenen Produkten transparent zu machen. Außerdem kann bei einer gleichen Struktur in unterschiedlichen Projekten auch leichter eine Vergleichbarkeit der Projekte erzielt werden.

4.4.3 Zwischenfazit

Die Prozessanalyse der Frühen Phase der Porsche AG ergibt, dass eine Vielzahl an WMS verwendet werden, um ein Produkt zu beschreiben. Durch die unterschiedlichen WMS haben die Entwickler den Vorteil, dass sie pragmatisch und agil die WMS nach Bedarf anpassen können. Gleichzeitig ist es aber notwendig sicherzustellen, dass die Daten aus verschiedenen isolierten Systemen zueinander konsistent sind. Eine Lösungsmöglichkeit hierbei ist die Verwendung von Referenz-Produktmodellen, welche aus vorherigen Produktgenerationen gewonnen werden können und eine Durchgängigkeit der Produktmodelle sicherstellen können. Diese kann in drei Dimensionen beschrieben werden: auf zeitlicher Ebene, auf der Ebene des Detaillierungsgrades und über Projekte hinweg.

4.5 Fazit

Die empirische Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, einen Einblick in die Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen zu erhalten. Dazu wurden folgende Teilfragen betrachtet:

- 1.1 Welche Herausforderungen bestehen bei der Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung?

1.2 Wie werden die Produktmodelle in realen Produktentstehungsprozessen erstellt und verwaltet?

1.3 Welche Lösungsansätze können zur effizienten Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen gefunden werden?

Zur Analyse wurde ein dreigeteiltes Vorgehen durchgeführt, welches in Abbildung 4.25 illustriert ist.

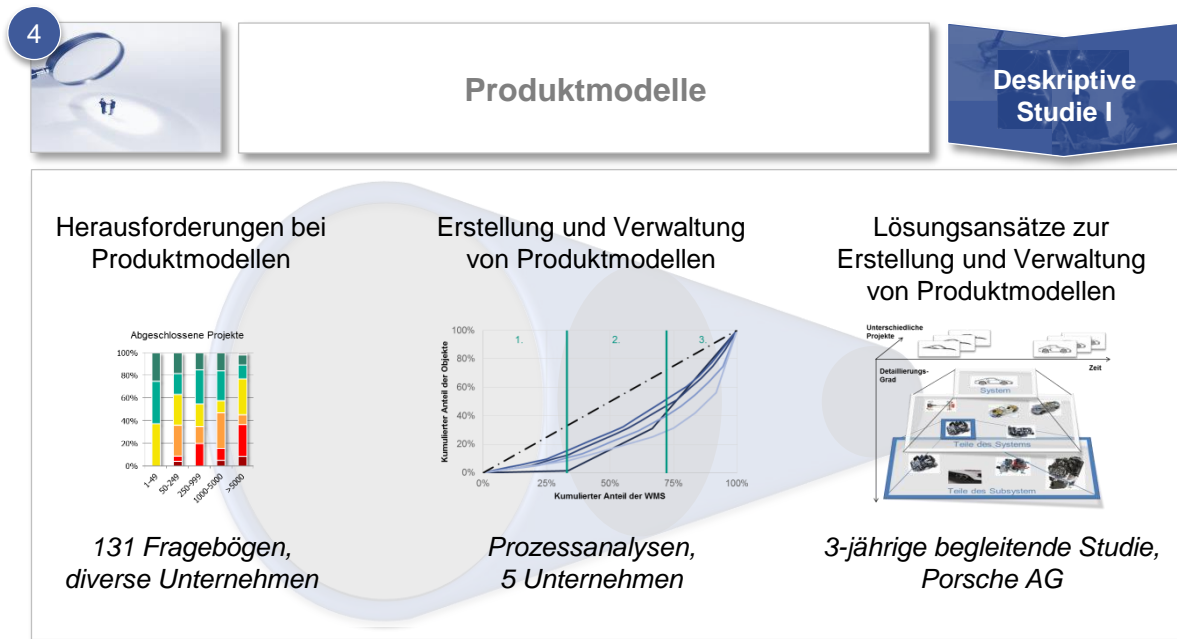


Abbildung 4.25: Drei empirische Studien der Deskriptiven Studie I

Im ersten Schritt erfolgte die Untersuchung mittels eines Online-Fragebogens über unterschiedliche Branchen und Unternehmensgrößen hinweg. Die zweite Studie wurde mithilfe einer entwickelten Modellierungstechnik bei 5 IN²-Projektpartnern durchgeführt um einen detaillierteren Einblick in die Erstellung und Verwaltung von Produktmodellen zu erhalten. In der dritten Studie wurde eine 3-jährige teilnehmende Beobachtung in der Frühen Phase der Produktentstehung durchgeführt. Diese fand im Baukasten- Modul- und Projektmanagement der Porsche AG statt.

Die erste Studie (Kapitel 4.2) untermauert, dass häufig Produkte nicht auf einem „weißen Blatt“ beginnen, denn die Befragten geben an, dass 93 % der Entwicklungen auf vorherigen Produkten basieren. Gleichzeitig wird deutlich, dass über 75 % der Befragten bei großen Unternehmen (> 5000 Mitarbeiter) keinen guten Überblick über vergangene Projekte besitzen. Häufig werden die Produktmodelle in Form einer dokumentenzentrierten Entwicklung erstellt und in einer digitalen Ordnerstruktur gespeichert.

Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass aber auch häufig selbstentwickelte Lösungen eingesetzt werden.

Dies kann im Rahmen der zweiten Untersuchung (Kapitel 4.3) bestärkt werden. Die Prozessanalyse zeigt, dass im Produktentstehungsprozess eine Vielzahl von WMS zum Einsatz kommen, welche teilweise sehr individuell sind und auf die Verwaltung einer spezifischen Objektart beschränkt sind. Hierdurch entstehen häufig redundante Daten, welche die Datenkonsistenz verringern können.

Die teilnehmende Beobachtung (Kapitel 4.4) zeigt aber, dass die individuellen WMS von den Entwicklern gewollt sind, da hierdurch eine notwendige Agilität in den stark iterativen Prozessen sichergestellt werden kann. Allerdings ist die Verwendung einer gleichen generischen Struktur in den WMS notwendig, um die Datenintegrität gewährleisten zu können. Diese Struktur kann in einem Referenz-Produktmodell abgebildet und auf Basis vorheriger Produktgenerationen induktiv gewonnen werden. Dadurch kann eine Durchgängigkeit der Produktmodelle (über die Zeit, auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen und über unterschiedliche Projekte) gefördert werden. Die Produktmodelle tragen dazu bei, den abstrakten Baukasten induktiv zu beschreiben und deduktiv auf Basis des Baukastens neue Produktmodelle zu erstellen.

Die deskriptive Studie zeigt somit, dass die Produktmodelle in einem iterativen Prozess entstehen. Dabei werden die Produktmodelle in unterschiedlichen WMS verwaltet, welche miteinander mittels Referenz-Produktmodellen integriert werden müssen, um eine Datenintegrität sicherstellen zu können.

5 MBSE zur Unterstützung der Frühen Phase der Baukastenentwicklung

In diesem Kapitel wird nach der DRM eine präskriptive Studie durchgeführt,³¹³ um die in Kapitel 3.1.3 abgeleitete Forschungsfrage zu beantworten:

2. Wie können Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden, um die Modellierung von Baukästen und Produkten in der Frühen Phase effizient zu gestalten?

Ziel ist es dabei, nach der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten „Spiral of Applied Research“ mithilfe der Studie ein Framework zu schaffen, um darauf aufbauend Werkzeuge und Vorgehensmodelle entwickeln zu können, welche die Baukastenentwicklung unmittelbar unterstützen können. Dazu soll durch das Framework der MBSE Ansatz mit dessen abstrakten Sprachen besser für die Produktentwicklung zugänglich gemacht werden. Die in Kapitel 4 durchgeführte Analyse ergibt, dass Produktmodelle in einer Vielzahl unterschiedlicher WMS verwaltet werden. Diese sind aus Sicht der Entwickler gewünscht, um die notwendige Agilität in den stark iterativen PEPs zu gewährleisten. Ein gefundener Lösungsansatz, um durchgängige Modelle zu erstellen, ist dabei die Verwendung von gleichen Strukturen, welche aus vergangenen Produktgenerationen gewonnen werden können. Diese Informationen aus vergangenen Produktgenerationen sollen auf den MBSE Ansatz übertragen werden, um somit eine effiziente Modellierung zu ermöglichen. Dazu soll die in Kapitel 3.1.3 abgeleitete Forschungsfrage durch folgende Teilfragen näher spezifiziert werden:

- 2.1 Wie können Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden, um die Produktmodellierung effizienter zu gestalten?
- 2.2 Wie können dadurch Baukästen und Produkte in der Frühen Phase modelliert werden?

³¹³Die in Kapitel 5 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikation Albers, Matthiesen, Bursac, Moeser, Schmidt & Lüdcke, 2014 veröffentlicht worden.

Um die Informationen aus vergangenen Produktgenerationen zu nutzen, bietet das iPeM im Bereich der Prozessmodellierung einen geeigneten Ansatz. Anschließend werden die Erkenntnisse auf die Produktmodellierung übertragen und es wird ein Produktmodellierungs-Framework abgeleitet. Schließlich wird anhand des Frameworks erklärt, wie die MBSE dazu beitragen kann, die Baukastenentwicklung zu unterstützen.

5.1 Abstraktionsgrade des Systems Engineering

Zunächst werden die Abstraktionsgrade der Prozessemodellierung anhand des iPeMs im Kontext der Produktgenerationsentwicklung diskutiert. Anschließend werden diese Erkenntnisse auf die Produktmodellierung übertragen.

5.1.1 Abstraktionsgrade der Prozessmodellierung

Das in Kapitel 2.1.2 vorgestellte iPeM eignet sich, um die Informationen aus der Entwicklung vorheriger Produktgenerationen in einen Referenzprozess zu überführen. In Abbildung 5.1 wird veranschaulicht, wie Meta-, Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodelle im iPeM mittels Induktion und Deduktion ineinander überführt werden können.

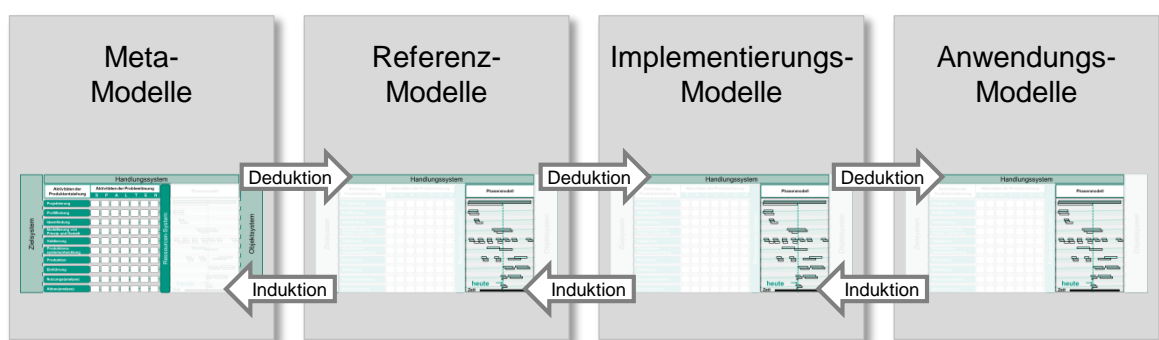


Abbildung 5.1: Instanziierung des iPeM³¹⁴

Die abstrakten Inhalte des Meta-Modells können deduktiv abgeleitet werden, um daraus Referenzmodelle für Produktgenerationen zu erstellen. Für eine spezifische Produktgeneration kann aus dem Referenzmodell ein Implementierungsmodell gewonnen

³¹⁴nach Albers & Muschik, 2010.

werden, durch welches die Randbedingungen, wie z. B. Zeit, Kosten und Variationsanteile des Projekts berücksichtigt werden können. Dieses dient als Basis zur Durchführung des Projekts. So können durch das Implementierungsmodell nächste Schritte und konkrete Aufgaben ausgeleitet werden. Der tatsächliche Verlauf des Projekts kann im Anwendungsmodell beschrieben werden. Dies dient dem Projektcontrolling; so kann beispielsweise eine Abweichung im Projekt erfasst werden und dazu beitragen, das Implementierungsmodell anzupassen. Nach Projektabschluss können weitere Informationen induktiv in das Referenzmodell überführt werden, um Erfahrungen aus vergangenen Projekten als Best-Practice für kommende Produktgenerationen zugänglich zu machen. Werden dafür neue Elemente benötigt, welche durch das Meta-Modell nicht zur Verfügung gestellt werden, kann dieses ebenfalls induktiv ergänzt werden.

Auf diese Weise können im Bereich der Prozessmodellierung die Informationen aus vergangenen Produktgenerationen genutzt werden, um Referenzprozesse zu gewinnen. Diese können für die nächsten Generationen verwendet werden, um effizienter neue Prozessmodelle zu erstellen.

Wie in Kapitel 2.1.2 vorgestellt, kann in einer zweiten Dimension die Individualität der Modelle aufgetragen werden (vgl. Abbildung 5.2).

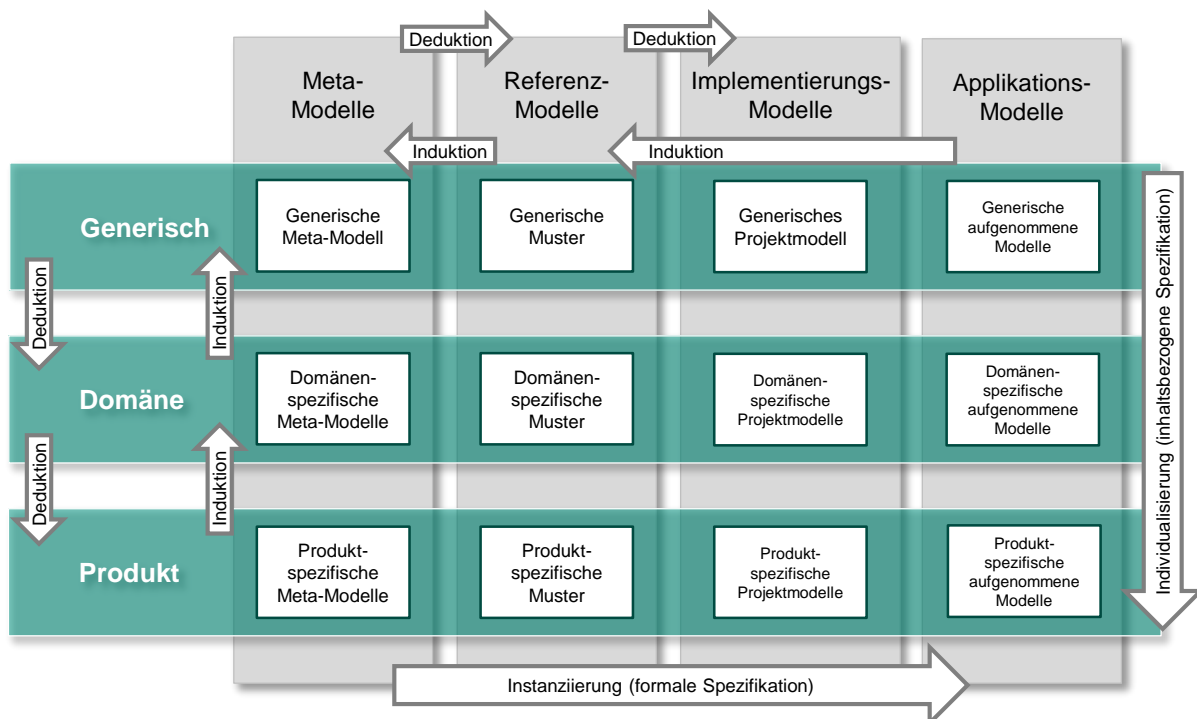


Abbildung 5.2: Abstraktionsgrade des iPem³¹⁵

³¹⁵nach Albers & Muschik, 2010.

Die zweite Dimension kann genutzt werden, um deduktiv generische Modelle in domänenspezifische und diese wiederum in produktspezifische Modelle zu überführen. So kann beispielsweise in der Domäne der Fahrzeugentwicklung ein Referenzprozess für Fahrzeuge der Marke Porsche in Referenzprozesse für die Produktgenerationen des Typ 911 überführt werden. Analog können beispielsweise Erkenntnisse bei der Entwicklung einer Generation des Typ 911 auf Basis eines Baukastens dazu beitragen, induktiv den fahrzeugübergreifenden Referenzprozess bzgl. der Baukastenentwicklung zu erweitern.

Im Folgenden soll der Ansatz des iPeM auf die Produktmodellierung übertragen werden, um einen Beitrag dazu zu leisten, die generischen Meta-Produktmodelle mithilfe von Informationen aus vorherigen Produktgenerationen für spezifische Produktentwicklungen nutzbar zu machen.

5.1.2 Abstraktionsgrade der Produktmodellierung

Ziel in diesem Kapitel ist, aufzuzeigen, wie mithilfe der Informationen aus der Produktgenerationsentwicklung der Aufwand bei der Erstellung von Produktmodellen verkleinert werden und dadurch das MBSE leichter in der Anwendung genutzt werden kann. Hierfür ist es wichtig, die Produktmodellierung in der Frühen Phase nicht auf einem „weißen Blatt“ zu beginnen, sondern die Erkenntnisse aus vorherigen Produktgenerationen zu übernehmen. Dafür ist ein Framework notwendig, welches die unterschiedlichen Abstraktionsgrade der Produktmodellierung aufzeigt (von generischen Meta-Modellen zu konkreten Modellen eines spezifischen Produktes). Dazu wird das in Kapitel 5.1.1 dargestellte Framework für Prozessmodelle auf die Produktmodellierung übertragen. In einem ersten Schritt werden dazu die Dimensionen untersucht und übertragen. Darauf folgend werden die resultierenden Felder im Detail beschrieben.

Dazu wird die Dimension Instanziierung auf die Produktmodellierung angepasst. So werden die Ausprägungen Meta-Produktmodelle, Referenz-Produktmodelle, Produktmodelle und reale Produkte gewählt und im Folgenden näher erläutert. Die Ausprägungen der Dimension Individualisierung (generisch, Domäne, Produkt) werden übernommen.

Instanziierung

In Anlehnung an die in Kapitel 2.1.3 vorgestellte MOF, werden die Ebenen Meta-Modell sowie reale Objekte übernommen. Die Modell-Ebene wird basierend auf dem iPeM aufgeteilt in Referenz-Produktmodelle und Produktmodelle. Die Aufteilung wird gewählt, um den Einfluss der Produktgenerationsentwicklung auf die Struktur des Produkts aufzeigen zu können, während die Produktmodelle die Abbildung der realen Produkte darstellen. Da Meta-Modelle durch Meta-Meta-Modelle usw. beschrieben werden können, wird dieser Sachverhalt mithilfe eines Metaⁿ im Produktmodellierungs-Framework dargestellt. Auf die Einführung zusätzlicher Meta-Ebenen wird verzichtet, da es das Ziel ist, ein Framework zu schaffen, das die ohnehin abstrakten Meta-Modelle mithilfe der Produktgenerationsentwicklung für die Entwicklungspraxis zugänglich macht und nicht, diese noch weiter zu abstrahieren.

Hieraus ergeben sich die in Abbildung 5.3 dargestellten Abstraktionsgrade der Instanziierung.

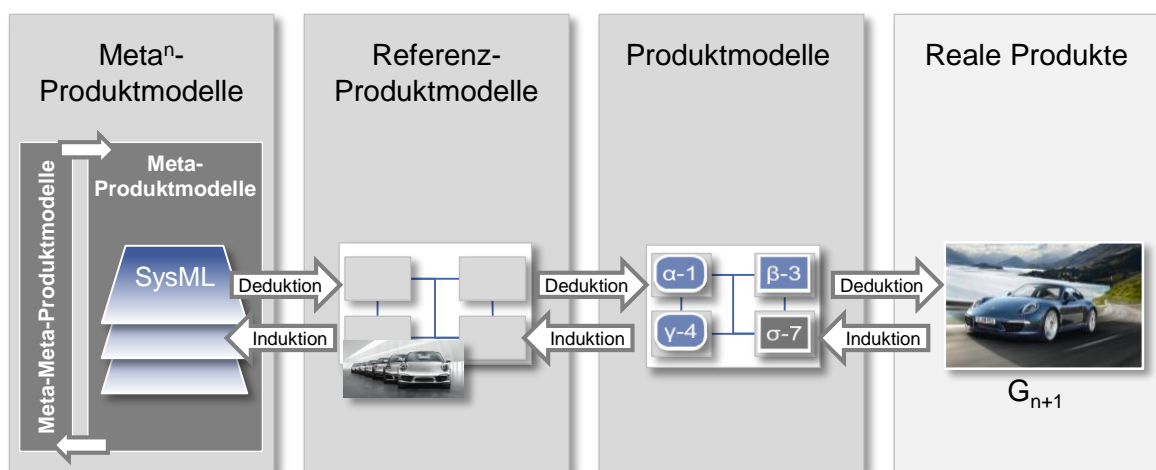


Abbildung 5.3: Abstraktionsgrade der Instanziierung³¹⁶

Individualisierung

Wie in Abbildung 5.4 dargestellt, kann die Individualisierung in generisch, domänen-spezifisch und systemspezifisch unterteilt werden.

³¹⁶Bild Porsche AG

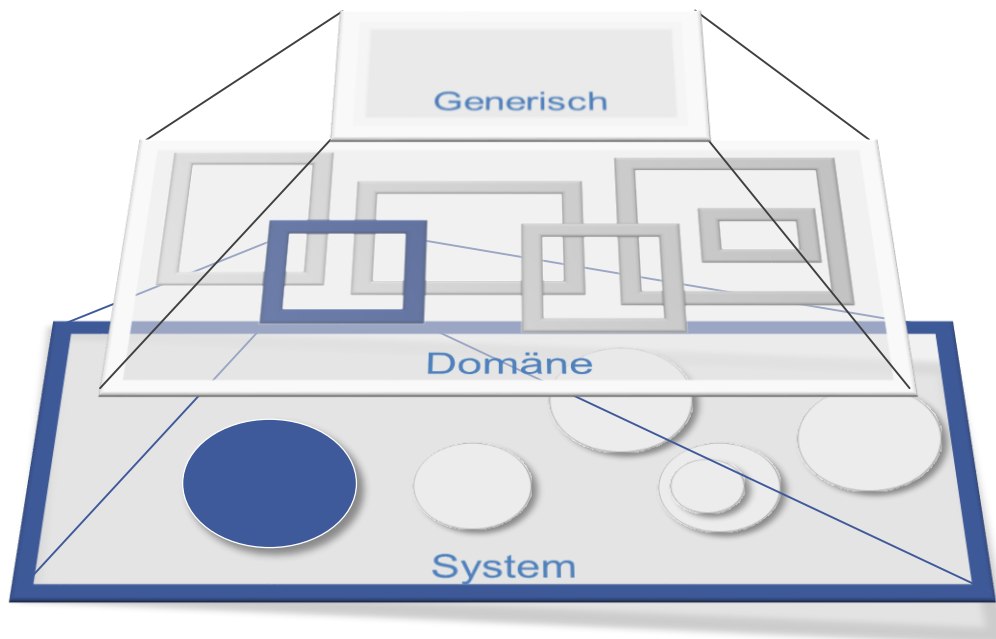


Abbildung 5.4: Abstraktionsgrade der Individualisierung

Als generisch wird die abstrakteste Ebene verstanden. Modelle in diesem Bereich sollten dem Anspruch gerecht werden, auf Anwendungsfälle unterschiedlicher Domänen übertragen werden zu können. Das bedeutet, sie sollten sich für eine interdisziplinäre Modellierung technischer Systeme eignen.

Als Domäne kann die im jeweiligen Kontext betrachtete Klassifizierung der Technik verstanden werden. Wie beispielsweise die Ingenieursdisziplinen: Elektrotechnik, Maschinenbau usw. oder aber die Einteilung in Branchen: Automobilindustrie oder Luft- und Raumfahrt. Diese sind jedoch nicht scharf abzugrenzen und daher nicht überschneidungsfrei. Eine Begründung hierfür liefert ROPOHL:³¹⁷

„Vielleicht kennt man die Einteilung der Technikwissenschaften in Maschinenbau, Elektrotechnik und Bauwesen oder aus der Wirtschaftsstatistik die Systematik der Industriebranchen mit Metallverarbeitung, Elektroindustrie, chemischer Industrie, Büromaschinenindustrie usw. Beide Einteilungen aber sind, wie ich hier nicht im Einzelnen zeigen kann, weder empirisch stimmig noch theoretisch begründet, da sie sich geschichtlichen Zufälligkeiten verdanken.“

Eine weitere Möglichkeit zur Unterteilung in Domänen kann nach ROPOHL wie folgt gewählt werden. Dazu kann die Klassifizierung mithilfe einer Matrix dargestellt werden, welche sich aus den Dimensionen 1. Funktion (mit den Ausprägungen: Wandlung,

³¹⁷Ropohl, 2009, S. 130.

Transport und Speicherung) und 2. Output der Sachsysteme (Masse, Energie, Information) aufspannen lässt. Hierdurch lässt sich beispielsweise die Fertigungstechnik der Funktion: Wandlung und dem Output: Masse zuordnen.³¹⁸

Da sich bisher keine überschneidungsfreie Klassifikation der Technik durchgesetzt hat, ist die Wahl der entsprechenden Domäne im Kontext der Produktmodellierung, dem Zweck entsprechend zu wählen.

Auf der dritten Ebene - der Systemebene - ist das entsprechend zu modellierende Produkt zu sehen. Dabei kann ein Produkt ein Subsystem eines anderen Produktes der gleichen Domäne sein. So ist beispielsweise ein Getriebe ein Produkt und gleichzeitig ein Subsystem eines Automobils der Domäne Automobilindustrie.

Produktmodellierungs-Framework

In Abbildung 5.5 wird das Produktmodellierungs-Framework dargestellt. Dabei ergeben sich aus den Abstraktionsgraden der Individualisierung und Instanziierung zwölf Felder, welchen verschiedene Arten der Modellierung technischer Systeme zugeordnet werden können. In den folgenden Absätzen wird auf wesentliche Elemente des Produktmodellierungs-Frameworks genauer eingegangen.

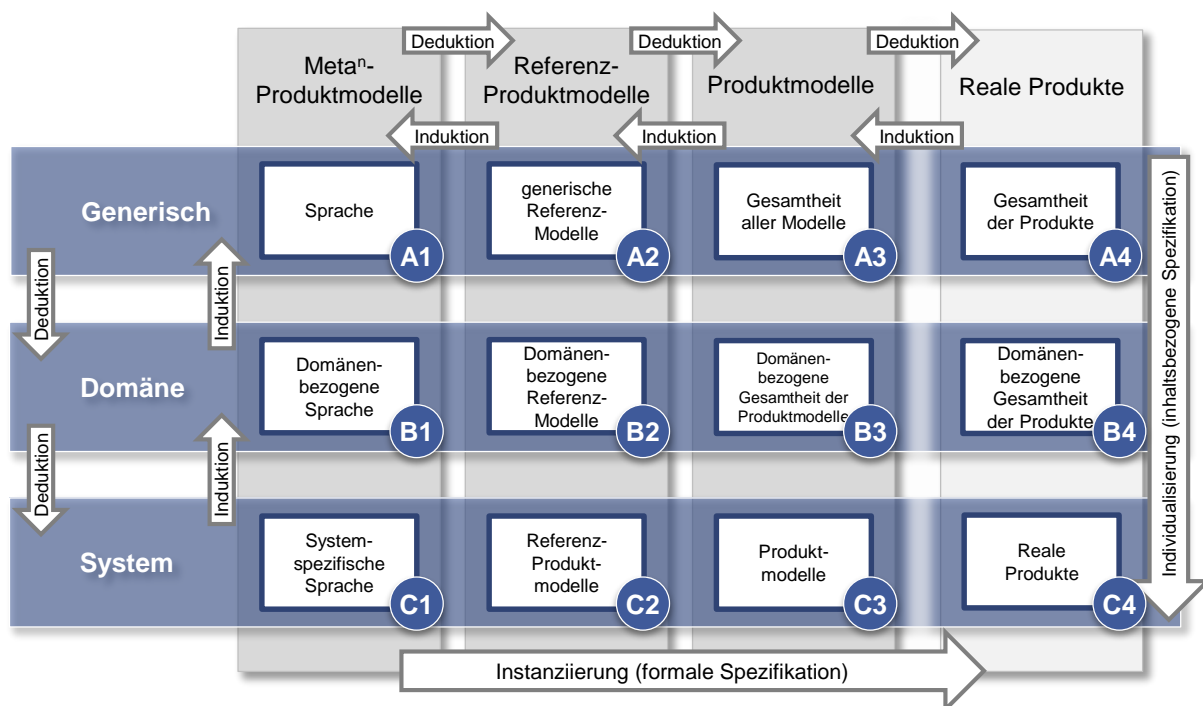


Abbildung 5.5: Produktmodellierungs-Framework³¹⁹

³¹⁸Ropohl, 2009.

Sprache (A1 in Abb. 5.5)

Die Basis für das Framework bilden die einzelnen interdisziplinären Meta-Modelle wie beispielsweise SysML. Sie können verwendet werden, um unterschiedliche Systeme zu modellieren und dadurch in unterschiedlichen Domänen eingesetzt werden. Eine Modellersprache kann wie in Kapitel 2.1.3 dargestellt mit Meta-Meta-Modellen beschrieben und definiert werden.

Um domänenübergreifend eingesetzt werden zu können, müssen diese Sprachen generisch sein. Dies hat zur Folge, dass die generischen Sprachen vielen Entwicklern zu abstrakt erscheinen. Modellierungswerkzeuge, wie beispielsweise MagicDraw³²⁰, können dazu beitragen, die Modellierung zu erleichtern, indem sie helfen, sprachkonforme Modelle aufzubauen und die Syntax zu befolgen.

Generische Referenz-Produktmodelle (A2)

Referenz-Produktmodelle entstehen aus der Erfahrung abgeschlossener Projekte und tragen dazu bei, diese für künftige Projekte zugänglich zu machen. Dadurch können auf Basis der „Lessons Learned“ Muster abgeleitet werden, welche auf künftige Produkte übertragen werden können. Auf der generischen Ebene sind hier vor allem Methoden anzusiedeln, welche beschreiben, wie in einem Projekt sinnvoll vorgegangen werden sollte, um die Anwendbarkeit der Sprachen zu erhöhen und das Verständnis der Beteiligten zu steigern. Diese müssen im Kontext der entsprechenden Domäne oder des entsprechenden Systems angepasst werden, um sie sinnvoll verwenden zu können.

Als Beispiel für Muster auf generischer Ebene kann die Methode SysMod³²¹ genannt werden. Dabei nutzen die Methoden die Elemente der Sprache (A1) und legen Empfehlungen nahe, in welcher Reihenfolge sie aufeinander aufbauen können. Bei Bedarf können auf Basis von Erfahrungen die Sprachen (A1) induktiv um fehlende Elemente erweitert werden.

³¹⁹nach Albers, Matthiesen, Bursac, Moeser, Schmidt & Lüdcke, 2014.

³²⁰www.nomagic.com/products/magicdraw.html, letzter Aufruf am 01.02.2016

³²¹vgl. Weilkiens, 2008 und Kapitel 2.1.3

Domänenbezogene Sprache (B1)

Als domänenbezogene Sprache werden Sprachen geführt, deren Elemente für eine Domäne angepasst sind und daher nicht mehr für alle Domänen verwendet werden können. Ein Beispiel für eine domänenbezogene Sprache ist der Ansatz nach ZINGEL, welcher folgendes Ziel hat:³²²

„Der Fokus der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungstechnik liegt auf den Anforderungen und Bedürfnissen von Maschinenbauingenieuren [. . .], welche in der heutigen [. . .] SysML, bisher nicht hinreichend berücksichtigt wurden. Die SysML wird in dieser Arbeit eingesetzt und erweitert [. . .].“

Der maschinenbauspezifische Ansatz C&C²-A³²³ wird dazu in der generischen Sprache SysML implementiert. Diese nutzt die Elemente der SysML deduktiv und spezifiziert beispielsweise „Flow Ports“ als Wirkflächenpaare mit ihrer Flussart (Energie, Stoff oder Information). Induktiv ist es möglich, aus der Anwendung für den Maschinenbau die Erkenntnisse auf die SysML zu übertragen und damit diese besser nutzbar für die Anwendung in der spezifischen Domäne zu gestalten.

Als weiteres Beispiel für eine domänenbezogene Sprache kann die in der Domäne Embedded Systems verwendete Sprache MARTE (Modeling and Analysis of Real-Time and Embedded Systems)³²⁴ genannt werden.

Klassische Modelle, wie beispielsweise Computer-aided Design (CAD)-Modelle können auch als eine domänenspezifische Sprache zur Modellierung technischer Systeme verstanden werden.

Domänenbezogene Referenz-Produktmodelle (B2)

Referenz-Produktmodelle können genutzt werden, um die Erfahrung aus vergangenen Projekten anzuwenden. Sind diese auf eine Domäne begrenzt, können dadurch auch Strukturinformationen implementiert werden. Dabei bilden sie den Teil der Strukturinformationen ab, welcher über unterschiedliche Produkte hinweg erhalten bleibt (beispielsweise das Regelwerk eines Baukastens). Durch das domänenbezogene Referenz-Produktmodell kann dadurch die Möglichkeit geschaffen werden, Informationen sys-

³²²Zingel, 2013, S. 108 f.

³²³vgl. Albers & Wintergerst, 2013 und Matthiesen, 2002.

³²⁴vgl. Object Management Group, 2011.

tematisch abzulegen, zwischen unterschiedlichen WMS auszutauschen und somit die Datenintegrität zu erhöhen.

Um die Informationen für das Modell zu generieren, können Informationen aus der Produktgenerationsentwicklung verwendet werden. Dazu werden im Referenz-Produktmodell (C2) die Informationen generiert, welche über die unterschiedlichen Generationen hinweg erhalten bleiben. Induktiv kann dadurch das domänenbezogene Referenz-Produktmodell erstellt und deduktiv genutzt werden, um es für die einzelnen Systeme zur Verfügung zu stellen. Können diese Informationen weiter abstrahiert und über Domänen hinweg eingesetzt werden (z. B. die Erkenntnis, dass es sinnvoll ist, Use Cases zu modellieren), kann daraus ein generisches Referenz-Produktmodell (A2) entstehen.

Referenz-Produktmodelle (C2)

Aus der Produktgenerationsentwicklung können Referenz-Produktmodelle gewonnen werden. Denn per Definition 6 ist die Produktgenerationsentwicklung dann gegeben, wenn mindestens ein Referenzprodukt vorliegt. Die Elemente, die dabei von einer Generation zumindest teilweise auf die nächste übertragen werden können, wie beispielsweise die Struktur, werden im Referenz-Produktmodell abgebildet und mit Best Practices angereichert. Auf diese Weise entsteht eine mentale oder explizite Wissensbasis, die für die Entwicklung neuer Produktgenerationen verwendet werden kann und mit dem Entwicklungsrisiko korreliert. Dadurch wird deutlich, wieso beispielsweise die Entwicklung eines Facelifts des Typ 911 mit geringem Neuentwicklungsanteil für Porsche weniger Risiko birgt, als für einen Konkurrenten, der bisher kein vergleichbares Produkt hat, obwohl beide die Vorgängergeneration des 911er als Referenzprodukt verstehen.

Diese Wissensbasis kann verwendet werden, um eine Checkliste für die Elemente des Produktes in der Frühen Phase zu etablieren und projektspezifische Ausprägungen anzufügen. Am Beispiel der Domäne Fahrzeug könnte so z. B. das Element Motor mit der Ausprägung 6-Zylinder Boxer-Motor oder die Anforderung „Höchstgeschwindigkeit“ mit der Ausprägung „300 $\frac{km}{h}$ “ versehen werden. Weitere Informationen im Modell können beispielsweise die Verknüpfung zwischen Motor und Höchstgeschwindigkeit sein, da sie sich unabhängig von einer spezifischen Produktgeneration gegenseitig beeinflussen. Darüber hinaus können an das Referenz-Produktmodell auch Informationen als Best Practice bzgl. des Härte- und des Reifegrades³²⁵ gehängt werden, um zu wissen,

³²⁵vgl. Kapitel 2.1.2 und Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012.

welche Anforderungen in einem Projekt frühzeitig festgesetzt werden sollten. So ist es beispielsweise zielführend, frühzeitig den Härtegrad des Zielgewichtes eines Fahrzeugs zu erhöhen, da darauf aufbauend viele Entwicklungsschritte folgen können, wie z. B. die Auslegung der Bremsen oder der Karosserie. Gleichzeitig ist der Reifegrad des Zielgewichtes erst unmittelbar vor Fertigstellung des Projekts final, da jede physische Komponente und damit jede Komponentenänderung Einfluss auf das Gesamtgewicht hat.

Jene Strukturelemente, welche domänenübergreifend gleich sind, können induktiv in das domänenbezogene Referenz-Produktmodell (B2) überführt werden. So haben beispielsweise alle Fahrzeuge einen Motor oder eine Höchstgeschwindigkeit, während die Position des Motors bei Standard- und bei Heckantrieben unterschiedlich ist. Die domänenbezogenen Referenz-Produktmodelle (B2) können deduktiv für die einzelnen Produkte abgeleitet und um systemspezifische Informationen aus der Produktgenerationsentwicklung erweitert werden. Ein Beispiel wäre „die Lage des Motors ist hinten“.

Produktmodelle (C3)

Produktmodelle sind die Abbildung eines realen Produktes. Sie haben die konkreteste Form der Modelle im Produktmodellierungs-Framework und werden erstellt, um bei den Entwicklern ein einheitliches Verständnis über das künftige Produkt zu erhalten. Durch das Explizieren der mentalen Modelle wird hierdurch ein gemeinsames Bild der Entwickler geschaffen. Dadurch besteht die Möglichkeit, frühzeitig im Prozess Missverständnisse aufzudecken und dadurch die Wissensbasis der Beteiligten zu erweitern. Mithilfe der expliziten Modelle kann das Zielsystem weiter verfeinert und in der nächsten Iteration das Produktmodell konkreter werden.

Dadurch eignet sich das Produktmodell zur Synthese eines neuen Produktes (C4). Gleichzeitig kann es aber auch dazu dienen, ein bestehendes Produkt nachzubilden und dadurch analytisch neue Erkenntnisse zu gewinnen, mit deren Hilfe die Produkte verbessert werden können oder das Wissen für folgende Produktgenerationen zugänglich gemacht werden kann. Dazu können spezifische Informationen entweder an das Modell direkt angehängt oder, wenn die Informationen wiederkehrend auftauchen, in das Referenz-Produktmodell (C2) überführt werden. Außerdem kann durch neue Komponenten das Referenz-Produktmodell erweitert werden. Wird beispielsweise erstma-

lig ein Fluxkompensator³²⁶ entwickelt und soll für künftige Generationen wieder verwendet werden, kann er im Referenz-Produktmodell (C2) vorgesehen werden.

Domänenbezogene Gesamtheit der Produktmodelle (B3)

Die domänenbezogene Gesamtheit der Produktmodelle stellt eine Art Bibliothek der Modelle dar. Diese können mit ihren Ausprägungen dem generischen Referenz-Produktmodell (B2) zugeordnet werden. Im Bereich der Produktgenerationsentwicklung kann die Bibliothek genutzt werden, um effizient neue Produkte zu modellieren, da hier ein Teil der Komponenten übernommen und ein anderer Teil angepasst wird. Durch die Gesamtheit der modellierten Produktmodelle entsteht ein Produktportfolio, welches koordiniert werden kann. In diesem Kontext können Varianten verglichen und reduziert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, diese so zu modellieren, dass die Plattformumfänge nur einmal modelliert werden müssen und darauf aufbauend die Hutumfänge ergänzt werden. Dadurch entsteht in der domänenbezogenen Gesamtheit der Produktmodelle z. B. ein Baukasten, mit den modellierten Motoren, den modellierten Höchstgeschwindigkeiten und den daraus resultierenden Spannweiten des Baukastens.

Die domänenbezogene Gesamtheit der Produktmodelle entsteht induktiv aus den erstellten Produktmodellen (C3) und erhält deduktiv aus den domänenbezogenen Referenzmodellen (B2) ihre Struktur. Die domänenbezogene Gesamtheit kann genutzt werden, um deduktiv neue Produktmodelle (C3) aufzubauen und dadurch den Modellierungsaufwand zu reduzieren.

Reales Produkt (C4)

Die realen Produkte stellen die zu entwickelnden oder bereits entwickelten Produkte dar. Diese können mithilfe von Produktmodellen (C3) synthetisiert oder analysiert werden. Die bei der Entwicklung gewonnenen Erkenntnisse können dabei mit den Modellen abgebildet werden.

³²⁶Müller, 2015.

5.1.3 Zwischenfazit

Häufig werden Produkte auf Basis bestehender Produkte entwickelt. Der im Bereich der Prozessmodellierung beschriebene Ansatz kann auf die Modellierung von Produkten übertragen werden. Dabei werden mittels Referenzmodellen Informationen aus vergangenen Produktgenerationen nutzbar gemacht. Die Abstraktionsgrade des iPeM werden hierbei als Basis für ein Produktmodellierungs-Framework herangezogen. Durch die resultierenden Abstraktionsgrade der Produktmodellierung kann somit auf bestehende Informationen zugegriffen und die Modellierung effizienter gestaltet werden.

Dazu werden zunächst auf Basis der generischen Sprache (A1, z. B. SysML) generische Referenz-Produktmodelle (A2, z. B. Methoden zur Anwendung von SysML) überführt. Je nach Domäne kann die generische Sprache weiter spezifiziert werden, um sie für die Entwickler intuitiver werden zu lassen. Daraus resultieren domänenspezifische Sprachen (B1, z. B. SysML für die Automobilindustrie). Auf deren Basis können die domänenspezifischen Referenz-Produktmodelle (B2, z. B. Fahrzeuge haben einen Motor) erstellt werden. So können Strukturen entstehen, welche die zu entwickelnden Produkte in ihrer Grundstruktur beschreiben. Diese domänenbezogenen Referenz-Produktmodelle (B2) können um produktspezifische Umfänge erweitert werden. So entstehen Referenz-Produktmodelle (C2, z. B. die Fahrzeuge haben einen Heckmotor), welche als eine Checkliste der Frühen Phase verstanden werden können. Zur effizienten Modellierung können die Referenz-Produktmodelle (C2) mit bestehenden Modellen aus der domänenbezogene Gesamtheit der Produktmodelle (B3, z. B. Motor B6 oder B6T) verknüpft werden. Dabei handelt es sich um eine Art Bibliothek der bisher verwendeten Produktmodelle. Das Ergebnis stellen die Produktmodelle (C3, z. B. Fahrzeug mit B6T Heckmotor) dar, welche verwendet werden können, um reale Produkte (C4, z. B. Porsche Typ 911) zu beschreiben.

Der beschriebene Weg kann auch in die andere Richtung geführt werden. Dazu können induktiv neue Erkenntnisse entstehen, um die Produktmodelle, ihre Referenz-Produktmodelle und schließlich ihre Meta-Produktmodelle auf der entsprechenden Ebene weiterzuentwickeln.

5.2 Unterstützung der Baukastenentwicklung mithilfe von MBSE

Zur Unterstützung der Baukastenentwicklung mithilfe von MBSE wird das in Kapitel 5.1 entwickelte Produktmodellierungs-Framework auf die Baukastenentwicklung angewendet.

5.2.1 Unterstützung der Baukastenentwicklung mithilfe des Frameworks

Um die Baukastenentwicklung zu unterstützen, wird die Domäne als ein Baukasten verstanden. Daraus ergibt sich, dass die einzelnen Produkte deduktiv aus dem Baukasten ausgeleitet werden können und induktiv den Baukasten beschreiben. Dieser basiert auf dem Baukasten-Referenzmodell, welches aus den Referenz-Produktmodellen induktiv erstellt werden kann.

Die Vorgehensweise zur Unterstützung der Baukastenentwicklung kann mithilfe der in Abbildung 5.6 dargestellten Felder beschrieben werden. Zur Veranschaulichung wurde ganz bewusst ein sehr einfaches Beispiel aus dem bekannten Baukasten Lego gewählt. Es soll zunächst helfen die theoretischen Zusammenhänge zu verdeutlichen. Anschließend wird in Kapitel 6 der Zusammenhang an komplexen Praxisbeispielen verdeutlicht. Auf die Elemente des Produktmodellierungs-Frameworks und das Lego-Beispiel wird im Folgenden näher eingegangen.

Hierbei können die Bausteine des Lego Baukastens als Meta-Modell verstanden werden. Die modellierten Fahrzeuge stellen die Produktmodelle (C3) dar. Diese besitzen ein Referenz-Produktmodell (C2) und basieren auf einem einfachen Baukasten (B3). Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen den Bausteinen und Referenzmodellen wurde eine einheitliche Farblogik gewählt.

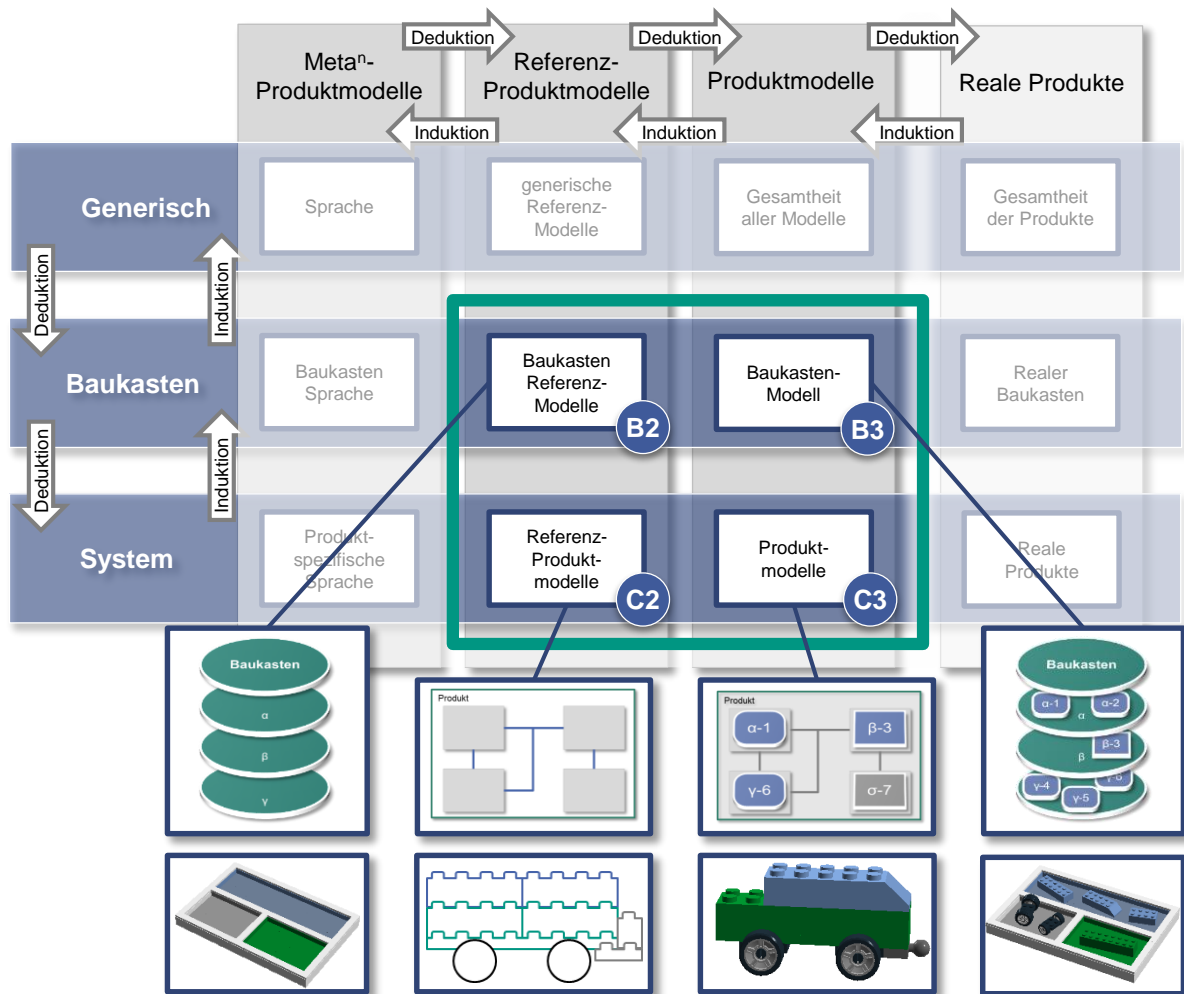


Abbildung 5.6: Elemente der Baukastenentwicklung im Produktmodellierungs-Framework³²⁷

Modellierung der Referenz-Produktmodelle (C2 in Abb. 5.6)

Die aus den Referenzprodukten entstehenden Referenz-Produktmodelle (C2) beschreiben eine Wissensbasis und können projektspezifisch konkretisiert werden. Dieser Sachverhalt ist am Lego-Beispiel in Abbildung 5.7 dargestellt.

³²⁷Die Lego Abbildungen wurden selbst erstellt. Dazu wurde der Lego Digital Designer verwendet. Nähere Informationen unter idd.lego.com, letzter Aufruf am 04.02.2016

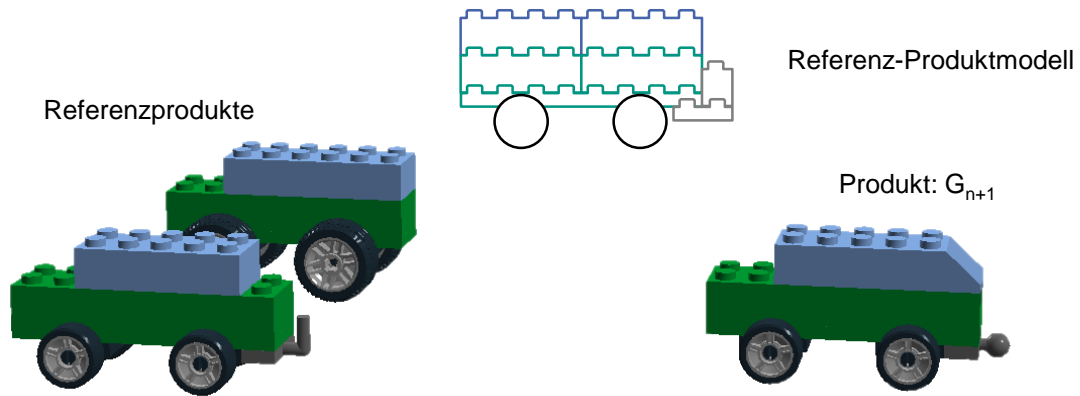


Abbildung 5.7: Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Referenz-Produktmodell am Beispiel von Lego

Anhand bestehender Produktgenerationen können induktiv Informationen im Referenz-Produktmodell abgebildet werden. Diese können neben der Struktur weitere Informationen beinhalten. Soll beispielsweise über mehrere Generationen hinweg das gleiche Bauteil verwendet werden, so liegen bereits zu Beginn des Entwicklungsprojekts konkrete Informationen wie z.B. Sachnummer, Gewicht, Kosten und Bauraum vor und können deduktiv in den Entwicklungsprozess einfließen (vgl. Abb. 5.8).

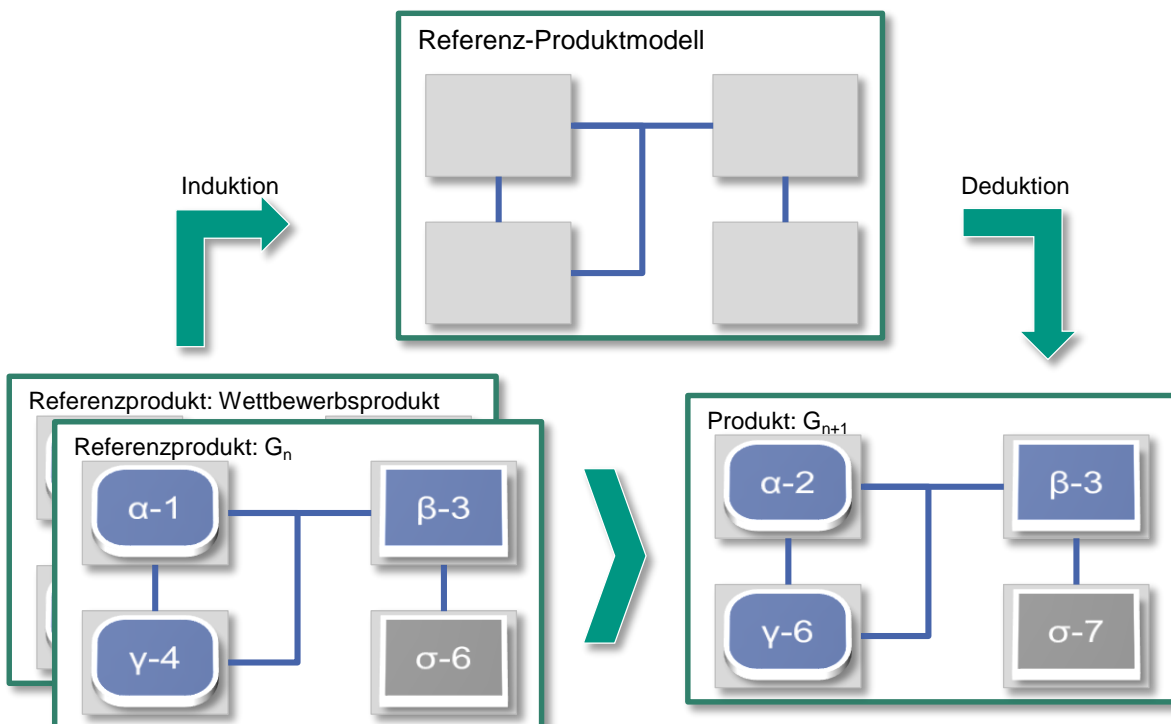


Abbildung 5.8: Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Referenz-Produktmodell

Modellierung des Baukasten Referenzmodells (B2)

Auf Basis der einzelnen Referenz-Produktmodelle (C2) werden Gemeinsamkeiten gesucht und diese zu einem Baukasten-Referenzmodell (B2) aggregiert. Über den Vergleich der einzelnen Referenz-Modelle wird ersichtlich, welcher Teil einen baukasten-spezifischen Umfang besitzt und welcher individuell für ein Produkt ist (vgl. Abb. 5.9).

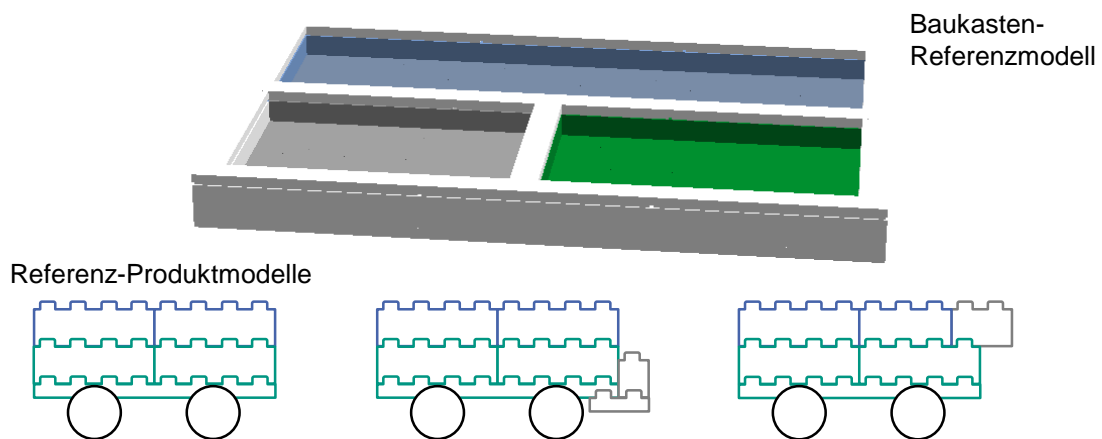


Abbildung 5.9: Zusammenhang zwischen Referenz-Produktmodellen und dem Baukasten-Referenzmodell

Dadurch wird auch erkenntlich, auf Basis welcher Produkte ein Baukasten gebildet werden kann und welche Produkte die Architektur verletzen. Außerdem wird entschieden, welche Umfänge des Referenz-Modells nicht Teil der Baukastenentwicklung sein sollen (im Lego-Beispiel Anhängerkupplung und Heckspoiler). So ist es beispielsweise häufig gewünscht, dass für den Kunden sichtbare Komponenten nicht Teil des Baukastens sind, sondern für das Produkt spezifisch entwickelt werden, um die Produkte vor dem Kunden ausreichend optisch differenzieren zu können. Dies ist generisch in Abbildung 5.10 dargestellt.

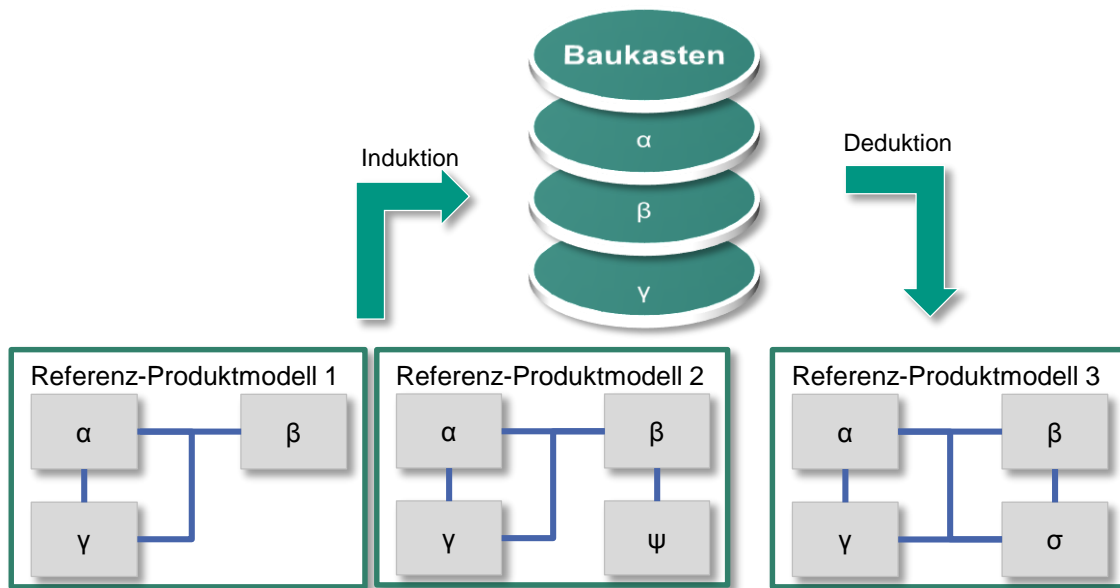


Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen Referenz-Produktmodellen und dem Referenz-Baukastenmodell

Während das Referenz-Produktmodell (C2) dazu genutzt werden kann, das komplette Produkt zu modellieren, wird das Baukasten-Referenzmodell (B2) zum Zweck der Austauschbarkeit und Vergleichbarkeit der Komponenten entwickelt. Entscheidend ist dabei, dass die Modelle konsistent sind und sowohl induktiv als auch deduktiv in einander überführt werden können. Denn ansonsten können die Informationen der Produkte nicht induktiv den Baukasten beschreiben und gleichzeitig verwendet werden, um die Produkte aus dem Baukasten auszuleiten.

Um dies zu gewährleisten, müssen die Strukturen aufeinander basieren und können nicht beliebig bestimmt werden. Denn zwei beliebige Strukturen können meist nicht ineinander überführt werden. Um dies zu veranschaulichen, kann man sich wie in Abbildung 5.11 dargestellt, zwei einfache Strukturen vorstellen, die aus bis zu fünf Elementen bestehen. Die Menge der blauen Elemente stellt das Baukasten-Referenzmodell (B2) dar, während die Menge der grünen Elemente das Referenz-Produktmodell (C2) repräsentiert. Diese zwei Mengen können unterschiedliche Arten von Funktionen darstellen.

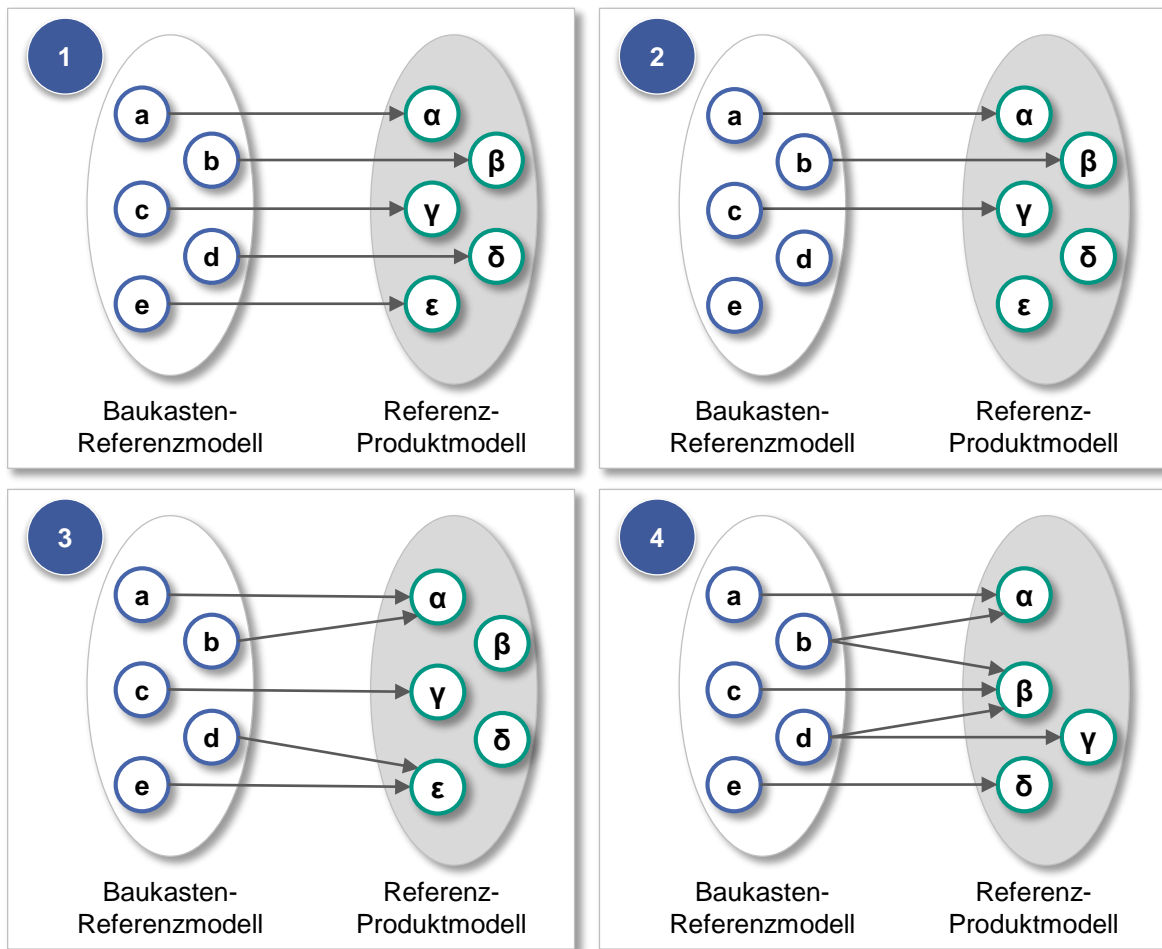


Abbildung 5.11: Übertragbarkeit der Referenz-Produktmodelle: (1) bijektive Funktion, (2) injektive Funktion (3) surjektive Funktion, (4) keine Funktionen

Um beide Strukturen in einander überführen zu können, ist daher eine umkehrbare (bijektive) Funktion (1) notwendig. Falls Teil-Umfänge des Referenz-Produktmodells nicht in die baukastenspezifische Struktur übernommen werden, genügt eine injektive Funktion (2). Diese ist dadurch beschrieben, dass es zu jedem Wert der Urmenge (in diesem Fall das Referenz-Baukastenmodells) einen Wert der Zielmenge (Referenz-Produktmodells) gibt, aber nicht zu jedem Wert der Zielmenge ein Wert der Urmenge bestehen muss. Eine surjektive Funktion (3) hingegen ist lediglich dazu geeignet, das Urbild eindeutig in die Zielmenge zu überführen. Die verbliebene Zuordnung (4) stellt keine Funktion und somit keine Abbildung dar, ist aber das wahrscheinliche Ergebnis, wenn eine von den Produkten losgelöste Struktur für Baukästen entwickelt wird.³²⁸

Handelt es sich bei der Abbildung der Referenz-Modelle um eine injektive Funktion, kann erklärt werden, dass ein Baukasten nicht vollständig ein Produkt abbilden kann, während aber die Gesamtheit der Produkte vollständig einen Baukasten abbilden kann.

³²⁸ vgl. z. B. Ebbinghaus, 2003 bzgl. der Funktionen

Folglich ist es zielführend, den Baukasten und die Produkte parallel und nicht den Baukasten vorgelagert zu entwickeln.

Sind Referenz-Produktmodelle (C2) und Baukasten-Referenzmodell (B2) nicht abbildbar, entsteht das in Kapitel 4.4.2 beschriebene Problem, dass die Produktmodelle in sich zwar konsistent, aber zwischen den unterschiedlichen WMS inkonsistent sind und kein Informationsfluss zwischen den entsprechenden WMS möglich ist. Dadurch ist ein striktes Änderungsmanagement notwendig, da eine Änderung in einem Modell gleichzeitig in allen Modellen nachgeholt werden muss.

Modellierung des Baukastens (B3)

Auf Basis des Referenz-Baukastenmodells (B2) können die einzelnen Komponenten dem Baukastenmodell (B3) zugeordnet werden. In Abbildung 5.12 ist das Baukastenmodell durch die Lego-Box und die dazugehörigen Bausteine dargestellt.

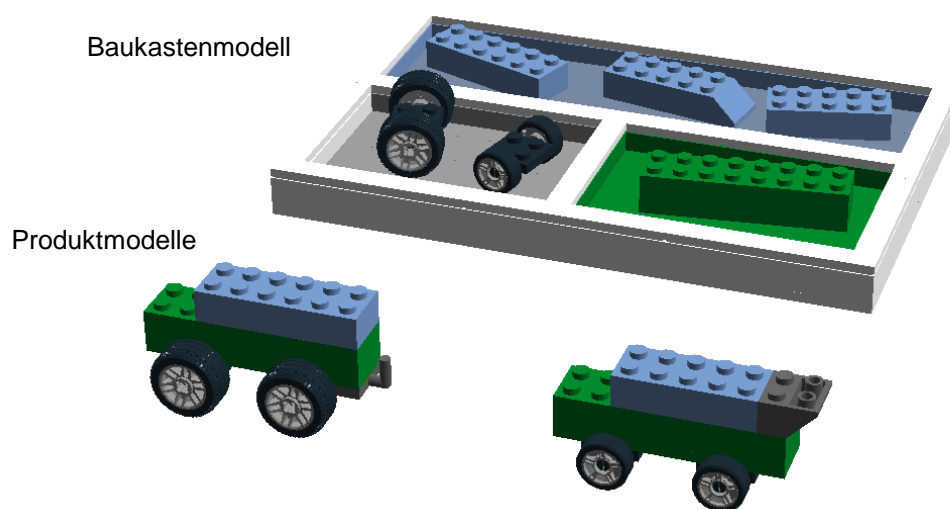


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Baukastenmodell

Hieraus entsteht ein Überblick über die bestehenden Komponenten. Bereits modellierte Bausteine können wiederverwendet werden, um effizient Produkte zu modellieren. Außerdem kann auf einer Ebene des Baukastens die Variantenvielfalt der Bausteine analysiert werden. So wird beispielsweise ersichtlich wie viele verschiedene Karosseriebauformen (blaue Steine) bereits vorliegen. Diese kann wiederum nach dem fraktalen Charakter der Standardisierungsmethoden auf ihre Struktur heruntergebrochen und dadurch kann die interne Vielfalt reduziert werden. Im Lego-Beispiel sind die ersten 5 Reihen bei allen blauen Bauteilen gleich und könnten eine Plattform mit unterschiedlichen Hüten darstellen. Werden neue Subsysteme im Rahmen der Entwicklung eines

neuen Produkts entwickelt (z. B. hier Heckspoiler), so ist es wichtig, diese nicht individuell zu betrachten, sondern ebenfalls anhand des Baukasten Regelwerks zu entwickeln und gegen bestehende Bausteine abzugrenzen (vgl. Abb. 5.13).

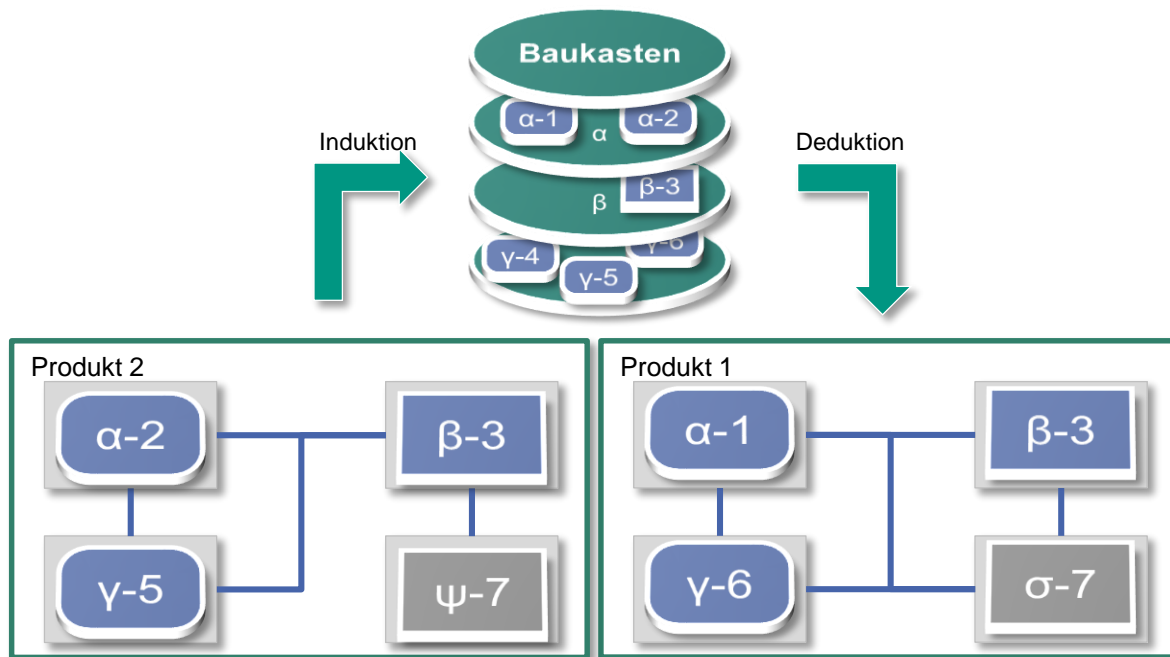


Abbildung 5.13: Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Baukastenmodell

Modellierung der Produkte (C3)

Abschließend können neue Produktmodelle (C3) mithilfe der Baukasten-Modelle (B3) effizienter erstellt werden. Dazu wird durch das Referenz-Produktmodell (C2) und den Baukasten die Basis für die Modellierung geschaffen. Das Referenz-Produktmodell (C2) kann dazu als Checkliste der Frühen Phase verstanden und mithilfe des Baukastens projektspezifisch ausgeprägt werden. Hinzu kommen Subsysteme, welche nicht Teil des Baukastens sind, wie beispielsweise produktspezifische Differenzierungsmerkmale und neu entwickelte Bauteile. Dabei dient stets die Entwicklung im Rahmen eines Produkts als Ausgangsbasis für neue Module und nicht die Entwicklung von Modulen für einen Baukasten, die später in Produkten zum Einsatz kommen.

5.2.2 Zwischenfazit

Das Produktmodellierungs-Framework für Baukästen besteht aus den vier Feldern Baukasten-Referenzmodell (B2), Baukastenmodell (B3), Referenz-Produktmodell (C2) und Produktmodell (C3). Mithilfe dieser Modelle kann die Modellierung von Baukästen

und den dazugehörigen Produkten effizient erfolgen, da auf Informationen aus vorherigen Produktgenerationen zugegriffen werden kann. Durch die entstehenden Modelle wird ein einheitliches Verständnis bei den Entwicklern gefördert. Außerdem werden Wechselwirkungen zwischen den Produkten leichter ersichtlich. Auf diese Weise kann die Baukastenentwicklung durch die gemeinsame Entwicklung von Baukästen und den dazugehörigen Produkten unterstützt werden.

5.3 Fazit

Mit der präskriptiven Studie wurde das Ziel verfolgt, einen theoretischen Rahmen für das MBSE im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu schaffen und dadurch die Entwicklung von Baukästen zu unterstützen. Dazu wurden folgende Forschungsfragen abgeleitet:

- 2.1 Wie können Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden, um die Produktmodellierung effizienter zu gestalten?
- 2.2 Wie können dadurch Baukästen und Produkte in der Frühen Phase modelliert werden?

Das dabei entstandene Produktmodellierungs-Framework basiert auf den Abstraktionsgraden des iPeM und wurde auf den Kontext der Produktmodellierung übertragen. Das Framework ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

Auf Basis der einzelnen Felder des Produktmodellierungs-Frameworks wurde beschrieben, wie mithilfe von Induktion und Deduktion eine Verbindung zwischen der abstrakten Sprache und einer konkreten Anwendung hergestellt werden kann. Im Kontext der Produktgenerationsentwicklung sind hierbei Referenz-Produktmodelle hervorzuheben. Sie dienen als Modelle, die auf Basis der Informationen aus vorherigen Produktgenerationen abgeleitet werden können und bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen zur Verfügung stehen. Auf diese Weise dienen sie als Wissensbasis und können in der Frühen Phase als eine Checkliste herangezogen und produktspezifisch ausgeprägt werden. Anhand des Produktmodellierungs-Frameworks wurde außerdem gezeigt, wie die einzelnen Elemente der Baukastenentwicklung zusammenhängen und mittels Induktion und Deduktion ineinander überführt werden können. Bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen kann auf die Modelle zugegriffen werden, um ein gemeinsames Verständnis bei den Entwicklern zu erzeugen und Wechselwirkungen zwischen den Produkten und dem Baukasten transparent zu machen. Da die

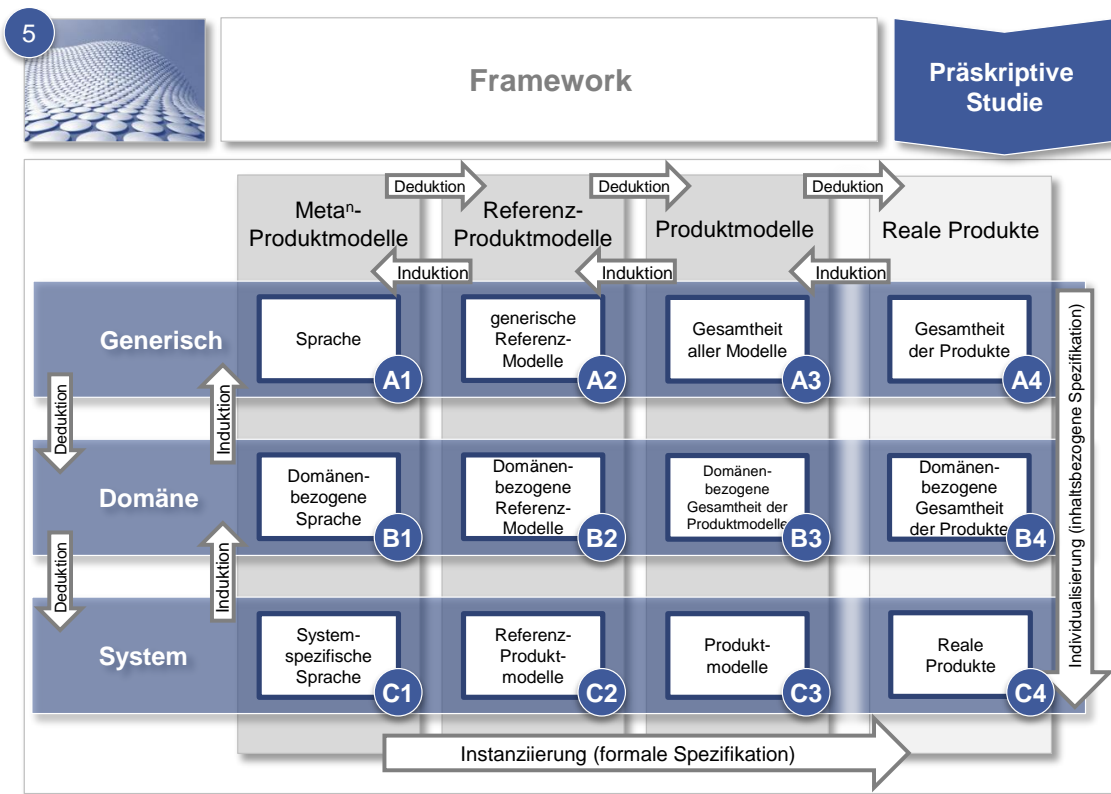


Abbildung 5.14: Produktmodellierungs-Framework

neuen Produktmodelle nicht auf einem „Weißen Blatt“ beginnen, sondern auf Informationen vorheriger Produktgenerationen aufbauen, kann die Modellbildung effizient erfolgen.

6 Anwendung des Frameworks in der Produktentwicklung

In diesem Kapitel wird nach der DRM eine zweite präskriptive Studie durchgeführt, um die in Kapitel 3.1.3 abgeleitete Forschungsfrage zu beantworten:

3. Wie kann durch die Modellierung nach dem MBSE-Ansatz die Baukastenentwicklung und die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützt werden?

Nach der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten „Spiral of Applied Research“ wird in diesem Kapitel das abgeleitete Produktmodellierungs-Framework evaluiert, indem es zur Modellierung von Baukästen im industriellen Umfeld angewendet wird. Dazu wird die abgeleitete Forschungsfrage durch folgende Teilfragen näher spezifiziert:

- 3.1 Wie können mithilfe des Produktmodellierungs-Frameworks Baukästen auf Basis des MBSE unterstützt werden?
- 3.2 Wie kann die Modellierung zur Identifikation von Standardisierungsmöglichkeiten beitragen?

Durch die Beantwortung der Teilfragen sollen einerseits - durch die Zuordnung der Modelle zu den Elementen des Frameworks - die Modellierung unterstützt werden und andererseits die Modelle zur weiteren Standardisierung von Produkten beitragen. Das in Kapitel 5 beschriebene Produktmodellierungs-Framework wird nachfolgend aufgegriffen und zur Modellierung von Baukästen in der Entwicklungspraxis angewendet. Dazu wird die Domänen-Ebene als Baukasten definiert. In Abbildung 6.1 sind hierzu diejenigen Felder eingezeichnet, die im Folgenden anhand der Fallbeispiele vorgestellt werden. Obwohl diese zum besseren Verständnis sequentiell vorgestellt werden, soll an dieser Stelle betont werden, dass sie in der Entwicklungspraxis parallel und stark iterativ modelliert werden müssen.

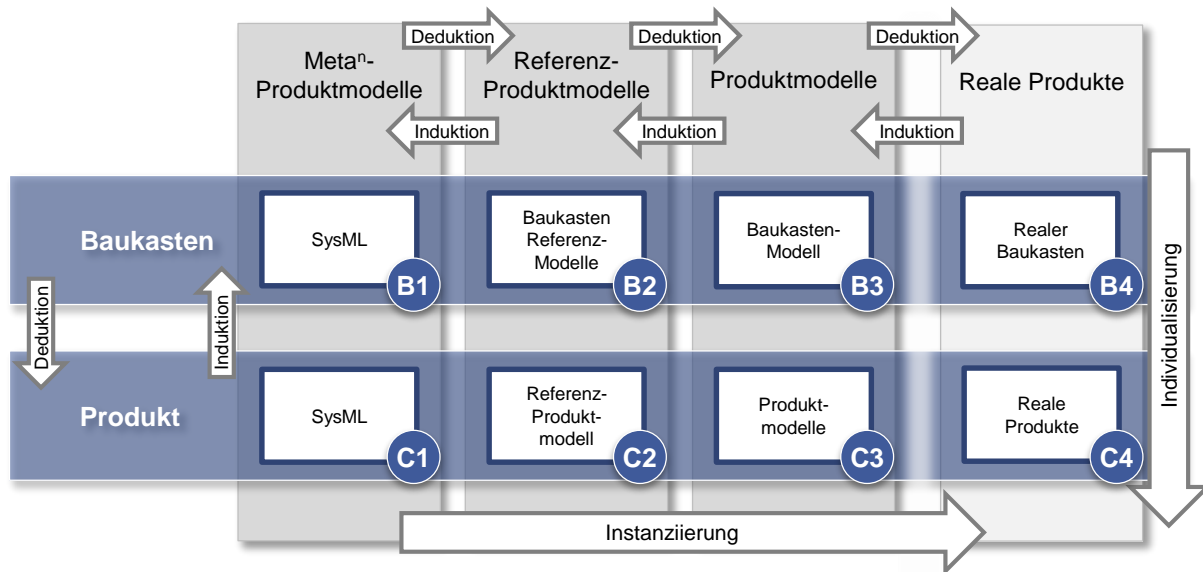


Abbildung 6.1: Produktmodellierungs-Framework im Kontext der Baukastenentwicklung³²⁹

Die Anwendung des Frameworks erfolgt an zwei Fallstudien, den Baukästen von Fahrzeugen und Portalkratern. Als Meta-Produktmodell (B1 & C1 in Abbildung 6.1) wird in beiden Fallstudien SysML verwendet.

6.1 Baukastenentwicklung am Beispiel von Gesamtfahrzeugen

Nachfolgend werden das Studiendesign und die Ergebnisse des Gesamtfahrzeug-Fallbeispiels vorgestellt. Durch die Studie soll das Konzept aus dem vorherigen Kapitel im Kontext von Gesamtfahrzeug-Entwicklungen evaluiert werden.

6.1.1 Studiendesign

Im Rahmen der in Kapitel 4.4 vorgestellten Fallstudie wurde neben der Analyse der Baukastenentwicklung auch ein SysML-Modell des Baukastens erstellt. Dazu wurde in einem iterativen Vorgehen die Produktentwicklung eines Fahrzeugs in der Frühen

³²⁹nach Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

Phase begleitet und die einzelnen Elemente des Produktmodellierungs-Frameworks erstellt.³³⁰

Zunächst wird auf die Erstellung von Referenz-Produktmodellen (B2 & C2 in Abbildung 6.1) in SysML auf Basis bestehender dokumentenzentrierter Referenz-Produktmodelle eingegangen. Anschließend werden hieraus sowohl Produkt- (C3) als auch Baukasten-Modelle (B3) abgeleitet. Dadurch wird aufgezeigt, wie mithilfe des Produktmodellierungs-Frameworks Baukästen und die dazugehörigen Produkte modelliert werden können.

6.1.2 Ergebnisse der Fallstudie

Wie in Kapitel 4.4.1 vorgestellt, werden die Produkte der Porsche AG in Produktgenerationen entwickelt. Dadurch können die bei der Analyse der Frühen Phase identifizierten Referenz-Produktmodelle (z. B. für das Zielsystem, Komponenten, Funktionen und Eigenschaften) in SysML überführt werden. Somit ist es möglich, aus den dokumentenzentrierten und unabhängigen Referenz-Produktmodellen ein konsistentes und verknüpftes Referenz-Produktmodell (C2) in SysML zu erstellen. In Abbildung 6.2 ist die Sicht des Referenz-Produktmodells auf Komponenten dargestellt. Dazu werden die identifizierten

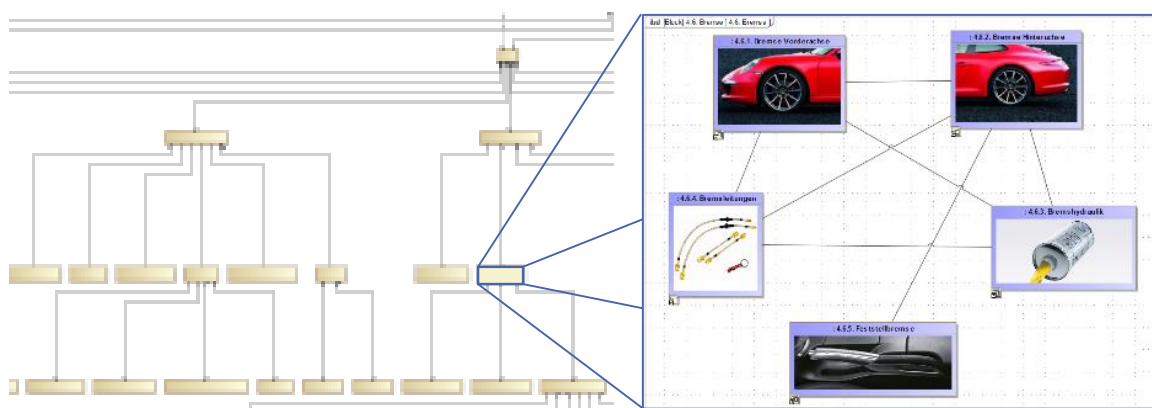


Abbildung 6.2: Komponenten-Sicht des Referenz-Produktmodells modelliert mit SysML: Auszug aus dem hierarchischen Konzept der Systemtheorie (links) und der Aufbereitung im strukturalen Konzept (rechts)³³¹

Elemente mithilfe des hierarchischen Konzepts der Systemtheorie in eine Baumstruktur überführt. Außerdem wird das strukturelle Konzept verwendet, um die Wechselwirkungen zwischen den Elementen zu modellieren. Um eine einfache Bedienbarkeit zu

³³⁰Die in Abschnitt 6.1 dargestellten Untersuchungen sind im Rahmen der Publikation Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015 veröffentlicht worden.

³³¹nach Kurowicki, 2013, betreute Abschlussarbeit, Bild Porsche AG

gewährleisten, können die Blöcke mit Bildern versehen und zusätzlich Verknüpfungen zwischen den Modellen eingefügt werden. Auf diese Weise wird ein schnellerer Wechsel zwischen verschiedenen Sichten und Diagrammen ermöglicht.

Analog kann die Sicht auf das Zielsystem des Referenz-Produktmodells (C2) dargestellt werden (vgl. Abb. 6.3). Exemplarisch ist ein Auszug von wiederkehrenden Zielen im strukturalen Konzept der Systemtheorie abgebildet. Diese können hierarchisch modelliert werden. So ist auf der ersten Gliederungsebene beispielsweise das Gewicht festgelegt und die dazugehörigen Teilziele wie die Gewichtsverteilung auf den Achsen auf tieferen Gliederungsebenen.

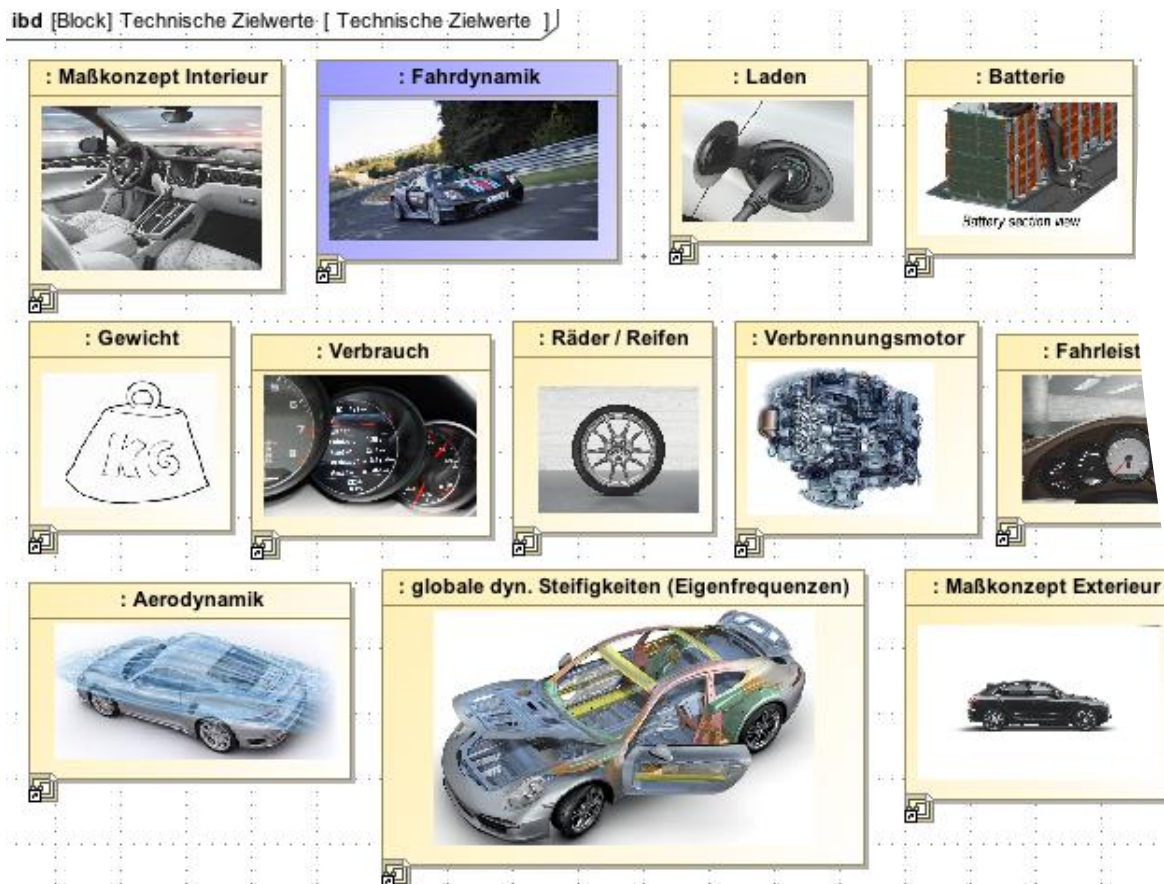


Abbildung 6.3: Erste Ebene der Zielsystem-Sicht des Referenz-Produktmodells im strukturalen Konzept der Systemtheorie modelliert mit SysML³³²

Dieses Referenz-Produktmodell eignet sich auch als Referenz-Modell für den Baukasten (B2). Der Informationsgehalt besitzt jedoch auf den unterschiedlichen Ebenen eine unterschiedliche Detaillierung. So können z. B. bei der Entwicklung eines Cabrios auf der Produktebene einzelne Komponenten des unbeweglichen Dachs des Coupés irrelevant sein, während beispielsweise bei einem konventionell angetriebenen Fahrzeug

³³²nach Rachenkova, 2014, betreute Abschlussarbeit, Bild Porsche AG

das Hybrid-Modul nicht zum Einsatz kommt. Somit kann das Baukasten Referenz-Modell (B2) als die Aggregation der Referenz-Produktmodelle (C2) verstanden werden. Gleichzeitig können die Informationen im Referenz-Produktmodell (C2) spezifischer sein. So kann z. B. beim Typ 911 im Referenz-Produktmodell (C2) zusätzlich beschrieben werden, dass sich der Motor hinten befindet, während abhängig vom Baukasten im Baukasten Referenz-Modell (B2) sowohl ein Heck- als auch ein Mittelmotor vorgesehen sein kann. Mithilfe des Baukasten Referenz-Modells (B2) kann folglich das Regelwerk des Baukastens beschrieben werden. Dadurch kann auf dieser Ebene modelliert werden, in welcher Bandbreite sich beispielsweise das Gewicht der Produkte bewegt, welche Schnittstellen zwischen den Komponenten notwendig sind oder welche Motorlagen vorgesehen sind. Produkte, die nicht diesem Regelwerk folgen, können zwar Elemente des Baukastens verwenden, basieren aber nicht auf diesem. Darüber hinaus können einzelne Elemente produktspezifisch sein und nicht im Baukasten vorgesehen werden, um eine Differenzierung der Produkte zu ermöglichen. So bietet es sich beispielsweise an, für den Endkunden sichtbare Komponenten zu differenzieren. Im SysML-Modell wird dies dadurch abgebildet, dass keine Relation zwischen den Komponenten und dem Baukastenmodell eingeführt wird.

Auf Basis der Referenz-Produktmodelle (C2) können effizient Produktmodelle (C3) erstellt werden. Dazu können Ausprägungen des Referenz-Produktmodells (C2) definiert werden. So können beispielsweise für das Element „Motor“ des Referenz-Produktmodells (C2) Ausprägungen definiert werden: z. B. „V6“ und „V8“. Diese können anschließend unterschiedlichen Produkten zugeordnet werden.

Zur Darstellung wird eine Abhängigkeitsmatrix verwendet, die in dem verwendeten SysML-Werkzeug MagicDraw implementiert ist. Eine Matrix-Darstellung kann Relationen der Modellelemente abbilden. Die Modellelemente können vom Benutzer in Zeilen und Spalten festgelegt werden. Für die Darstellung werden Elemente des Referenz-Produktmodells (z. B. Motor) sowie die dazugehörigen Instanzen (z. B. „V6“ und „V8“) in den Zeilen und die Fahrzeuge in Spalten abgebildet. Relationen werden in der Matrix mit Pfeilen dargestellt. Dies verdeutlicht, dass ein konkreter Motor in einem spezifischen Fahrzeug zum Einsatz kommt. Durch Zuklappen der Struktur wird die Anzahl der Relationen aufsummiert, wodurch systematische Analysen ermöglicht werden. So ist in diesem Beispiel ersichtlich, wie häufig eine Komponente im Baukasten zum Einsatz kommt. In Abbildung 6.4 ist exemplarisch ein Auszug des Referenz-Produktmodells (C2) und einzelner Motoren abgebildet sowie die Zuordnung zu Produkten.

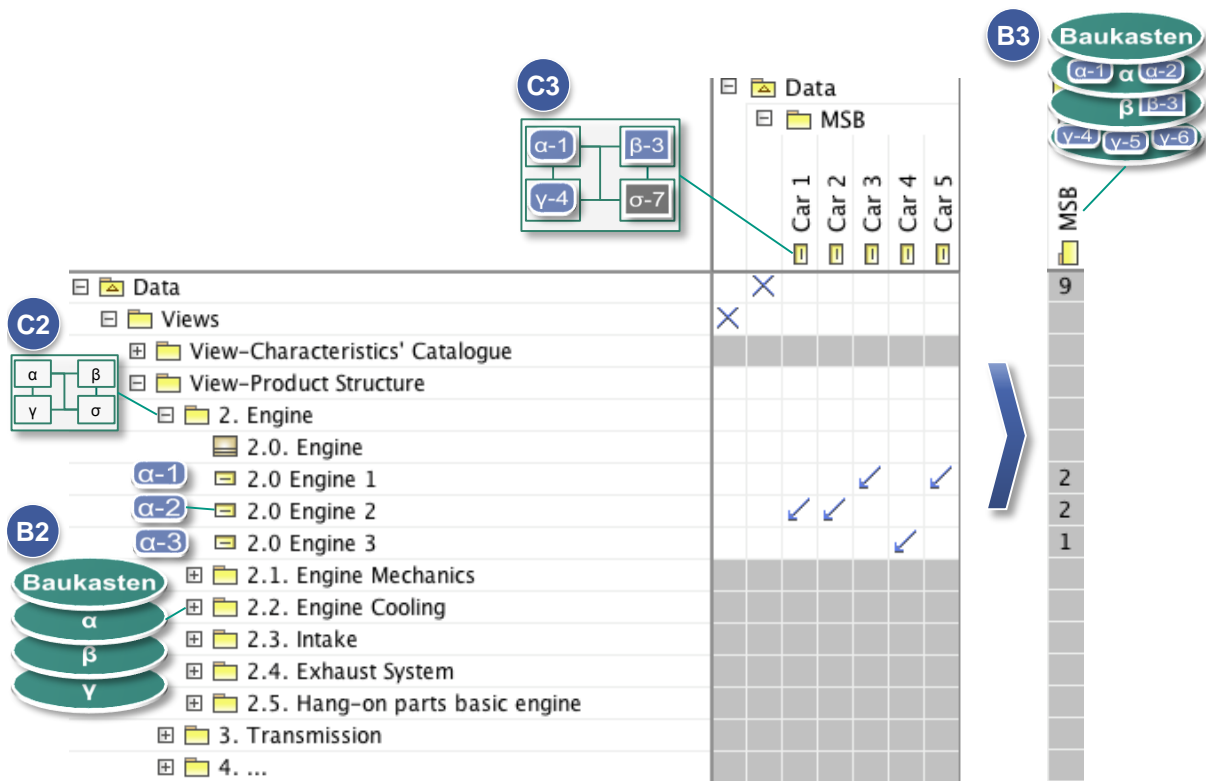


Abbildung 6.4: Darstellung der Referenz-Produktmodelle, der Produkte und des Baukastens mit SysML³³³

Durch die Abhängigkeitsmatrix wird eine zügige Zuordnung ermöglicht, die notwendig ist, um in einem moderierten Workshop die Modellierung mit Entwicklern durchführen zu können. Durch die konsequente Verwendung der Vorgehensweise über mehrere Produktgenerationen hinweg bietet der Ansatz Potentiale zum effizienten Einsatz, da große Teile aus vorherigen Produktgenerationen übernommen werden können und nicht erneut modelliert werden müssen. Durch das konsistente Baukasten- und Produktmodell können spezifische Sichten ausgeleitet und mit den entsprechenden Experten diskutiert werden. So ist es beispielsweise möglich zu betrachten, in welchen Produkten ein Modul zum Einsatz kommt oder welche Module in einem Produkt verwendet werden. Hier liegt ein wesentlicher Vorteil der Modellierung mit SysML, so können verschiedene Elemente des Gesamtmodells miteinander vernetzt werden. Dies ist in einer dokumentenzentrierten Produktentwicklung keine triviale Aufgabe, da häufig schon die einzelnen Bezeichnungen der Module bzw. Elemente des Referenz-Produktmodells nicht konsistent sind. Durch ein konsistentes Modell und verschiedene Sichten auf den Baukasten, die Produkte und die Bausteine können verschiedene Fachbereiche eingebunden werden. Auf diese Weise wird ein Beitrag dazu geleistet, bei den beteiligten Stakeholdern ein gemeinsames Verständnis für den Baukasten und die Produkte zu erzeugen. So kann für den Modulentwickler transparent in wel-

³³³nach Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

chen Fahrzeugen ein Modul bereits verwendet wird und für welche es geplant ist. Der Fahrzeugverantwortliche kann eine Sicht erzeugen, die darstellt, welche Bauteile im Fahrzeug verwendet werden. Der Verantwortliche für den Baukasten kann durch das Referenz-Produktmodell analysieren, wie viele Varianten bestehen und durch die Verknüpfung zum Zielsystem Potentiale zur Variantenreduktion identifizieren. Dies wird exemplarisch im nächsten Fallbeispiel vorgestellt.

6.2 Analyse von Standardisierungspotentialen am Beispiel von Portalkratern

Massenschüttgüter werden zwischen ihrer Gewinnung und Verarbeitung meist zwischengelagert. Durch die Lagerplätze als Materialpuffer und Mischlager können Quantitäts- und Qualitätsschwankungen des Rohmaterials ausgeglichen werden. Zum Aufhalten und Rückladen kommen diverse Portalkrater wie z. B. Vollportalkrater und Brückenkrater zum Einsatz; diese sind in Abbildung 6.5 dargestellt.



Abbildung 6.5: Portalkrater in der Zentralkokerei Saar³³⁴

Zur Analyse der Ausgangssituation sollen bestehende Portalkrater, die von der Firma ThyssenKrupp entwickelt wurden, mithilfe des Produktmodellierungs-Frameworks in SysML modelliert und in ein Baukasten-Modell überführt werden. Dadurch sollen

³³⁴Bild ThyssenKrupp Industrial Solutions AG, nach Schmitt, 2015, betreute Abschlussarbeit

langfristig Potentiale zur Modularisierung bei der Entwicklung neuer Portalkratzer gewonnen werden.³³⁵

6.2.1 Studiendesign

Im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit wurde eine 6 Monate andauernde teilnehmenden Beobachtung durchgeführt und vom Verfasser der vorliegenden Arbeit begleitet.³³⁶ Ziel war die Anwendung des Frameworks zur Modellierung unterschiedlicher Portalkratzer mithilfe von SysML. Die Abschlussarbeit wurde in Kooperation mit der ThyssenKrupp Industrial Solutions AG durchgeführt. Dadurch ist es möglich, einen detaillierten Einblick in eine zweite Branche zu erhalten und die Übertragbarkeit des Ansatzes zu überprüfen.

Bei Portalkratzern handelt es sich um Investitionsgüter. Sie werden in sehr geringen Stückzahlen entwickelt. Eine Individualität der Produkte ist in der Branche üblich, da sie meist in bestehende Gesamtanlagen integriert werden. Dadurch können detaillierte Ziele, Anforderungen und Randbedingungen zu Beginn der Entwicklung eines neuen Produktes durch den Kunden genannt werden. Portalkratzer können ebenfalls mit dem Ansatz der Produktgenerationsentwicklung beschrieben werden, da sowohl häufig direkte Vorgängerprodukte als auch bestehende Portalkratzer als Referenzprodukte zur Entwicklung eines neuen Produktes herangezogen werden.

Anhand des Frameworks werden reale Produkte (C4) und deren Dokumentation analysiert und entsprechende Produktmodelle (C3 in Abbildung 6.1) abgeleitet. Diese werden in ein Referenz-Produktmodell (C2) überführt und anschließend mit weiteren Produktmodellen (C3) erweitert. Dabei wird das Referenz-Produktmodell (C2) iterativ erweitert und angepasst. So entsteht ein übergreifendes Referenzmodell (B2) sowie die Gesamtheit der Produktmodelle (B3). Das entstehende SysML-Modell kann genutzt werden, um die Variantenvielfalt zu betrachten und Synergiepotentiale für einen Baukasten zu ermitteln.

³³⁵Die in Kapitel 6.2 dargestellten Ergebnisse werden im Rahmen der Publikation Bursac, Albers & Schmitt, 2016 (eingereicht) veröffentlicht.

³³⁶Schmitt, 2015, betreute Abschlussarbeit

6.2.2 Ergebnisse des Fallbeispiels

Auf Basis eines bestehenden Vollportalkraters (C4) wird ein Produktmodell (C3) mit diversen Elementen erstellt, wie z. B. dem Systemumfeld, den Zielen, Anforderungen und Randbedingungen sowie den Funktionen und Komponenten. Die Wechselbeziehungen der Elemente können ebenfalls modelliert werden. Diese sind in Anlehnung an ZINGEL exemplarisch in Abbildung 6.6 dargestellt.³³⁷

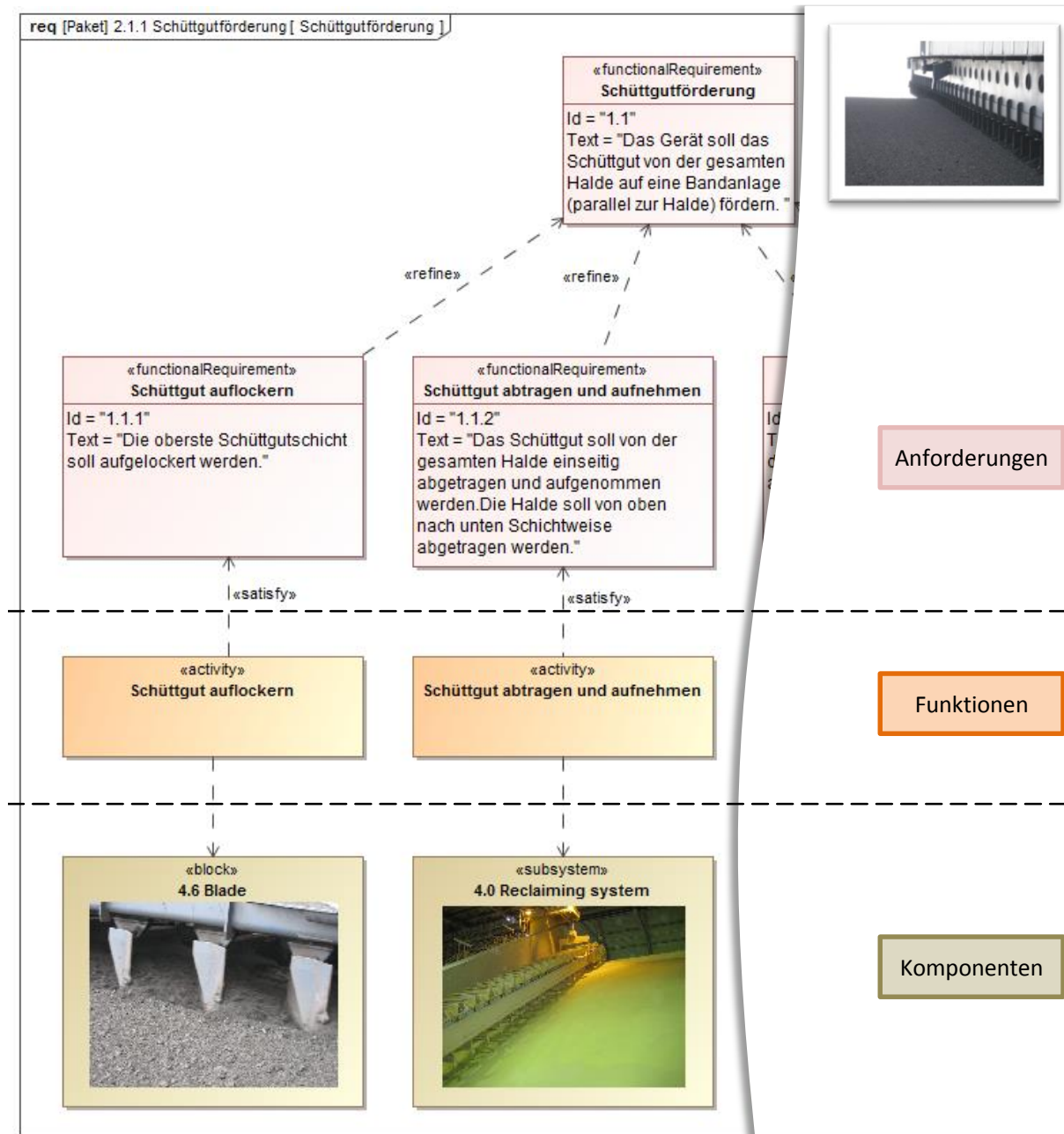


Abbildung 6.6: Abhängigkeit von Anforderungen, Funktionen und Komponenten³³⁸

³³⁷Vgl. Kapitel 2.1.3 und Zingel, 2013.

Die Informationen werden aus CAD-Daten und zahlreichen Dokumenten (z. B. Pflichten- und Lastenheften) analysiert und in ein konsistentes und modellbasiertes Produktmodell (C3) übertragen. Auf dessen Basis kann ein Referenz-Produktmodell (C2) abgeleitet werden, mit welchem wiederum effizient weitere Vollportalkratzer in das SysML-Modell überführt werden. Hierbei wird das Referenz-Produktmodell (C2) iterativ angepasst und in ein Baukasten Referenz-Modell (B2) überführt. Die Elemente, ihre Merkmale und Abhängigkeiten werden im Referenz-Baukastenmodell hinterlegt. Diese konkreten Werte werden in den Instanzen eines Blocks hinterlegt. Dadurch kann anschließend beispielsweise die Gesamtheit der Kratzerschaufeln (B3) visualisiert werden (vgl. Abb. 6.7).

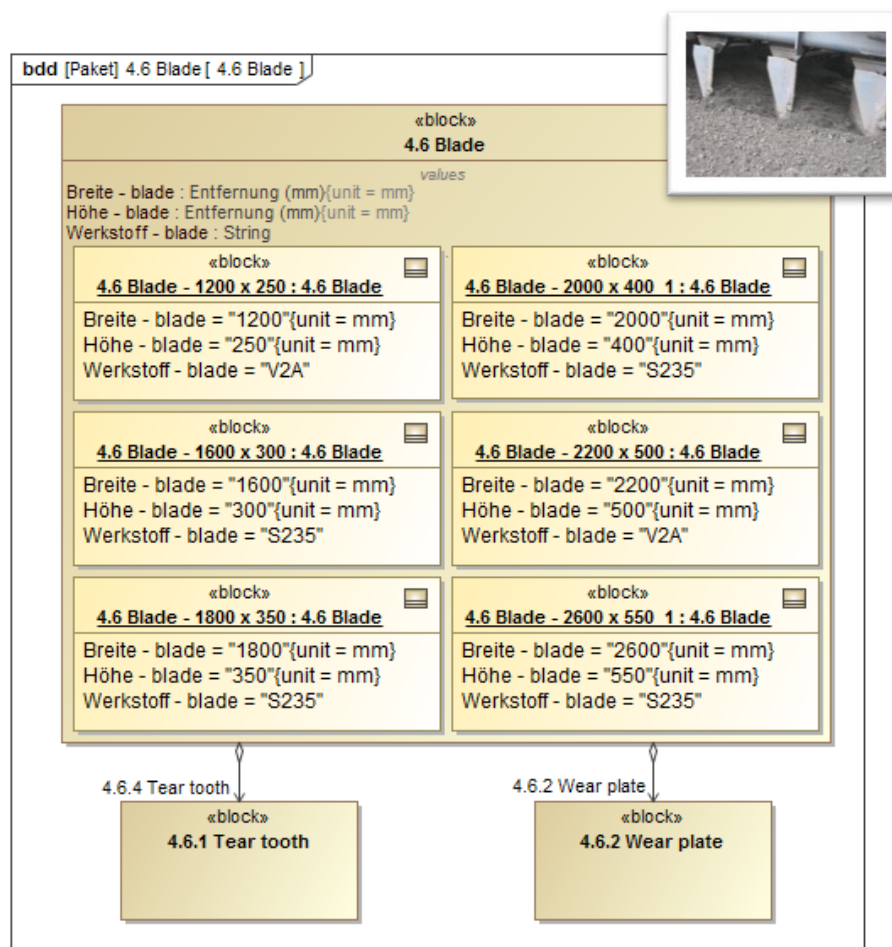


Abbildung 6.7: Referenz-Produktmodell der Kratzerschaufel mit unterschiedlichen Ausprägungen³³⁹

Aufgrund zahlreicher Ausprägungen und Verknüpfungen bietet es sich an, zu Gunsten der Übersichtlichkeit, die matrixbasierte Darstellungsform zu wählen. Das erstellte

³³⁸nach Schmitt, 2015, betreute Abschlussarbeit und Zingel, 2013; Bild ThyssenKrupp Industrial Solutions AG

³³⁹nach Schmitt, 2015, betreute Abschlussarbeit; Bild ThyssenKrupp Industrial Solutions AG

Modell kann für diverse Analysen genutzt werden. Dazu können z. B. in den Zeilen alle Instanzen einer Komponente aufgetragen werden (hier: Kratzerschaufeln) und in den Spalten alle Portalkrater. So wird in Abbildung 6.8 ersichtlich, dass die unterschiedlichen Kratzerschaufeln weitestgehend für jede Maschine individuell entwickelt werden.

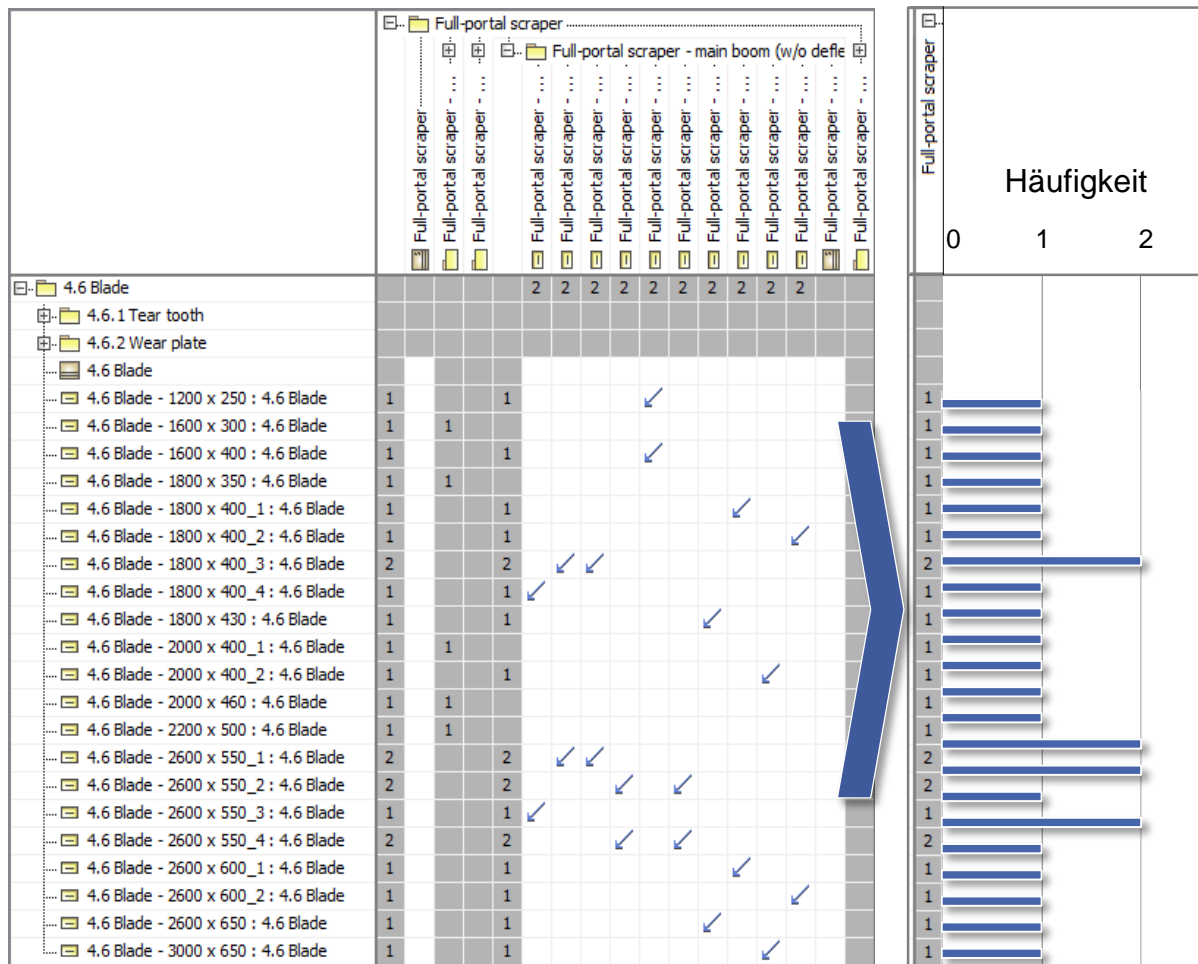


Abbildung 6.8: Matrixbasierte Darstellung der Kratzerschaufeln über die Produkte (links) und Häufigkeitsverteilung der Schaufeln (rechts)³⁴⁰

Trägt man in einem zweiten Schritt die zuvor modellierten Ziele, Anforderungen und Randbedingungen in die Zeilen ein, kann effizient die untersucht werden, wie häufig unterschiedliche Anforderungen auftreten. Wie in Abbildung 6.9 exemplarisch dargestellt, ist die Varianz der Anforderungen für die einzelnen Maschinen sehr inhomogen.

³⁴⁰nach Schmitt, 2015, betreute Abschlussarbeit

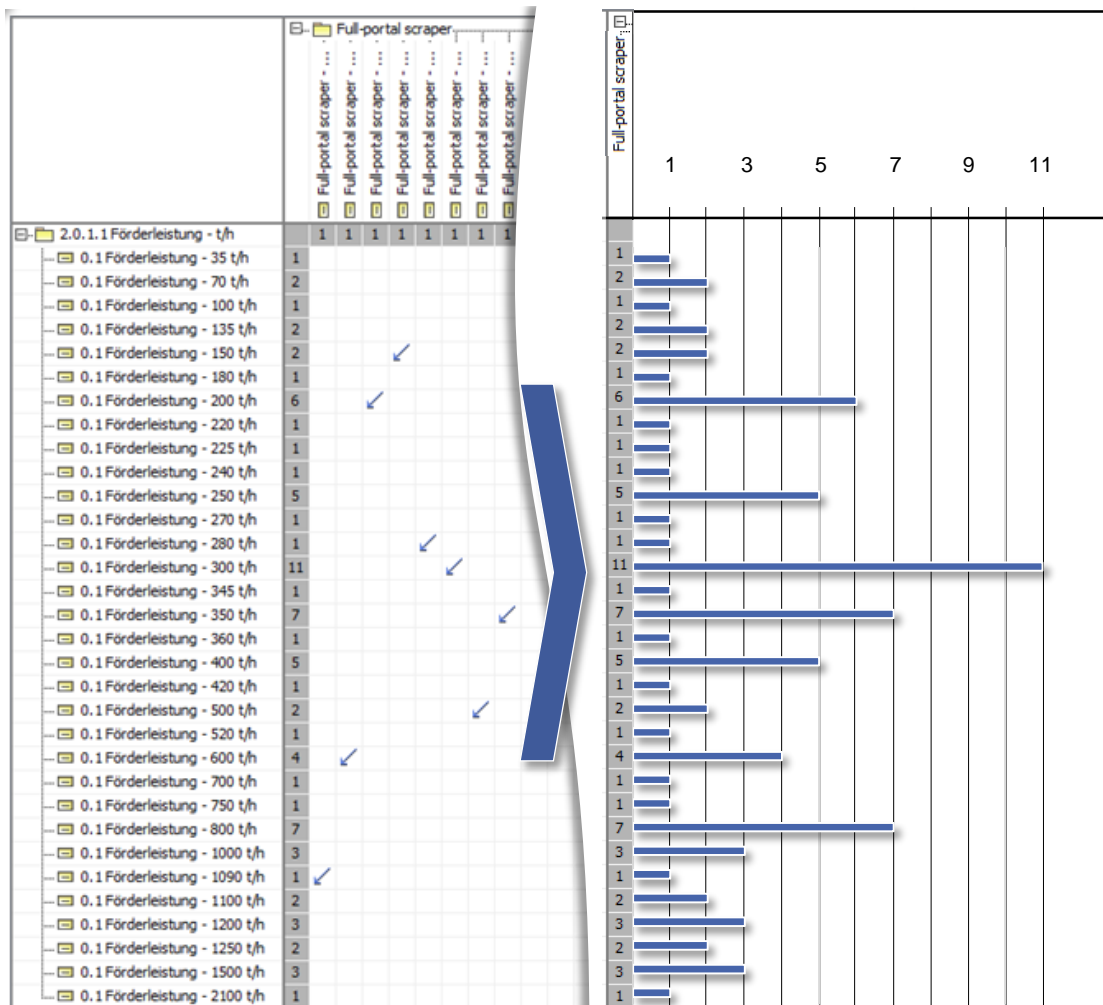


Abbildung 6.9: Matrixbasierte Darstellung der Förderleistung über die Produkte (links) und Häufigkeitsverteilung der Förderleistung (rechts)³⁴¹

Es wird jedoch ersichtlich, dass sich einzelne Förderleistungen häufiger wiederholen als die dazugehörigen Kratzerschaufeln. Da eine Komponente durch eine Vielzahl von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen beeinflusst wird, sind unterschiedliche Analysen notwendig, die iterativ durchgeführt werden müssen. Eine solche Analyse kann als Basis dienen, um genauer zu identifizieren, welche Baugruppen standardisiert werden können. So kann beispielsweise im nächsten Schritt untersucht werden, ob die große Varianz der Kratzerschaufeln auf eine vorgegebene Anzahl an Modulen reduziert werden kann.

Dabei kann anhand des fraktalen Charakters beschrieben werden, dass beispielsweise die Kratzerschaufeln modular aufgebaut werden können, während sich diese wiederum auf Basis einer Plattformbauweise zusammensetzen. Der Hut kann zusätzlich einer Baureihe folgen. So können auf unterschiedlichen Systemebenen verschiedene Standardisierungsmethoden eingesetzt werden. Die Ergebnisse können anschließend

³⁴¹nach Schmitt, 2015, betreute Abschlussarbeit

wiederum in das SysML-Modell integriert werden und dadurch ein konsistenter Baukasten abgebildet werden.

Gerade bei den stark iterativen Entwicklungsprozessen bietet dieser Ansatz Potentiale, da das Modell in sich konsistent ist und die Auswertungen anschließend spezifisch ausgeleitet werden können. Im Gegensatz führt die dokumentenzentrierte Modellierung dazu, dass für neue Auswertungen diverse Dokumente (wie z. B. Pflichtenhefte) erneut gesichtet werden müssen. Insbesondere bei der iterativen Produktentwicklung ist zu Beginn nicht absehbar, welche Aspekte relevant sein werden. Um den Mehraufwand durch die Modellierung mit SysML rechtfertigen zu können, wird eine konsequente Verwendung der Produktgenerationsentwicklung notwendig sein. Erst durch die Nutzung von Referenz-Produktmodellen (C2) und den bereits modellierten Komponenten aus vorherigen Produktgenerationen (B3), wird der Aufwand ausreichend abgesenkt.

6.3 Fazit

Die zweite empirische Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, das abgeleitete Produktmodellierungs-Framework durch die Modellierung von Baukästen in der Entwicklungspraxis anzuwenden. Dazu wurden folgende Teilfragen betrachtet:

- 3.1 Wie können mithilfe des Produktmodellierungs-Frameworks Baukästen auf Basis des MBSE unterstützt werden?
- 3.2 Wie kann die Modellierung zur Identifikation von Standardisierungsmöglichkeiten beitragen?

Dazu wurden die einzelnen Elemente des Frameworks in Abbildung 6.10 in zwei verschiedenen Fallbeispielen angewendet.

In beiden Fallstudien wurde SysML als derzeit stark verbreitetes Meta-Produktmodell des MBSE verwendet. Aufbauend darauf konnten bestehende Referenz-Produktmodelle am Fallbeispiel des Gesamtfahrzeugs herangezogen werden. Im Fallbeispiel des Portalkratzers hingegen konnten keine bestehenden Referenz-Produktmodelle bei der Dokumentenanalyse gefunden werden. Diese wurden daher auf Basis vorheriger Produktgenerationen entwickelt. Mithilfe der Referenz-Produktmodelle war es möglich, sowohl

³⁴²Bild Porsche AG

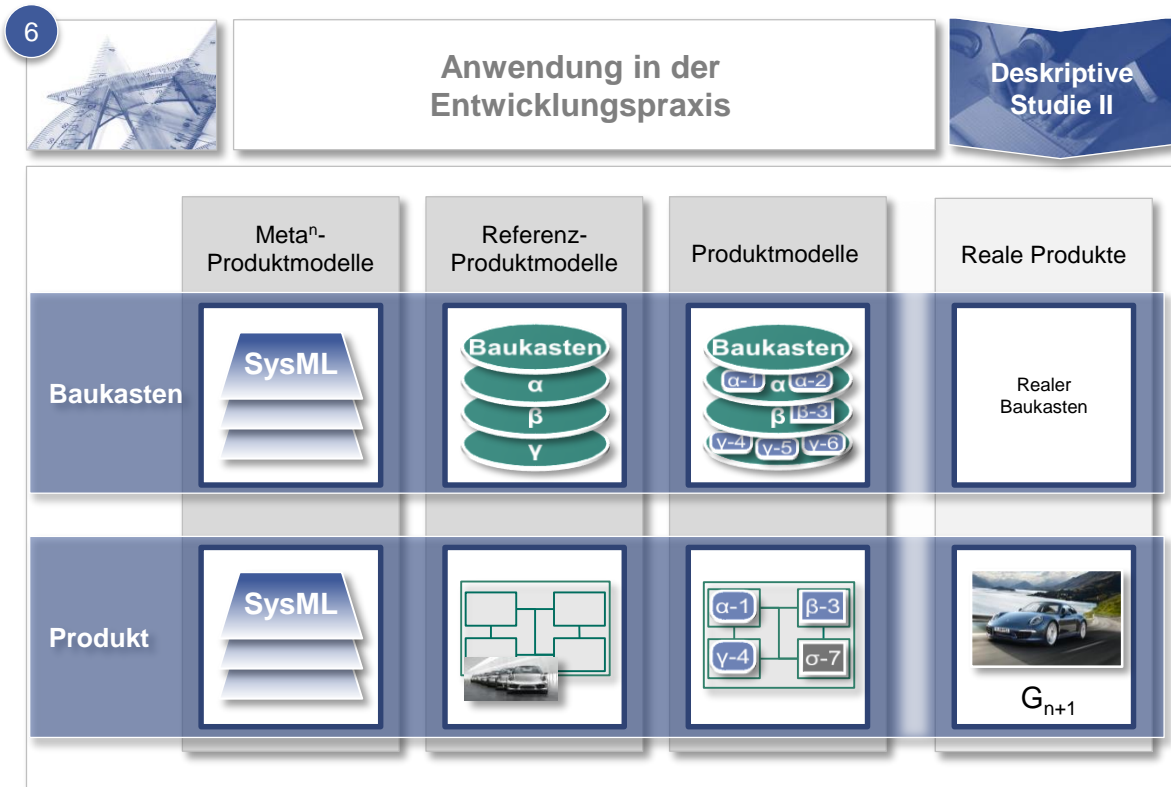


Abbildung 6.10: Evaluation des Frameworks in der Entwicklungspraxis³⁴²

das Baukastenmodell zu erstellen als auch effizient Produktmodelle auszuleiten. Dadurch konnten konsistente Modelle des Baukastens und der einzelnen Produkte matrixbasiert dargestellt werden.

Auf Basis der konsistenten Modelle können Analysen erstellt werden, um Hinweise zu bekommen, welche Standardisierungsmöglichkeiten sich anbieten. Vor allem in der stark iterativen Frühen Phase der Produktentwicklung können auf diese Weise effizient neue Analysen durchgeführt werden, da die Informationen in einem konsistenten Modell und nicht in vereinzelt Produktmodellen (wie z. B. Lastenheften) unabhängig dargestellt sind. Auf diese Weise kann ein Beitrag dazu geleistet werden, die abstrakte Sprache der SysML in der Entwicklungspraxis nutzbar zu machen. Der dafür notwendige Mehraufwand kann gerechtfertigt werden, wenn über mehrere Produktgenerationen hinweg ein konsistentes Modell erstellt und weiterentwickelt wird. So können für Folgegenerationen die Referenz-Produktmodelle sowie die übernommenen Komponenten wiederverwendet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zunächst werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst. Anschließend wird im Ausblick zu weiterführenden Forschungsarbeiten, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen, angeregt.

7.1 Zusammenfassung

Mit Standardisierungsmethoden wird das Ziel verfolgt, den Übernahmevariationsanteil neuer Produktgenerationen zu steigern. Dafür eignet sich die Entwicklung von Baukästen, Modulen, Plattformen und Baureihen. Neben dem Nutzen von Synergiepotentialen führt die Entwicklung von Baukästen allerdings auch zu einer nachhaltigen Erhöhung der Entwicklungskomplexität.

Die Komplexitätssteigerung ist darauf zurückzuführen, dass die gleichen Bausteine in unterschiedlichen Produkten zum Einsatz kommen und somit zusätzliche Wechselwirkungen entstehen. Hinzu kommt, dass durch einen zeitlichen Versatz die Dynamik des Systems steigt und damit auch die Unsicherheit in der Produktentwicklung - speziell in der Frühen Phase.

Dies erfordert, dass die Entwicklung von Baukästen als Aktivität im Sinne des iPeM während der Entwicklung neuer Produktgenerationen erfolgt. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

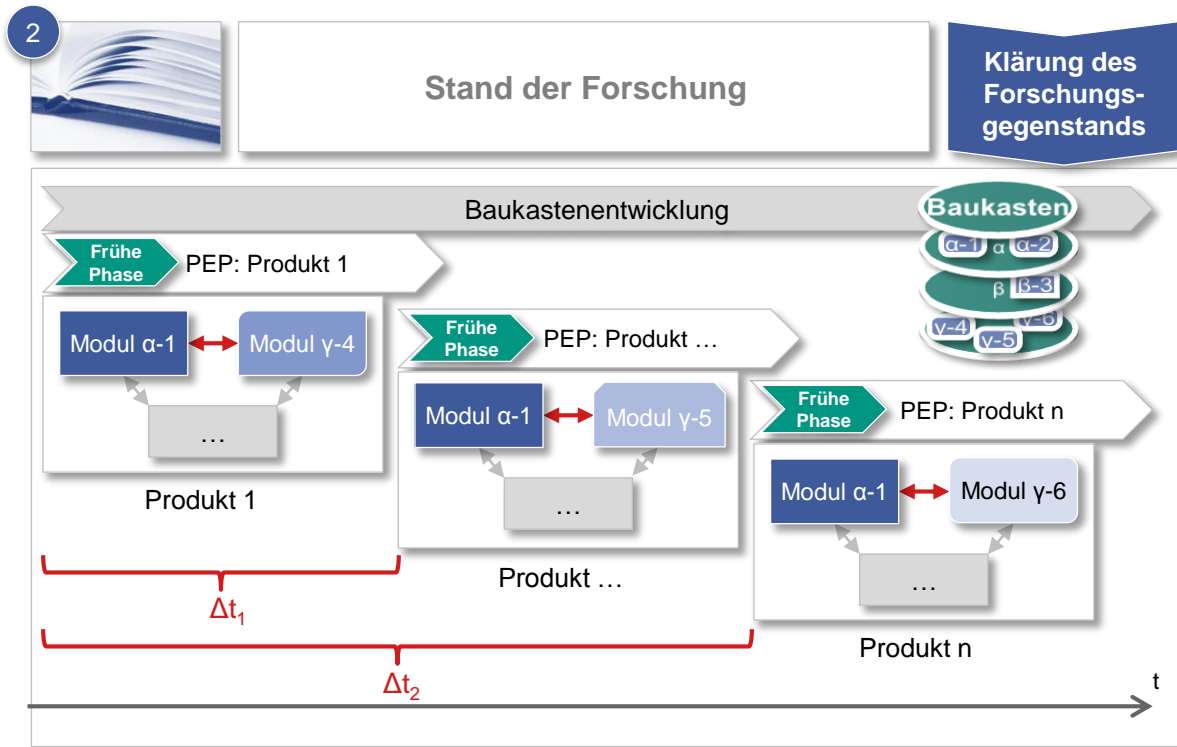


Abbildung 7.1: Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

Ein Ansatz zur Reduktion der Unsicherheit ist ein iteratives Vorgehen, wobei neben dem Objektsystem auch das Zielsystem kontinuierlich entwickelt wird. Um die wesentlichen Elemente von Ziel- und Objektsystem von Baukästen und den darauf basierenden Produkten durchgängig modellieren zu können, bietet sich das MBSE an. Die Erstellung der Modelle ist allerdings noch relativ abstrakt und zeitaufwändig. Daher wird die Zielsetzung der Arbeit wie folgt abgeleitet.

Ziel der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, die Baukastenentwicklung durch das MBSE im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu unterstützen. Dazu soll untersucht werden, wie Informationen aus vorherigen Produktgenerationen dazu beitragen können, Baukästen und die darauf basierenden Produkte effizient zu modellieren.

Zur Operationalisierung des Forschungsziels werden nachfolgende Forschungsfragen formuliert.

1. Wie werden in der Entwicklungspraxis Produktmodelle für die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung effizient erstellt und verwaltet?

2. Wie können Informationen aus vorherigen Produktgenerationen genutzt werden, um die Modellierung von Baukästen und Produkten in der Frühen Phase effizient zu gestalten?
3. Wie kann durch die Modellierung nach dem MBSE-Ansatz die Baukastenentwicklung und die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützt werden?

Als Vorgehensweise wird einerseits die „Spiral of Applied Research“ verwendet, um die vorliegende Arbeit in einen größeren Forschungskontext einzuordnen und andererseits die DRM, um die Vorgehensweise zu planen.

Im Rahmen einer Vorstudie werden zunächst die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Annahmen durch Experten aus der Entwicklungspraxis bestätigt. Anschließend wird im Rahmen der deskriptiven Studie untersucht, wie Produktmodelle in realen PEPs effizient erstellt und verwaltet werden. Dazu werden drei Studien durchgeführt, die in Abbildung 7.2 skizziert sind.

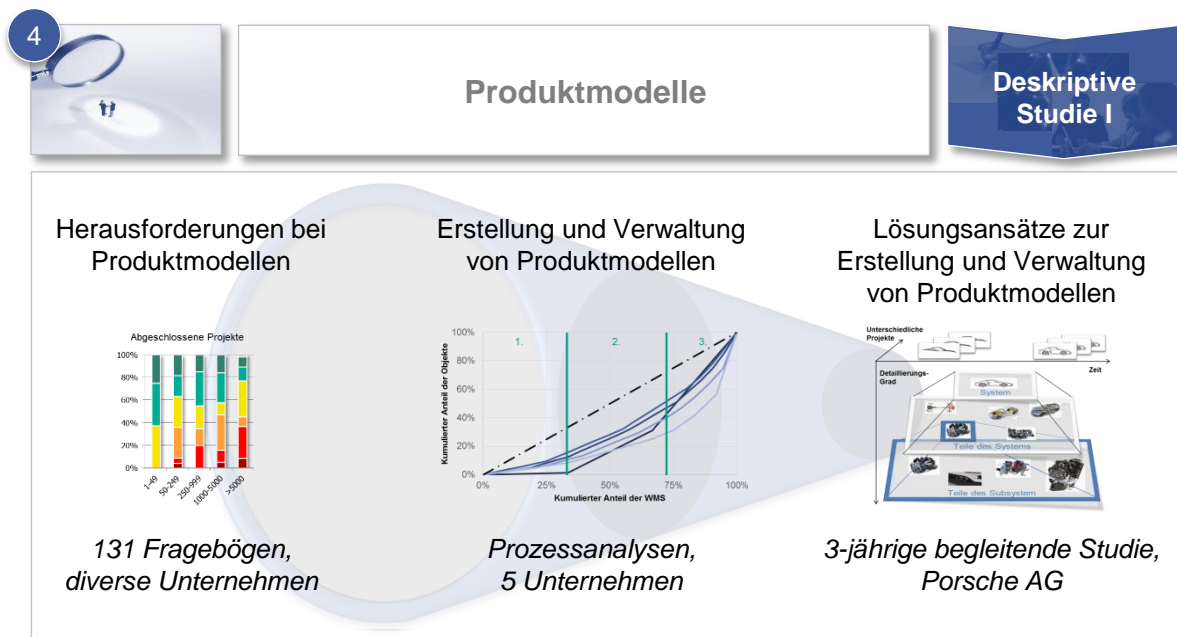


Abbildung 7.2: Drei empirische Studien der Deskriptiven Studie I

Die Ergebnisse einer Fragebogenstudie belegen einerseits den Ansatz der Produktgenerationsentwicklung und andererseits untermauern sie, dass Produktmodelle häufig dokumentenzentriert erstellt werden. Dabei geben 75 % der Befragten von großen Unternehmen (>5000 MA) an, dass sie keinen guten Überblick über vergangene Projekte besitzen. Mit einer auf dem iPcM basierenden Modellierungstechnik werden 5 Entwicklungsprozesse retrospektiv im Detail untersucht. Durch die Prozess-

analyse wird deutlich, dass eine Vielzahl von WMS genutzt werden, um Produktmodelle zu erstellen und zu verwalten. Dabei kann es aufgrund von redundanten Daten zu inkonsistenten Modellen führen. Eine dreijährige teilnehmende Beobachtung in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung ist Gegenstand der dritten Studie. Hierbei wird deutlich, dass auf Basis vorheriger Produktgenerationen Referenz-Produktmodelle definiert werden können. Diese dienen einerseits als Möglichkeit unterschiedliche WMS miteinander zu verbinden und andererseits als Wissensbasis, die in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung projektspezifisch detailliert werden kann.

Auf Basis des iPeM und der Ergebnisse wird in der präskriptiven Studie ein Produktmodellierungs-Framework abgeleitet. Dieses besteht aus 12 Feldern und ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

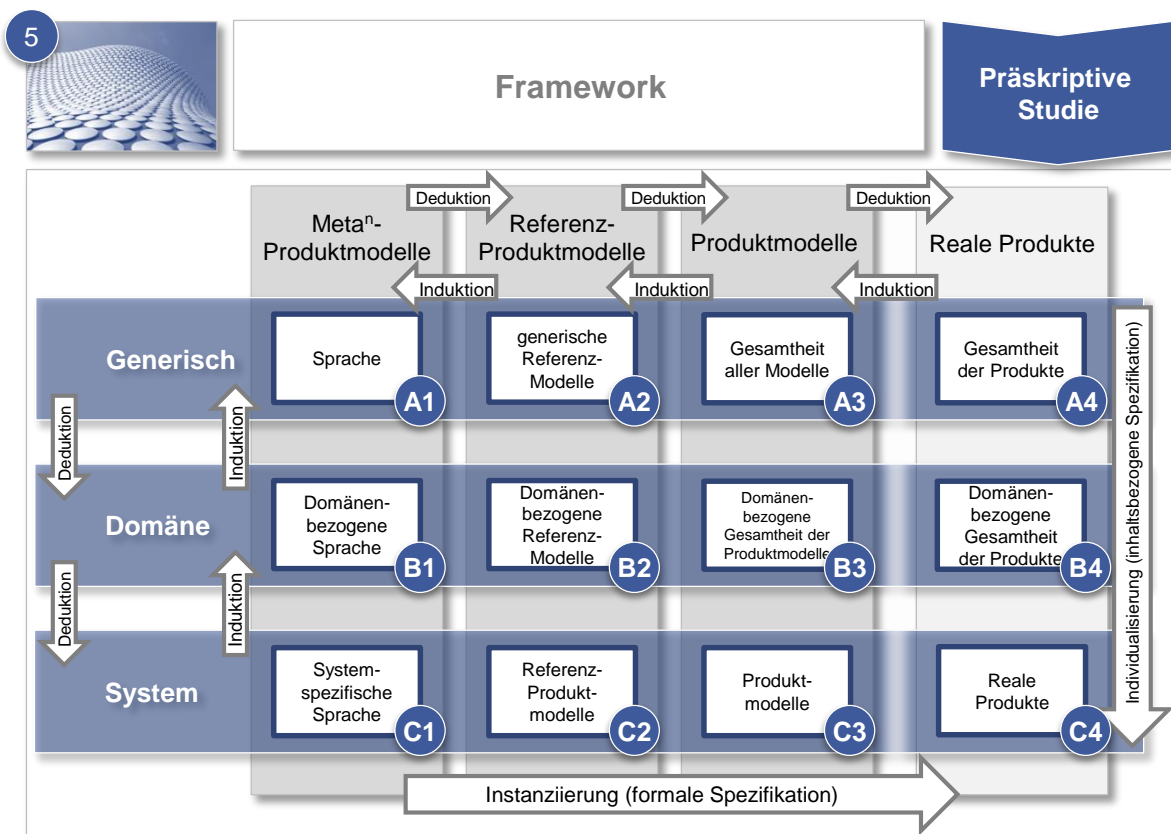


Abbildung 7.3: Produktmodellierungs-Framework

Die einzelnen Felder des Produktmodellierungs-Frameworks werden beschrieben und es wird erklärt, wie mithilfe von Induktion und Deduktion ein Übergang von der abstrakten Sprache zu einer konkreten Anwendung hergestellt werden kann. Dabei werden die Referenz-Produktmodelle aufgegriffen und es wird erklärt, wie diese dazu beitragen können, eine Wissensbasis für neue Produktgenerationen zu schaffen und in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung als eine Checkliste zu fungieren. Das

Produktmodellierungs-Framework kann darüber hinaus verwendet werden, um zu erklären, wie die Elemente der Baukastenentwicklung zusammenhängen. Auf diese Weise können bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen die Modelle so verknüpft werden, dass bestehende Module effizient für die Modellierung verwendet werden können. Die Modelle dienen dazu, die Wechselwirkungen zwischen den Produkten und dem Baukasten transparent darzustellen. Darüber hinaus kann auf ihrer Basis ein gemeinsames Verständnis bei den Entwicklern erzeugt werden.

Die baukastenspezifische Ausprägung des Produktmodellierungs-Frameworks dient in Kapitel 6 als Grundlage für die Erstellung von durchgängigen Baukasten- und Produktmodellen (vgl. Abb. 7.4). Anhand von zwei Fallstudien werden in der Entwicklungspraxis Produktmodelle erstellt.

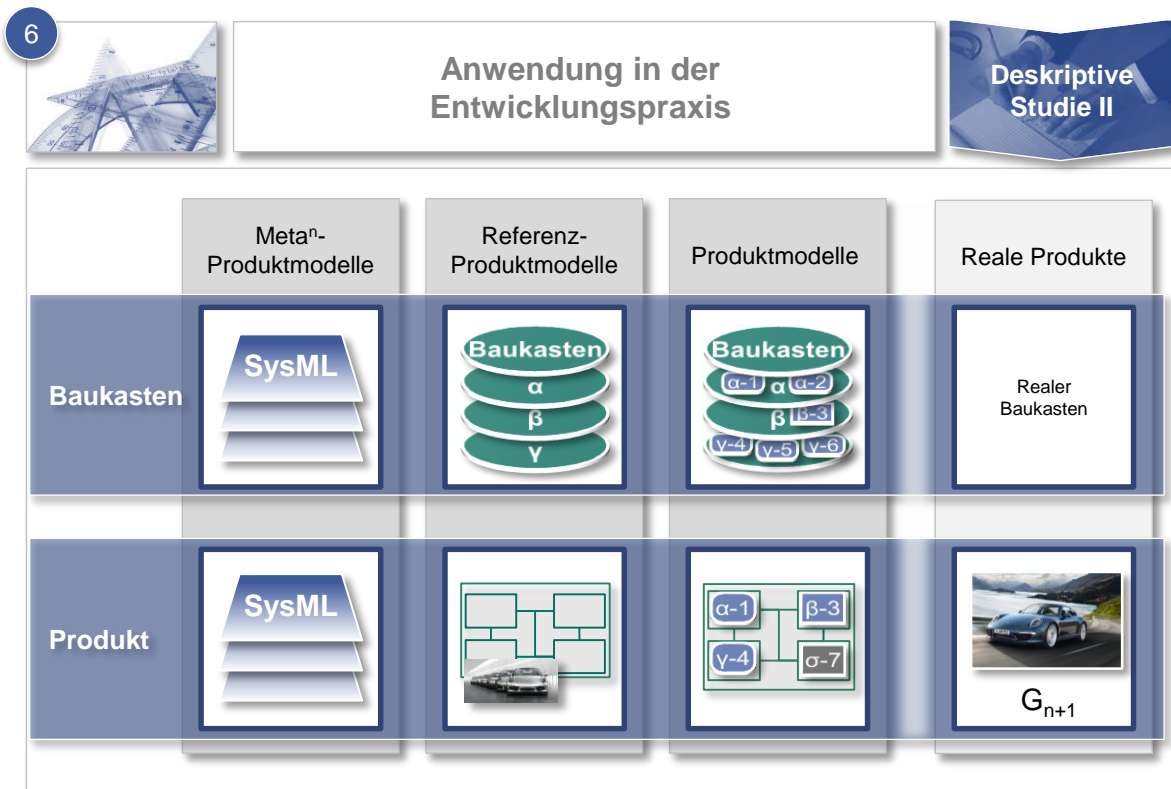


Abbildung 7.4: Evaluation des Produktmodellierungs-Frameworks in der Entwicklungspraxis³⁴³

SysML wird in beiden Fallstudien als Meta-Produktmodell verwendet. In der ersten Studie werden Gesamtfahrzeuge und der dazugehörige Baukasten modelliert. Dabei dienen zuvor identifizierte Referenz-Produktmodelle als Grundlage der Modellierung. Darauf aufbauend werden Produkt- und Baukastenmodelle erstellt. Durch eine matrixbasierte Darstellung können anschließend effizient neue Produktgenerationen abgebildet

³⁴³Bild Porsche AG

det werden, da übernommene Subsysteme durch Hinzufügen einer Relation modelliert werden können. Durch die Modellierung mithilfe von SysML entstehen konsistente Modelle des Baukastens und der einzelnen Produkte, die in einzelnen Sichten dargestellt werden können. In der zweiten Studie werden Portalkratzer analysiert, um Synergiepotentiale zu identifizieren. Das auf Basis von diversen Modellen (Pflichtenheften, CAD-Modellen, etc.) entstandene SysML-Modell kann genutzt werden, um situationsspezifisch Auswertungen zu erstellen und dadurch Standardisierungspotentiale zu identifizieren. So können beispielsweise Analysen durchgeführt werden, um zu identifizieren wie groß die Varianz einzelner Bauteile und die dazugehörige Varianz der Ziele, Anforderungen und Randbedingungen ist. Dies bietet bei den iterativen Entwicklungsprozessen Potentiale, da zu Beginn nicht ersichtlich ist, welche Auswertungen notwendig sind. Im Gegensatz zu einer dokumentenzentrierter Modellierung müssen für neue Auswertungen daher nicht diverse Dokumente erneut gesichtet werden.

Durch die beiden Fallstudien wird gezeigt, wie auf Basis von Informationen aus vorherigen Produktgenerationen ein Beitrag dazu geleistet werden kann, die abstrakte Sprache der SysML in der Entwicklungspraxis nutzbar zu machen und die Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu unterstützen.

Da die Erstellung von Referenz-Produktmodellen ein wesentliches Element der vorliegenden Forschungsarbeit ist, sind die Erkenntnisse auf die Entwicklung von Produktgenerationen limitiert. Die Methoden, Sprachen und Tools des MBSE sind nicht ausreichend ausgereift, um den gewünschten Paradigmenwechsel zur modellbasierten Produktentwicklung zu ermöglichen. Um den Modellierungsaufwand zu reduzieren, ist eine konsequente Modellierung der Produkte über Produktgenerationen hinweg zielführend.

Das Produktmodellierungs-Frameworks kann als ein theoretisches Modell verstanden werden, in das unterschiedliche Modelle des MBSE eingeordnet werden können. Durch das Framework wird ein Beitrag zur Baukastenentwicklung und zur Produktgenerationsentwicklung geleistet, indem aufgezeigt wird, wie die einzelnen Modelle mittels Induktion und Deduktion ineinander überführt werden können. In darauf folgenden Arbeiten können auf dem Framework aufbauend Werkzeuge und Vorgehensweisen entwickelt werden, die zum Ansatz des MBSE beitragen. Da das Produktmodellierungs-Framework ein theoretisches Modell darstellt, ist der Ausblick ein zentrales Element der vorliegenden Arbeit; im Folgenden wird auf unterschiedliche Arbeiten in diesem Kontext verwiesen.

7.2 Ausblick

Der Ausblick ist in die drei Kernbestandteile der vorliegenden Arbeit gegliedert. Zunächst wird auf das MBSE, anschließend auf die Baukastenentwicklung und zuletzt auf die Produktgenerationsentwicklung näher eingegangen.

7.2.1 Model Based Systems Engineering

Das entwickelte Framework kann genutzt werden, um weitere aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich des MBSE einzuordnen und in Kontext zueinander zu setzen (vgl. Abbildung 7.5). Im Folgenden werden Arbeiten der Karlsruher Schule in das Framework eingeordnet und aufgezeigt, wie durch Deduktion und Induktion die Ergebnisse aufeinander aufbauen können.³⁴⁴

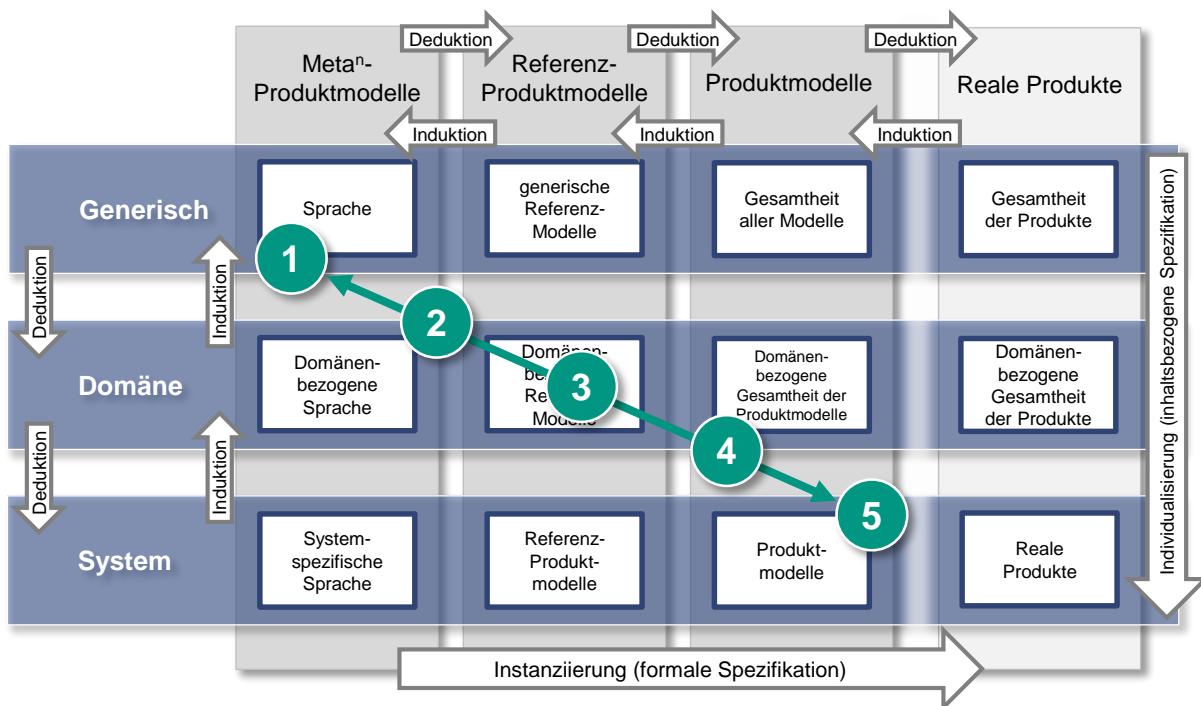


Abbildung 7.5: Einordnung von Forschungsarbeiten der Karlsruher Schule in das Produktmodellierungs-Framework

(1 in Abbildung 7.5) Am IPEK - Institut für Produktentwicklung wird an neuen Ansätzen zur interdisziplinären Systemmodellierung geforscht. Studien zeigen, dass es einen Bedarf gibt, die generische Sprache SysML dahingehend zu überarbeiten, dass

³⁴⁴Die in Kapitel 7.2.1 dargestellten Erkenntnisse wurden im Rahmen der Publikation Albers, Matthiesen, Bursac, Moeser, Klingler, Schmidt, Munker, Scherer & Kurrle, 2016 eingereicht

sie einfacher in der Praxis eingesetzt werden kann.³⁴⁵ Dazu wird an einer neuen generischen Sprache gearbeitet. Diese wird prototypisch in dem Tool SystemSketcher umgesetzt.³⁴⁶

(2) In der Domäne des Maschinenbaus werden CAD-Modelle zur Gestalt-Modellierung verwendet. Dabei gibt es erste Ansätze zur Kopplung der generischen Meta-Modelle mit CAD-Tools.³⁴⁷ Ziel weiterer Forschungsarbeiten ist es, eine menschenzentrierte Funktion-Gestalt-Synthese im Sinne des Advanced Systems Engineering³⁴⁸ zu unterstützen. Dazu wird im Rahmen des Forschungsprojekts FAS4M - Functional Architectures of Systems for Mechanical Engineers eine durchgängige Modellierung zwischen Anforderungen, Zielen, Randbedingungen sowie Funktionen und Gestalt erforscht. Darüber hinaus wird untersucht, wie freie Skizzen, die in der Funktion-Gestalt-Synthese üblich sind, in formalen Skizzenbereichen beschrieben und mit anderen Modellinhalten verbunden werden können.³⁴⁹

(3) Mithilfe von Anwendungsfällen ist es möglich, die Benutzung eines Systems samt den Wechselwirkungen zwischen Bediener, System und Umgebung zu modellieren. Diese können als Basis für die anwendungsorientierte Konstruktion und Validierung genutzt werden. Beispielsweise können in der Domäne der Gerätebranche auf diese Weise durchgängige Referenz-Produktmodelle erstellt werden, die es ermöglichen, für unterschiedliche Geräte und über Generationen hinweg, Anwendungsfälle für die Entwicklung zur Verfügung zu stellen.³⁵⁰ Diese können anschließend Produktentwickler bei der Validierung nach dem IPEK-XiL-Ansatz³⁵¹ unterstützen.

(4) In der Domäne der vernetzten Fahrzeuge besteht die Herausforderung, dass sowohl einzelne Fahrzeuge als auch Produkte der Informationstechnik wie Smartphones und Applikationen zeitlich unabhängig entwickelt und betrieben werden. Gleichzeitig werden diese Einzelsysteme in einen Gesamtverbund integriert. Dies wird als die Entwicklung von Systems-of-Systems bezeichnet. In Kooperation mit einem Automobilhersteller wird ein Ansatz entwickelt, der es ermöglicht, Ziele, Anforderungen und Randbedingungen durchgängig zu modellieren und in den einzelnen Entwicklungsprojekten

³⁴⁵vgl. z. B. Albers, Lohmeyer & Radimersky, 2012, Albers & Zingel, 2013, Bone & Cloutier, 2010.

³⁴⁶Weitere Informationen in Munker & Albers, 2015 und www.SystemSketcher.com

³⁴⁷vgl. z. B. Kleiner & Kramer, 2013 und Woyak, 2007.

³⁴⁸vgl. Albers & Gausemeier, 2012 und Albers & Lohmeyer, 2012.

³⁴⁹Weitere Informationen in Grundel, Abulawi, Moeser, Scheithauer, Kleiner, Kramer, Neubert, Kümpel & Albers, 2014 sowie Moeser, Albers & Klingler, 2015 und www.FAS4M.de

³⁵⁰Matthiesen, Schaefer & Schmidt, 2015 und Matthiesen, Schmidt & Kevin, 2015.

³⁵¹Albers, Behrendt, Schroeter, Ott & Klingler, 2013.

zur Verfügung zu stellen, um die Produktentwickler mithilfe der Zielsystemmodellierung zu unterstützen.³⁵²

(5) Am Beispiel einer konkreten Antriebsstrang-Komponente wird ein Funktions-Gestalt Modell mithilfe von SysML in der Serienentwicklung erstellt. Dieses soll dazu dienen, den Modellierungsaufwand dem Nutzen für die Produktentwickler entgegen zu stellen. Das bei der Entwicklung gewonnene Wissen wird im Rahmen des Projekts in ein Produktmodell überführt. Auf diese Weise können die modellierten Informationen für folgende Produktgenerationen in einem durchgängigen Modell nutzbar gemacht und Optimierungspotentiale für den Ansatz des MBSE identifiziert werden.³⁵³

Um Entwicklungsmethoden durchgängig und nutzbringend in der Entwicklungspraxis einzusetzen, können sinnbildlich die einzelnen Forschungsarbeiten als Bausteine eines Gebäudes der Karlsruher Schule verstanden werden.³⁵⁴ Folglich ist es wichtig, nicht nur die Bausteine als solche konsistent zu gestalten, sondern diese ebenfalls in das Gebäude zu integrieren. Das vorgestellte Produktmodellierungs-Framework kann dabei als ein Bindeglied der umfangreichen Forschungsarbeiten zum Ansatz des MBSE am IPEK - Institut für Produktentwicklung verstanden werden. Auf diese Weise kann das Ziel verfolgt werden, die Bausteine durch Deduktion und Induktion miteinander zu verbinden. Somit kann (1) eine praxistaugliche Sprache als generisches Meta-Produktmodell entwickelt werden, welche (2) eine Integration mit CAD-Modellen ermöglicht. Diese dient dadurch zur Definition von (3) produktübergreifenden Anwendungsfällen sowie (4) Zielsystemen und unterstützt die (5) Entwicklung eines konkreten technischen Systems. Vice versa können die Erkenntnisse aus der Modellierung von (5) konkreten technischen Systemen dazu genutzt werden, induktiv die (4) Zielsystem- und (3) Anwendungsfallmodellierung weiterzuentwickeln. Die dabei gewonnen Erkenntnisse können für die Integration von (2) CAD-Tools und (1) neuen generischen Sprachen genutzt werden. So können Sprachen, Methoden und Tools entstehen, die eine möglichst niedrige Anwendungshürde besitzen und eine Akzeptanz in der Entwicklungspraxis erfahren. Gleichzeitig wird eine Produktmodellierung in diesem hohen Detaillierungsgrad nicht ohne zusätzliche Aufwände (wie z. B. Zeit, Schulungen für Mitarbeiter) möglich sein.

³⁵²Albers, Kurrle & Moeser, 2014.

³⁵³Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova, 2015.

³⁵⁴Albers im Vorwort des Herausgebers zu Band 86 in Wintergerst, 2015.

7.2.2 Baukastenentwicklung

Wird die Baukastenentwicklung als eine kontinuierliche Aktivität verstanden, die parallel zur Entwicklung von einzelnen Produkten verläuft, ergeben sich auf dessen Basis neue Forschungsbedarfe.

Es werden folglich neue Methoden und Prozesse benötigt, die dem iterativen Charakter der Produkt- und Baukastenentwicklung gerecht werden. Dazu wird in einem Projekt mit einem Werkzeugmaschinenhersteller eine dreijährige begleitende Studie durchgeführt, um Produktentwickler bei der Implementierung realer Baukästen zu unterstützen.³⁵⁵

Das in Kapitel 2.1.2 vorgestellte iPeM, welches eine Beschreibung von Produktentstehungsprozessen ermöglicht, ist bisher auf die Modellierung eines einzelnen Produktentstehungsprozesses ausgelegt. Im Kontext der Baukastenentwicklung und der Produktgenerationsentwicklung scheint es zielführend zu sein, den Ansatz dahingehend weiterzuentwickeln, dass mehrere Produkte sowie produktübergreifende Aktivitäten wie z. B. „standardisieren“ modelliert werden können.³⁵⁶

Der Ansatz in der vorliegenden Arbeit wurde untersucht an Baukästen, welche die Ausprägungen:³⁵⁷

- Herstellerbaukasten,
- geschlossener Baukasten,
- strukturgebundener Baukasten und
- Mischsystem

besitzen. Die Übertragbarkeit des MBSE zur Unterstützung von Produktentwicklern auf andere Baukasten Ausprägungen können des Weiteren untersucht werden. Außerdem wurde die vorliegende Arbeit auf die Unterstützung der Frühen Phase eingegrenzt. Hieraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf für die Unterstützung der Baukastenentwicklung in späteren Phasen, wie der Serienentwicklung.

Darüber hinaus sollte die Übertragbarkeit des hier entwickelten Ansatzes auf andere Domänen evaluiert werden. Derzeit wird ein Schwerpunktprogramm beantragt, auf dessen Basis Ansätze entwickelt werden sollen, um modulare Bauwerke effizienter entwickeln und fertigen zu können. Hierbei soll unter anderem untersucht werden, wie

³⁵⁵Birk, 2015, Betreute Abschlussarbeit.

³⁵⁶Dies fließt derzeit durch ALBERS, REISS und den Verfasser der vorliegenden Arbeit in die Überarbeitung des iPeM und der VDI Richtlinie 2221 ein.

³⁵⁷vgl. Kapitel 2.3.1 und Tabelle 2.7

die Ansätze zur gekoppelten Modellierung von Baukästen und Produkten auf Basis des MBSE auf das Bauingenieurwesen übertragen werden können.³⁵⁸

7.2.3 Produktgenerationsentwicklung

Studien zeigen, dass der Ansatz der Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS Potentiale zur näheren Untersuchung bietet. So werden in jüngerer Vergangenheit in diversen Publikationen Aspekte der Produktgenerationsentwicklung untersucht. Im Folgenden werden einzelne Untersuchungen kurz vorgestellt und es wird auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten hingewiesen.

In Kooperation mit einem Automobilzulieferer wird mithilfe des C&C²-A untersucht, wie die unterschiedlichen Variationsanteile auf Systemebenen berechnet und im Super-system aggregiert werden können. Dazu werden am Beispiel einer Nockenwelle Änderungen der Produktparameter den unterschiedlichen Variationsarten zugeordnet und mithilfe eines Softwaretools geeignete Referenzprodukte für die Angebotskalkulation ermittelt. Ziel zukünftiger Arbeiten wird es sein, die Aggregation weiterzuentwickeln. Das Risiko aufgrund einzelner Änderungen in Subsystemen soll auf höheren Systemebenen transparent dargestellt werden können.³⁵⁹

In einem weiteren Projekt mit einem Automobilhersteller wird analysiert, welche organisationalen Kompetenzen benötigt werden, um künftige Produktgenerationen zu entwickeln. Dazu werden Roadmaps als Instrumente der Technologiefrühaufklärung verwendet, um den Veränderungsgrad neuer Produktgenerationen in Relation zu notwendigen Kompetenzen zu setzen. Aus den resultierenden Kompetenzbedarfen ergeben sich Maßnahmen zur Anpassung der Kompetenzen eines Unternehmens an die technologischen Herausforderungen künftiger Produktgenerationen. So bietet es sich beispielsweise an, Experten einzubeziehen oder Forschungs- und Entwicklungskooperationen einzugehen, um starke Kompetenzveränderungen zu ermöglichen.³⁶⁰

Im Rahmen eines Workshops bei der Frühjahrstagung der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) - mit 25 Vertretern aus Forschung und Industrie - fordern 96 % der Teilnehmer, dass Kunden- und Produktnutzungsinformationen verstärkt in die Produktentwicklung integriert werden. Dazu wird am Ansatz des Test-based-Development (TbD) geforscht, um Produkte in der Anwendungsumgebung unter

³⁵⁸Mark, Albers, König, Lanza & Lodrick, 2015.

³⁵⁹Albers, Walch & Bursac, 2016, eingereicht.

³⁶⁰vgl. Albers, Krämer, Heitger, Schlennstedt & Bursac, 2015 und Albers, Krämer, Arslan & Bursac, 2015.

Echtzeitbedingungen durch Kunden validieren zu können und dadurch neues Wissen für die Produktentwicklung zu generieren. Hierzu dient der IPEK-XiL-Ansatz, dabei werden die einzelnen Teilsysteme virtuell und physisch (z. B. aus vorherigen Produktgenerationen) für die Validierung miteinander gekoppelt.³⁶¹

Weiteres Forschungspotential liegt in der Unterstützung bei der Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen. Bei einer systematischen Definition der Neuentwicklungsanteile können Entwicklungsprozesse projiziert und hinsichtlich des Risikos bewertet werden. Dadurch sollen künftig Prozesse spezifisch an die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung angepasst werden.³⁶²

Des Weiteren wird im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Intentional Forgetting“ ein Antrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft gestellt, der die formale Beschreibung von Referenz-Produktmodellen ermöglichen soll. Auf Basis des hierbei entwickelten Tools sollen Informationen so beschrieben werden, dass sie in neuen Produktgenerationen einfacher wiederverwendet werden können.

Der Ansatz der Produktgenerationsentwicklung bietet vielfältige Möglichkeiten, die Forschung an Methoden und Prozessen der Produktentwicklung auszubauen.

³⁶¹ Albers, Bursac & Behrendt, 2015.

³⁶² Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b.

Literaturverzeichnis

Abramovici et al. 2009

Abramovici, M., Bellalouna, F., Neubach, M. „Delphi Studie PLM 2020, Experteneinschätzungen zur zukünftigen Entwicklung des Lifecycle Managements“. In: *ITM, Ruhr-Universität Bochum* (2009).

Abramovici & Lindner 2011

Abramovici, M., Lindner, A. „Providing product use knowledge for the design of improved product generations“. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 60.1 (2011), S. 211–214.

Abramovici & Sieg 2002

Abramovici, M., Sieg, O. C. „Status and development trends of product lifecycle management systems“. In: *Proceedings of IPPD2002, Wroclaw, Poland* (2002).

Albers 1991

Albers, A. „Das Zweimassenschwungrad der dritten Generation-Optimierung der Komforteigenschaften von PKW-Antriebssträngen“. In: *Antriebstechnisches Kolloquium*. Bd. 91. 1991.

Albers 1994 – . „Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik Werkzeuge zur Effizienzsteigerung“. In: *VDI Berichte-Verein Deutscher Ingenieure* 1120 (1994), S. 73–106.

Albers 2010 – . „Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences“. In: *8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering*. Hrsg. von I. Horváth, F. Mandorli, Z. Rusák. 2010. ISBN: 978-90-5155-060-3.

Albers et al. 2013

Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S., Klingler, S. „X-in-the-Loop: A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes“. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von U. Lindemann, V. Srinivasan, Y. S. Kim, S. W. Lee, P. J. Clarkson, G. Cascini. 2013, S. 391–400. ISBN: 9781904670490.

Albers & Braun 2011

Albers, A., Braun, A. „A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes“. In: *International Journal of Product Development* 15.1/2/3 (2011), S. 6–25.

Albers et al. 2010

Albers, A., Braun, A., Muschik, S. „Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes“. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes, MMEP 2010*. Hrsg. von

P. Heisig, P. J. Clarkson, S. Vajna. Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 15–26. ISBN: 978-1-849-96199-8.

Albers et al. 2005

Albers, A., Burkardt, N., Meboldt, M., Saak, M. „SPALTEN problem solving methodology in the product development“. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design: Melbourne*. Hrsg. von A. Samuel, W. Lewis. Barton & A.C.T: Engineers Australia, 2005.

Albers et al. 2015

Albers, A., Bursac, N., Behrendt, M. „Validierung in der Produktgenerationsentwicklung“. In: *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP* 2015.2 (2015).

Albers et al. 2014

Albers, A., Bursac, N., Maul, L., Mair, M. „The role of in-house intermediaries in innovation management: Optimization of technology transfer processes from cross-industry“. In: *Procedia CIRP*. Hrsg. von G. Moroni, T. Tolio. Bd. 21. Elsevier B.V., 2014, S. 485–490. ISBN: 2212-8271.

Albers et al. 2016

Albers, A., Bursac, N., Rapp, S. „Product Generation Engineering: Case Study of the Dual Mass Flywheel (eingereicht)“. In: *Proceedings of DESIGN 2016, the 14th International Design Conference*. 2016.

Albers et al. 2015

Albers, A., Bursac, N., Reiß, N., Rachenkova, G. „Product Generation Development: The Path to Agile and Efficient Processes in Product Development“. In: *Proceedings of the Energy Science Technology*. 2015.

Albers et al. 2014

Albers, A., Bursac, N., Scherer, H. „Modelbased Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung“. In: *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP* Ausgabe 1 (2014), S. 20–21.

Albers et al. 2014

Albers, A., Bursac, N., Urbanec, J., Lüdcke, R., Rachenkova, G. „Knowledge Management in Product Generation Development: an empirical study“. In: *Proceedings of the 24th Symposium Design for X*. Hrsg. von D. Krause, K. Paetzold, S. Wartzack. 2014, S. 13–24.

Albers et al. 2015a

Albers, A., Bursac, N., Wintergerst, E. „Product Generation Development – Importance and Challenges from a Design Research Perspective“. In: *Proceedings of INASE Conferences 2015*. 2015.

Albers et al. 2015b – . „Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive“. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015 SSP 2015*. Hrsg. von H. Binz, B. Bertsche. 2015.

Albers et al. 2012

Albers, A., Ebel, B., Lohmeyer, Q. „System of Objectives in Complex Product Development: Proceedins of TMCE 2012 May 7-11, 2012, Karlsruhe“. In: (2012).

Albers & Gausemeier 2012

Albers, A., Gausemeier, J. „Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung“. In: *Smart Engineering*. Springer, 2012, S. 17–29.

Albers et al. 2015

Albers, A., Krämer, L., Arslan, M., Bursac, N. „Identifikation und Analyse künftiger Kompetenzbedarfe in der Produktgenerationsentwicklung: am Beispiel der Antriebsentwicklung eines Sportwagenherstellers“. In: *SVT 11. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*. Hrsg. von J. Gausemeier. 2015.

Albers et al. 2015

Albers, A., Krämer, L., Heitger, N., Schlenstedt, K., Bursac, N. „Die Veränderung organisationaler Kompetenzen im Rahmen der Produktgenerationsentwicklung von Fahrzeugen“. In: *Proceedings of the 26th Design for X Symposium*. Hrsg. von D. Krause, K. Paetzold, S. Wartzack. Hamburg: TuTech Verlag, 2015.

Albers et al. 2014

Albers, A., Kurrle, A., Moeser, G. „Modellbasiertes Anforderungsmanagement von Systems-of-Systems am Beispiel des vernetzten Fahrzeugs“. In: *Tag des Systems Engineering 2014*. Hrsg. von Maik Maurer, Sven-Olaf Schulze. Carl Hanser Verlag, 2014, S. 373–382. ISBN: 978-3-446-44357-0.

Albers & Lohmeyer 2012

Albers, A., Lohmeyer, Q. „Advanced systems engineering – towards a model-based and human-centered methodology“. In: *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering*. Hrsg. von I. Horváth, Z. Rusák, A. Albers, M. Behrendt. 2012.

Albers et al. 2012

Albers, A., Lohmeyer, Q., Radimersky, A. „Individuelle und organisatorische Akzeptanz von Methoden des Systems Engineering“. In: *Tag des Systems Engineering 2012*. München: Carl Hanser Verlag, 2012. ISBN: 978-3-446-43603-9.

Albers et al. 2014

Albers, A., Lüdcke, R., Bursac, N., Reiß, N. „Connecting Knowledge-Management-Systems to Improve a continuous flow of Knowledge in Engineering Design Pro-

cesses“. In: *10th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering*. Hrsg. von I. Horváth, Z. Rusák. Bd. 2014. 2014, S. 393–402. ISBN: 978-94-6186-177-1.

Albers et al. 2014

Albers, A., Lüdcke, R., Bursac, N., Will, J. „Process Analysis and Optimization by Targeted Application of Knowledge Management: A Case Study in the Early Stages of Product Development“. In: *Methoden in der Produktentwicklung*. Hrsg. von F. Rieg, K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, R. Stelzer. 2014. ISBN: 978-3-00-046544-4.

Albers et al. 2014

Albers, A., Matros, K., Behrendt, M., Bohne, W., Ars, H. „Darstellung und Bewertung von Hybridantrieben mit einem Hybrid-Erlebnis-Prototypen“. In: *VPC.plus Simulation und Test für die Antriebsentwicklung, 16. MTZ-Fachtagung*. 2014.

Albers et al. 2015

Albers, A., Matros, K., Behrendt, M., Jetzinger, H. „Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess“. In: *VDI Konstruktion 6* (2015), S. 74–81.

Albers et al. 2016

Albers, A., Matthiesen, S., Bursac, N., Moeser, G., Klingler, S., Schmidt, S., Munker, F., Scherer, H., Kurrle, A. „Model-Based Systems Engineering in der Karlsruher Schule: 5 Jahre Forschung für die Anwendung (eingereicht)“. In: *Develop 3*. Hrsg. von K. Kohlhammer. Bd. 2016/1. Leinfelden-Echterdingen: Konradin-Verlag, 2016. ISBN: 2363-6726.

Albers et al. 2014

Albers, A., Matthiesen, S., Bursac, N., Moeser, G., Schmidt, S., Lüdcke, R. „Abstraktionsgrade der Systemmodellierung: von der Sprache zur Anwendung“. In: *Tag des Systems Engineering*. Hrsg. von M. Maurer, S. O. Schulze. Bremen: Carl Hanser Verlag, 2014, S. 183–192. ISBN: 978-3-446-44357-0.

Albers et al. 2002

Albers, A., Matthiesen, S., Lechner, G. „Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme“. In: *Konstruktion 7-8* (2002), S. 55–60.

Albers et al. 2013

Albers, A., Maul, L., Bursac, N. „Internal Innovation Communities from a User’s Perspective: How to Foster Motivation for Participation“. In: *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference*. Hrsg. von M. Abramovici, R. Stark. Bd. 5. Lecture Notes in Production Engineering. Springer, 2013, S. 525–534. ISBN: 978-3-642-30816-1.

Albers et al. 2015

Albers, A., Maul, L., Bursac, N., Heismann, R. „Connected Creativity: A Human Centered Community Platform for Innovation Impulses“. In: *Proceedings of the Third International Conference on Design Creativity*. Hrsg. von A. Chakrabarti, T. Taura, Y. Nagai. 2015, S. 158–165.

Albers et al. 2016 – . „Connected Creativity: A Human Centered Community Innovation Platform in the context of Product Generation Development (eingereicht)“. In: *International Journal of Design Creativity and Innovation* 2016.1/2016 (2016).

Albers & Medoldt 2007

Albers, A., Medoldt, M. „IPEMM-integrated product development process management model, based on systems engineering and systematic problem solving“. In: *Guidelines for a Decision Support Method Adapted to NPD Processes* (2007).

Albers & Muschik 2010

Albers, A., Muschik, S. „The Role and Application of Activities in the integrated product engineering model (iPeM)“. In: *Proceedings of the 11th International Design Conference*. Hrsg. von D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojcetic. 2010.

Albers et al. 2016

Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Breitschuh, J. „15 years of SPALTEN problem solving methodology in the product development (eingereicht)“. In: *Proceedings of the NordDesign 2016*. 2016.

Albers et al. 2015

Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Schwarz, L., Lüdcke, R. „Modelling Technique for Knowledge Management, Process Management and Method application: A Formula Student exploratory study“. In: *Modelling and Management of Engineering Processes*. Hrsg. von M. Schabacker, K. Gericke, N. Szélig, S. Vajna. Bd. 3. Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 147–158.

Albers et al. 2014

Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Urbanec, J., Lüdcke, R. „Situation-appropriate method selection in product development process: empirical study of method application“. In: *Proceedings of NordDesign 2014 Conference*. Hrsg. von M. Laakso, K. Ekman. 2014, S. 550–559.

Albers et al. 2015

Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Walter, B., Gladysz, B. „InnoFox: Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess“. In: *Proceedings of the Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*. 2015.

Albers et al. 2011

Albers, A., Sadowski, E., Marxen, L. „A new Perspective on Product Engineering: Overcoming Sequential Process Models“. In: *The Future of Design Methodology*. Hrsg. von H. Birkhofer. London [U.K.]: Springer, 2011, S. 199–209.

Albers et al. 2015

Albers, A., Scherer, H., Bursac, N., Rachenkova, G. „Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies“. In: *Procedia CIRP*. Hrsg. von M. Shpitalni, A. Fischer, G. Molcho. 2015, S. 129–134.

Albers & Seiter 2015

Albers, A., Seiter, M., (Hrsg.) *Von der INformation zur INnovation: Innovationen systematisch entwickeln durch Methoden- und Wissensmanagement*. 2015.

Albers et al. 2013

Albers, A., Wagner, D., Ruckpaul, A., Hessenauer, B., Burkardt, N., Matthiesen, S. „Target Weighing: a New Approach for Conceptual Lightweight Design in Early Phases of Complex Systems Development“. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von U. Lindemann, V. Srinivasan, Y. S. Kim, S. W. Lee, P. J. Clarkson, G. Cascini. 2013. ISBN: 9781904670490.

Albers et al. 2016

Albers, A., Walch, M., Bursac, N. „Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung (eingereicht)“. In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* 1 (2016).

Albers & Wintergerst 2013

Albers, A., Wintergerst, E. „The Contact and Channel Approach (C&C²-A): Relating a system's physical structure to its functionality“. In: *An Anthology of Theories and Models of Design*. Hrsg. von L.T.M. Blessing, A. Chakrabarti. Heidelberg: Springer, 2013.

Albers & Zingel 2013

Albers, A., Zingel, C. „Challenges of Model-Based Systems Engineering: A Study towards Unified Term Understanding and the State of Usage of SysML“. In: *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference*. Hrsg. von M. Abramovici, R. Stark. Bd. 5. Lecture Notes in Production Engineering. Springer, 2013. ISBN: 978-3-642-30816-1.

AlGeddawy & ElMaraghy 2013

AlGeddawy, T., ElMaraghy, H. „Reactive design methodology for product family platforms, modularity and parts integration“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and technology* 6.1 (2013), S. 34–43.

Alt 2012

Alt, O. *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML: In der Praxis*. 1. Aufl. München: Hanser Fachbuchverlag, 2012. ISBN: 3446430660.

Andreasen 1994

Andreasen, M. M. „Modelling—the language of the designer“. In: *Journal of Engineering Design* 5.2 (1994), S. 103–115.

Arnoscht 2013

Arnoscht, J. *Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen*. Apprimus Wissenschaftsverlag, 2013. ISBN: 3863591232.

Bailom et al. 1996

Bailom, F., Hinterhuber, H., Matzler, K., Sauerwein, E. „Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit“. In: *Marketing: Zeitschrift für Forschung und Praxis* (1996), S. 117–126.

Bertalanffy 1969

Bertalanffy, L. von. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. Revised. George Braziller Inc, 1969. ISBN: 9780807604533.

Biegert 1971

Biegert, H. *Die Baukastenbauweise als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip*. na, 1971.

Blees 2011

Blees, C. „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“. In: *Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*, 2011.

Blessing & Chakrabarti 2009

Blessing, L.T.M., Chakrabarti, A. *DRM, a design research methodology*. London [U.K.], 2009.

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung 2012

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung. *Innovative Produkte effizient entwickeln: Forschung für die Produktion von morgen*. Bonn, Berlin, 2012.

Bone & Cloutier 2010

Bone, M., Cloutier, R. „The Current State of Model Based Systems Engineering: Results from the OMG™ SysML Request for Information 2009“. In: *Proceedings of the 8th Conference on Systems Engineering Research (CSER2010)*. Hoboken, NJ, USA. Bd. 1. 2010.

Braun 2013

Braun, A. „Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung: Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers.

Bd. 72. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013. ISBN: 1615-8113.

Browning et al. 2006

Browning, T. R., Fricke, E., Negele, H. „Key concepts in modeling product development processes“. In: *Systems Engineering* 9.2 (2006).

Browning & Ramasesh 2007

Browning, T. R., Ramasesh, R. V. „A Survey of Activity Network-Based Process Models for Managing Product Development Projects“. In: *Production and Operations Management* 16.2 (2007), S. 217–240. ISSN: 1059-1478 07 1602 217.

Bursac et al. 2016

Bursac, N., Albers, A., Schmitt, T. „Model Based Systems Engineering in Modular Design: A Potential Analysis using Portal Type Scraper Reclaimers as an Example (eingereicht)“. In: *Procedia CIRP*. 2016.

Carlson & Turner 2013

Carlson, R., Turner, R. „Review of Agile Case Studies for Application to Aircraft Systems Integration“. In: *Procedia Computer Science*. Hrsg. von C. Paredis, C. Bishop, D. Bodner. 2013, S. 469–474. ISBN: 1877-0509.

Cooper 1990

Cooper, R. G. „Stage-gate systems: a new tool for managing new products“. In: *Business Horizons* 33.3 (1990), S. 44–54.

Cooper 1994 – . „Third-Generation New Product Processes“. In: *Journal of Product Innovation Management* 11.1 (1994), S. 3–14. ISSN: 07376782.

Cooper & Kleinschmidt 1993

Cooper, R. G., Kleinschmidt, E. J. „Screening new products for potential winners“. In: *Long Range Planning* 26.6 (1993), S. 74–81.

Costa & Sobek 2003

Costa, R., Sobek, D. „Iteration in Engineering Design: Inherent and Unavoidable or Product of Choices Made?“ In: *Proceedings of DETC'03, ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (2003).

Daenzer & Huber 1994

Daenzer, W. F., Huber, F. *Systems Engineering: Methoden und Praxis*. 8. verbesserte Auflage. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1994.

Deubzer & Lindemann 2009

Deubzer, F., Lindemann, U. „Networked Product Modelling - Use and Interaction of Product Models and Methods during analysis and synthesis“. In: *Proceedings of*

the 17th International Conference on Engineering Design. Hrsg. von M. Norell, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad, U. Lindemann. 2009.

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG 2013

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. *Geschäftsbericht 2013*. Essen, 2013.

Earl et al. 2005

Earl, C., Johnson, J., Eckert, C. M. „Complexity“. In: *Design process improvement*. Hrsg. von P. J. Clarkson, C. M. Eckert. London [U.K.]: Springer, 2005, S. 174–197. ISBN: 1-85233-701-X.

Ebbinghaus 2003

Ebbinghaus, H.-D. *Einführung in die Mengenlehre*. 4. Aufl. HochschulTaschenbuch. Heidelberg & Berlin: Spektrum, Akad. Verl., 2003. ISBN: 9783827414113.

Ebel 2015

Ebel, B. „Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 85. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISBN: 1615-8113.

Eckert et al. 2015

Eckert, C., Albers, A., Bursac, N., Chen, H., Clarkson, J., Gericke, K., Gladysz, B., Maier, J., Rachenkova, G., Shapiro, D., Wynn, D. „Integrated Product and Process Models: Towards an Integrated Framework and Review“. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)*. Hrsg. von C. Weber, S. Husung, M. Cantamessa, G. Cascini, D. Marjanovic, S. Venkataraman. Bd. 80,2. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, 2015, S. 289–398. ISBN: 9781904670650.

Eckert et al. 2010

Eckert, C. M., Alink, T., Albers, A. „Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction“. In: *Proceedings of DESIGN*. 2010.

Eckert et al. 2003

Eckert, C. M., Clarkson, P. J., Stacey, M. K. „The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research“. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von A. Folkesson, K. Galen, M. Norell, U. Sellgren. 2003.

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel, K. *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4. Aufl. München: Hanser, 2009. ISBN: 9783446420137.

Ehrlenspiel et al. 2007

Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 6. Heidelberg, 2007. ISBN: 978-3-540-74222-7.

Ehrlenspiel & Meerkamm 2016

Ehrlenspiel, K., Meerkamm, H. „Integration Versus Spezialisierung: Von der Notwendigkeit einer ganzheitlichen Konstruktionsforschung und -lehre an Universitäten und Hochschulen“. In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieurwerkstoffe* (2016).

Eppinger et al. 1994

Eppinger, S., Whitney, D., Smith, R., Gebala, D. „A model-based method for organizing tasks in product development“. In: *Research in Engineering Design* 6.1 (1994), S. 1–13.

Ericsson & Erixon 1999

Ericsson, A., Erixon, G. *Controlling design variants: modular product platforms*. Society of Manufacturing Engineers, 1999.

Fahrmeir et al. 2012

Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G. *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. 7. Aufl. 2010. 3., korr. Nachdruck 2011. Springer, 2012. ISBN: 9783642019388.

Feldhusen & Gebhardt 2008

Feldhusen, J., Gebhardt, B. *Product Lifecycle Management für die Praxis: Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. 1. Aufl. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 3540340092.

Finkelnburg 2013

Finkelnburg, W. *Einführung in die Atomphysik*. Springer-Verlag, 2013.

Galbraith 1973

Galbraith, J. R. *Designing complex organizations*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co, 1973. ISBN: 0201025590.

Gausemeier et al. 2013

Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Steffen, D., Czaja, A., Wiederkehr, O., Tschirner, C. *Systems Engineering: in der industriellen Praxis*. Paderborn, 2013.

Grabowski & Geiger 1997

Grabowski, H., Geiger, K. *Neue Wege zur Produktentwicklung*. Stuttgart & Heidelberg: Raabe Stuttgart, 1997.

Grundel et al. 2014

Grundel, M., Abulawi, J., Moeser, G., Scheithauer, A., Kleiner, S., Kramer, C., Neubert, M., Kümpel, S., Albers, A. „FAS4M – No more: "Please mind the gap!" In: *Tag*

des Systems Engineering 2014. Hrsg. von M. Maurer, S. O. Schulze. Carl Hanser Verlag, 2014, S. 65–74. ISBN: 978-3-446-44357-0.

Hall 1962

Hall, A. D. *A Methodology for Systems Engineering*. Princeton, USA, 1962.

Harrer et al. 2013

Harrer, M., Görich, H.-J., Reuter, U., Wahl, G. „50 Jahre Porsche 911 Optimierung von Fahrwerkregelung und Bremssystemen“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 115.12 (2013), S. 962–969. ISSN: 0001-2785.

Heismann & Maul 2012

Heismann, R., Maul, L. „Mit systematischem Innovationsmanagement zum Erfolg“. In: *Innovation Excellence: wie Unternehmen ihre Innovationsfähigkeit systematisch steigern*. Hrsg. von S. Ili. Symposion Publishing GmbH, 2012, S. 39–60.

Hellenbrand 2013

Hellenbrand, D. „Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse“. In: *Dr. Hut*. Dissertation. Technische Universität München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2013. ISBN: 3843910731.

Henderson & Clark 1990

Henderson, R., Clark, K. „Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms“. In: *Administrative science quarterly* (1990), S. 9–30.

Hoffmann & Vietor 2014

Hoffmann, C.-A., Vietor, T. „Erklärungsmodell der modularen Baukastensystematik in der Automobilindustrie“. In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* 5 (2014), S. 75–78.

IncoSE 2011

IncoSE. *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. Hrsg. von C. Haskins, M. Krueger, K. Forsberg, D. Walden, R. D. Hamelin. San Diego, 2011.

INCOSE Technical Operations 2007

INCOSE Technical Operations. *Systems Engineering Vision 2020*. Hrsg. von INCOSE Technical Operations. 2007.

Isermann 1999

Isermann, R. *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Berlin: Springer Verlag, 1999.

Jetter 2005

Jetter, A. *Produktplanung im fuzzy front end: Handlungsunterstützungssystem auf der Basis von fuzzy cognitive maps*. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2005. ISBN: 9783835001442.

Jetter & Schröder 2007

Jetter, A., Schröder, H. „Produktplanung mit Fuzzy Cognitive Maps“. In: *Management der frühen Innovationsphasen*. Hrsg. von C. Herstatt, B. Verworn. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2007. ISBN: 9783834903754.

Jiao et al. 2007

Jiao, J., Simpson, T. W., Siddique, Z. „Product family design and platform-based product development: A state-of-the-art review“. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 18.1 (2007), S. 5–29. ISSN: 0956-5515.

Kaffenberger et al. 2012

Kaffenberger, R., Schulze, S. O., Weber, H., (Hrsg.) *INCOSE Systems Engineering Handbuch*. München, 2012.

Kano et al. 1984

Kano, N., Seraku, N., Takahashi, F., Tsuji, S. „Attractive quality and must-be quality“. In: *Journal of the Japanese Society for Quality Control* 14.2 (1984), S. 147–156.

Khurana & Rosenthal 1997

Khurana, A., Rosenthal, S. „Integrating the Fuzzy Front End of New Product Development“. In: *Sloan Management Review* 6 (1997), S. 103–120.

Khurana & Rosenthal 1998 – . „Towards Holistic "Front Ends" In New Product Development“. In: *Production Innovation Manager* 15 (1998), S. 57–74.

Kieser & Blessing 2010

Kieser, J., Blessing, U. „Vom Konzept zum Democar–die Getrag-Bosch-Hybrid-Kooperation“. In: *Lecture, Getrag Drivetrain Forum, Untergruppenbach*. 2010.

Kipp 2012

Kipp, T. „Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung“. In: *Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*, 2012.

Kipp et al. 2010

Kipp, T., Bles, C., Krause, D. „Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“. In: *Proceedings of the 21st Symposium on Design for X*. Hamburg: Buchholz, 2010.

Kleiner & Kramer 2013

Kleiner, S., Kramer, C. „Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6“. In: *Smart Product Engineering*. Hrsg. von M. Abramovici, R. Stark. Lecture Notes in Production Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 93–102. ISBN: 978-3-642-30816-1.

Koen et al. 2001

Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'amore, R., Elkins, C., Herald, K., Incorvia, M., Johnson, A., Karol, R., Seibert, R., Slavejkov, A., Wagner, K.

„Providing Clarity and a Common Language to the Fuzzy Front End“. In: *Research-Technology Management* Vol. 2001 (2001), S. 46–55.

Kopenhagen 2004

Kopenhagen, F. „Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen“. In: *Berichte aus der Konstruktionstechnik*, Shaker, Aachen (2004), S. 16.

Krause et al. 2012

Krause, D., Kipp, T., Bles, C. „Modulare Produktstrukturierung“. In: *Handbuch Konstruktion*. Hanser, München (2012), S. 657–678.

Krehmer et al. 2009

Krehmer, H., Meerkamm, H., Wartzack, S. „The Products Degree of Maturity as a Measurement for the Efficiency of Design Iterations“. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von M. Norell, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad, U. Lindemann. 2009.

Lamm & Weilkiens 2014

Lamm, J., Weilkiens, T. „Method for Deriving Functional Architectures from Use Cases“. In: *Systems Engineering* 17.2 (2014), S. 225–236.

Lasch & Gießmann 2009

Lasch, R., Gießmann, M. „Qualitäts- und Komplexitätsmanagement: Parallelitäten und Interaktionen zweier Managementdisziplinen“. In: *Ganzheitliche Unternehmensführung in dynamischen Märkten*. Hrsg. von R. Hünerberg, A. Mann. 2009, S. 93–124. ISBN: 978-3-8349-1244-2.

Lindemann & Lorenz 2008

Lindemann, U., Lorenz, M. „Uncertainty Handling in Integrated Product Development“. In: *Proceedings of the 10th International Design Conference*. Hrsg. von D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojcetic. 2008, S. 175–182.

Lindemann & Maurer 2006

Lindemann, U., Maurer, M. „Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte“. In: *Individualisierte Produkte*. Hrsg. von U. Lindemann, R. Reichwald, M. Zäh. Berlin: Springer, 2006, S. 41–62. ISBN: 978-3-540-25506-2.

Lohmeyer 2013

Lohmeyer, Q. „Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 59. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013. ISBN: 1615-8113.

Lüdcke et al. 2015

Lüdcke, R., Bursac, N., Reiß, N., Will, J. „Effiziente Wissensströme in der Produktentwicklung“. In: *Von der INformation zur INnovation*. Hrsg. von A. Albers, M. Seiter. 2015.

LuK 2009

LuK. „Zweimassenschwungrad, Technik, Schadensdiagnose“. In: *LuK ZMS Broschüre Technik* (2009).

Mantwill 2014

Mantwill, F. „Es muss uns gelingen!“ In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* 2014.2 (2014), S. 3.

Mark et al. 2015

Mark, P., Albers, A., König, M., Lanza, G., Lodrick, D. *Industrialisierungskonzepte für Ingenieurbauwerke: Schnell – Präzise – Digital*. 2015.

Marxen 2014

Marxen, L. „A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 74. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014. ISBN: 1615-8113.

Matthiesen 2002

Matthiesen, S. „Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 6. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2002. ISBN: 1615-8113.

Matthiesen et al. 2015

Matthiesen, S., Schaefer, T., Schmidt, S. „Zielgerichtete und kundenorientierte Produktentwicklung: von der Anwendungsanalyse zur Validierung“. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*. 2015.

Matthiesen et al. 2015

Matthiesen, S., Schmidt, S., Kevin, H. „Advanced use case modelling: Modellierung und Analyse von Anwendungsfällen zur Untertützung der zielgerichteten und kundenorientierten Entwicklung“. In: *Proceedings of the 26th Design for X Symposium*. Hrsg. von D. Krause, K. Paetzold, S. Wartzack. Hamburg: TuTech Verlag, 2015.

Matthiesen et al. 2014

Matthiesen, S., Schmidt, S., Moeser, G., Munker, F. „The Karlsruhe SysKIT Approach: A Three-step SysML Teaching Approach for Mechatronic Students“. In: *Procedia CIRP* 21 (2014), S. 385–390. ISSN: 22128271.

McManus & Hastings 2005

McManus, H., Hastings, D. „A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems“. In: *Engineering systems Symposium, Massachusetts, USA (2005)*.

Meboldt 2009

Meboldt, M. „Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung: Als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 29. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2009. ISBN: 1615-8113.

Meboldt et al. 2012

Meboldt, M., Matthiesen, S., Lohmeyer, Q. „The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-Market Development Processes“. In: *2nd International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes*. 2012.

Meffert et al. 2000

Meffert, H., Burmann, C., Kirchgeorg, M. „Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung, Konzepte, Instrumente, Praxisbeispiele, 9“. In: *Aufl., Wiesbaden (2000)*.

Moeser et al. 2015

Moeser, G., Albers, A., Klingler, S. „Modellbasierte Funktions-Gestalt-Synthese: Unterstützung der Entwickler bei der Definition der Produktgestalt“. In: *Proceedings of the 26th Design for X Symposium*. Hrsg. von D. Krause, K. Paetzold, S. Wartzack. Hamburg: TuTech Verlag, 2015.

Müller 2015

Müller, A. *Zeitreisen und Zeitmaschinen*. Springer-Verlag, 2015.

Munker & Albers 2015

Munker, F., Albers, A. „SystemSketcher: Entstehung eines anwenderorientierten Ansatzes zur interdisziplinären Systemmodellierung“. In: *Tag des Systems Engineering*. Ulm, 2015.

Muschik 2011

Muschik, S. „Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 50. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2011. ISBN: 1615-8113.

Negele 2006

Negele, H. „Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung“. In: Dissertation. Technische Universität München, 2006.

Object Management Group 2011

Object Management Group. *UML Profile for MARTE: Modeling and Analysis of Real-Time Embedded Systems: Specification of Version 1.1*. 2011.

OMG 2002

OMG. *Meta Object Facility (MOF) Specification v1. 4*. 2002.

Pahl et al. 2007

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Springer, 2007. ISBN: 9783540340607.

Pahl et al. 2013

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H., Heusel, J., Bronnhuber, T., Hufenbach, W., Helms, O., Schlick, C., Klocke, F., Dilger, K., Müller, R. „Gestaltungsrichtlinien“. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Hrsg. von Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 583–751. ISBN: 978-3-642-29568-3.

Patzak 1982

Patzak, G. *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin & New York: Springer-Verlag, 1982. ISBN: 3540117830.

Pflieger 2015

Pflieger, W. „Ein methodischer Ansatz zur modularen Auslegung von Antriebsstrangkomponenten im Rahmen der Entwicklung von Hybridfahrzeugen“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 84. Dissertation. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISBN: 1615-8113.

Ponn & Lindemann 2008

Ponn, J., Lindemann, U. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten*. 1. Aufl. Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-68562-3.

Ponn & Lindemann 2011 – . *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-20579-8.

Pulm 2004

Pulm, U. „Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung“. In: *Dr. Hut*. Hrsg. von U. Lindemann. Technische Universität München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2004. ISBN: 3899630629.

Ramos et al. 2012

Ramos, A. L., Ferreira, J. V., Barcelo, J. „Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man,*

and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) 42.1 (2012), S. 101–111. ISSN: 1094-6977.

Rasmusson 2010

Rasmusson, J. *The Agile Samurai: How Agile Masters Deliver Great Software*. 1. Aufl. Raleigh, USA: Pragmatic Bookshelf, 2010. ISBN: 978-1-934-35658-6.

Renner 2007

Renner, I. „Methodische Unterstützung funktions-orientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil“. In: 2007.

Ropohl 1979

Ropohl, G. *Eine systemtheorie der technik: zur Grundlegung der Allgemeinen technologie*. Hanser München, 1979.

Ropohl 2009 – . *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 3. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag, 2009. ISBN: 978-3-86644-374-7.

Saaksvuori & Immonen 2008

Saaksvuori, A., Immonen, A. *Product lifecycle management*. Springer Science & Business Media, 2008.

Schabacker et al. 2013

Schabacker, M., Szélig, N., Vajna, S. „The Calculation of the Degree of Parallelization of Documents and Risk Estimation in Product Development Processes“. In: *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. 2013, V02AT02A065–V02AT02A065.

Schuh 2005

Schuh, G. *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools*. 2. Hanser, 2005. ISBN: 3-446-40043-5.

Schuh 2015 – . *Leitfaden zur Baukastengestaltung: Ergebnisse des Forschungsprojekts Gestaltung innovativer Baukasten-und Wertschöpfungsstrukturen (GiBWert)*. neue Ausg. Frankfurt am Main: VDMA, 2015. ISBN: 3816306748.

Schuh et al. 2012

Schuh, G., Lenders, M., Nußbaum, C., Rudolf, S. „Produktarchitekturgestaltung“. In: *Handbuch Produktion und Management 3*. Hrsg. von G. Schuh. Berlin: Springer, 2012, S. 115–160. ISBN: 3642250505.

Schumpeter 1934

Schumpeter, J. A. *The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle*. Bd. 55. Transaction publishers, 1934.

Schwaber 2004

Schwaber, K. *Agile project management with Scrum*. Bd. 7. Microsoft press Redmond, 2004.

Schwaber & Sutherland 2013

Schwaber, K., Sutherland, J. *The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum : The Rules of the Game*. 2013.

Schweitzer 1989

Schweitzer, G. *Mechatronik: Aufgaben und Lösungen*. Bd. Nr 787. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI Verlag, 1989.

ScMI AG 2014

ScMI AG. *Unternehmensporträt*. Paderborn, 2014.

Sedchaicharn 2010

Sedchaicharn, K. „Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 45. Dissertation. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2010. ISBN: 1615-8113.

Stachowiak 1973

Stachowiak, H. *Allgemeine Modelltheorie*. Springer-Verlag, 1973. ISBN: 9783211811061.

Szélig & Schabacker 2012

Szélig, N., Schabacker, M. „Bestimmung des Maßes der Parallelisierung von Prozessen bei einem Tri-Prozessmodellierungswerkzeug. Simultaneous Engineering“. In: *M. Maurer, S.-O. Schulze (Hg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten. Tag des Systems Engineering. Paderborn 7.9 (2012)*.

Takeuchi & Nonaka 1986

Takeuchi, H., Nonaka, I. „The new new product development game“. In: *Harvard business review* 64.1 (1986), S. 137–146.

Tang 2009

Tang, W. „Meta Object Facility“. In: *Encyclopedia of Database Systems*. Springer, 2009, S. 1722–1723.

Thomke & Fujimoto 2000

Thomke, S., Fujimoto, T. „The Effect of Front-Loading Problem-Solving on Product Development Performance“. In: *Journal of Product Innovation Management* 17.2 (2000), S. 128–142. ISSN: 07376782.

Tschöke 2015

Tschöke, H. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. 2015.

Ulrich 1995

Ulrich, K. „The role of product architecture in the manufacturing firm“. In: *Research policy* 24.3 (1995), S. 419–440.

VDI - Verein Deutscher Ingenieure 1993

VDI - Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.* 1993.

VDI - Verein Deutscher Ingenieure 2004 – . VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 2004.**Verworn 2005**

Verworn, B. *Die frühen Phasen der Produktentwicklung: Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik.* 1. Aufl. Gabler Edition Wissenschaft : Forschungs-, Entwicklungs-, Innovations-Management. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2005. ISBN: 9783824482481.

Verworn & Herstatt 2007

Verworn, B., Herstatt, C. „Bedeutung und Charakteristika der frühen Phasen des Innovationsprozesses“. In: *Management der frühen Innovationsphasen.* Hrsg. von C. Herstatt, B. Verworn. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2007. ISBN: 9783834903754.

Voith GmbH 2014

Voith GmbH. *Halbjahresbericht 2014.* Heidenheim, 2014.

Weber 2005

Weber, C. „What Is 'Complexity'?“ In: *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design: Melbourne.* Hrsg. von A. Samuel, W. Lewis. Barton & A.C.T: Engineers Australia, 2005, S. 1785–1796.

Weck et al. 2007

Weck, O. de, Eckert, C. M., Clarkson, P. J. „A Classification of Uncertainty for Early Product and System Design“. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design.* Hrsg. von J.-C. Bocquet. 2007.

Weilkiens 2008

Weilkiens, T. *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design.* 2. Aufl. Heidelberg: dpunkt, 2008. ISBN: 3898645770.

Weilkiens & Soley 2014

Weilkiens, T., Soley, R. M. *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur.* 3., überarb. und aktualisierte Aufl. Heidelberg: dpunkt.verl., 2014. ISBN: 9783864900914.

Weiß 2006

Weiß, S. „Konzept und Umsetzung eines Navigators für Wissen in der Produktentwicklung“. In: *Fortschritt-Berichte VDI.* Bd. 386. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2006. ISBN: 3183386011.

Wesner 1977

Wesner, E. *Die Planung von Marketing-Strategien auf der Grundlage des Modells des Produktlebenszyklus*. Freie Universität, 1977.

Wintergerst 2015

Wintergerst, E. „Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 86. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISBN: 1615-8113.

Winzer 2013

Winzer, P. *Generic Systems Engineering: Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. SpringerLink : Bücher. Berlin: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 364230365X.

Woyak 2007

Woyak, S. *CAD Fusion: Bridging the Handoff from Conceptual to Preliminary Design: ModelCenter White Paper*. 2007.

Wynn et al. 2007

Wynn, D., Eckert, C. M., Clarkson, P. J. „Modelling Iteration in engineering Design“. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design*. Hrsg. von J.-C. Bocquet. 2007.

Zingel 2013

Zingel, C. „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“. In: *IPEK - Forschungsberichte*. Hrsg. von A. Albers. Bd. 70. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013. ISBN: 1615-8113.

Betreute Abschlussarbeiten

Bauer 2015

Bauer, R. „Konzeptionierung eines standardisierten Bemusterungs- und Informationsprozesses im Produktentstehungsprozess eines OEM am Beispiel der Porsche AG“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Bachelorarbeit*. Bd. 2897. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Bichler 2014

Bichler, M. „Erarbeitung eines standardisierten Anlaufmanagementkonzepts am Beispiel der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Bachelorarbeit*. Bd. 2563. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N., Butenko, V. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Birk 2013

Birk, C. „Betrachtung des Unsicherheitsdilemmas in der frühen Phase der Produktentstehung anhand des erweiterten ZHO-Modells“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Bachelorarbeit*. Bd. 2364. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013.

Birk 2015 – . „Methode zur Einführung von Baukastensystemen unter der Berücksichtigung von Rentabilität“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N., Muschik, S. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Dreyer 2015

Dreyer, E. „Konzept zur Absicherung neuer Antriebskonzepte und Technologien im Elektrofahrzeug am Beispiel der Porsche AG“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Bd. 3020. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Gerbode 2015

Gerbode, P. „Ansatzes einer vergleichenden Analyse von Referenzprodukten in der Produktgenerationsentwicklung“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Bd. 2364. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Walter, B., Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Kurowicki 2013

Kurowicki, L. „Untersuchung von Objektsystemen und Einsatzfähigkeitsbewertung von SysML in der Frühen Phase der Baukastenentwicklung“. In: *Bachelorarbeit*. Gutachter: Frech, J. ; Co-Betreuer: Lüdcke, R., Bursac, N. DHBW, 2013.

Li 2014

Li, J. „Implementierung einer Applikation zur individuellen Methodenunterstützung basierend auf dem integrierten Produktentstehungsmodell“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Bachelorarbeit*. Bd. 2908. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Reiß, N., Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Mair 2013

Mair, M. „Optimierung des Transfers von Technologien in das Entwicklungsressort von Industrieunternehmen“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Bd. 2410. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Maul, L., Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013.

Marrone 2014

Marrone, G. „Prozessoptimierung in der Produktentwicklung des 3D-Toleranzmanagements am Fallbeispiel Porsche Engineering“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Diplomarbeit*. Bd. 2558. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Rachenkova 2014

Rachenkova, G. „Untersuchung der Eignung von SysML zur Unterstützung der Baukastenentwicklung am Fallbeispiel der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Bd. 2634. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Rieger 2015

Rieger, F. „Entwicklung einer einfachen und hoch energieeffizienten mechanischen Haltevorrichtung für einen Elektrotriebemotor“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Bd. 2979. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N., Gladysz, B. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Schmitt 2015

Schmitt, T. „Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung am Beispiel von ThyssenKrupp“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Masterarbeit*. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

Sprenger 2013

Sprenger, T. „Multidimensionale Skalierung als Methode zur strategischen Unterstützung der frühen Phase der Produktentwicklung“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Diplomarbeit*. Bd. 2407. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013.

Starz 2014

Starz, J. „Dynamische Bewertung von Zielsystemen in der Produktentwicklung von komplexen technischen Systemen“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Bachelorarbeit*. Bd. 2645. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Kurrle, A., Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Thieltges 2014

Thieltges, S. „Prozessoptimierung mithilfe von SPALTEN am Beispiel der Ersatzteilversorgung der Daimler AG“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Diplomarbeit*. Bd. 2501. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Gladysz, B., Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Wilhelm 2013

Wilhelm, J. „SysML Modell des virtuellen Innovations-Trainers (InnoCoach) – Erstellung eines SysML Modells zur Unterstützung des BMBF Projekts IN2“. In: *IPEK - Abschlussarbeiten: Bachelorarbeit*. Bd. 2500. Betreuer: Albers, A; Co-Betreuer: Bursac, N. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013.

Will 2014a

Will, J. „Integration und Optimierung eines bedarfsgerechten Änderungsmanagementsystems in der Frühen Phase der Baukastenentwicklung“. In: *Bachelorarbeit*. Gutachter: Döttling, S. ; Co-Betreuer: Lüdcke, R., Bursac, N. DHBW, 2014.

Will 2014b – . „Unterstützung des Baukastenmanagements mit Hilfe einer aktivitätenbasierten Modellierung“. In: *Semesterarbeit*. Betreuer: Bursac, N., Grundmann, M. DHBW, 2014.

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
C&C²-A	Contact und Channel Approach
DRM	Design Research Methodology
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
GfSE	Gesellschaft für Systems Engineering
IN²	Von der Information zur Innovation
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IPEK	Institut für Produktentwicklung
IPEK-XiL	IPEK-X-in-the-Loop
iPeM	integrierte Produktentstehungsmodell
IPRI	International Performance Research Institute
MA	Mitarbeiter
MBSE	Model Based Systems Engineering
MOF	Meta Object Facility
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OMG	Object Management Group
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product Lifecycle Management

Porsche AG	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
RAID	Redundant Array of Independent Disks
SE	Systems Engineering
SPALTEN	Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen, Nachbereiten und Lernen
SUV	Sport Utility Vehicle
SysML	Systems Modeling Language
TbD	Test-based-Development
UML	Unified Modeling Language
URL	Uniform Resource Locator
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VW	Volkswagen AG
WiGeP	Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung
WMS	Wissensmanagementsysteme
ZHO	Ziel-, Handlungs- und Objektsystem

Abbildungsverzeichnis

1.1	Forschungsfeld und relevante angrenzende Forschungsfelder	3
1.2	Aufbau der vorliegenden Arbeit	4
2.1	Produkt- und Prozessmodelle im Systems Engineering	7
2.2	Reduktions-Dilemma: Verkürzung und Ganzheitlichkeit	8
2.3	Konzepte der Systemtheorie nach ROPOHL	9
2.4	Produktentstehung und -Verwendung als sozio-technisches System nach ROPOHL	11
2.5	Stage-Gate-Ansatz nach COOPER	13
2.6	Sequenzielle (A) und überlappende Phasen (B & C) nach TAKEUCHI . .	14
2.7	Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach der VDI-Richtlinie 2221	15
2.8	V-Modell als Makrozyklus nach der VDI-Richtlinie 2206	17
2.9	Sechs Sichtweisen auf Iterationen im PEP nach WYNN et al.	18
2.10	Scrum Framework nach SCHWABER	19
2.11	ZHO-Modell bestehend aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem	21
2.12	Das erweiterte ZHO-Modell nach ALBERS et al.	23
2.13	Schematische Darstellung des Projektfortschritts bei klassischer und kon- tinuierlicher Validierung	24
2.14	iPeM - integriertes Produktentstehungsmodell nach ALBERS	26
2.15	Abstraktionsgrade des iPeM	27
2.16	C&C ² -A-Modell der Funktion Schraube in Wand drehen	28
2.17	Trennung von Sicht und Modell im MBSE	30
2.18	Lebenszyklen von Produktgenerationen nach WESNER	36
2.19	KANO-Modell nach BAILOM	37
2.20	Beispiele für Produktgenerationsentwicklungen: Druckmaschine und Zwei- massenschwungrad	41
2.21	Lagerung der ersten und zweiten Produktgeneration des Zweimassen- schwungrads modelliert mit dem C&C ² -A-Ansatz	41
2.22	Schematische Darstellung der Frühen Phasen einer Produktgenerati- onsentwicklung und der dazugehörigen Vorentwicklung eines (Teil-)Systems	46
2.23	Schematische Darstellung eines Baukastens und eines auf dem Bau- kasten basierenden Produkts	55
2.24	Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden	56
2.25	Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden am Beispiel eines Werkzeugmaschinen Baukastens	57
2.26	Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Produkten, dem Baukasten-Regelwerk und den Bausteinen	58

2.27 Vorgehensmodell zur Gestaltung von Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen	60
2.28 Ablaufdiagramm zur Erstellung einer Modulstruktur	61
2.29 Entwicklungsprozesse des Baukastens und der Produkte	62
2.30 Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung	65
3.1 „Spiral of Applied Research“ im Kontext dieser Arbeit	70
3.2 DRM im Kontext der vorliegenden Arbeit	71
3.3 Integrated Design Support Development Modell im Kontext dieser Arbeit	73
3.4 Zusammensetzung des IN ² -Konsortiums	76
3.5 Produktpalette der Porsche AG	77
3.6 Vorgehensweise im Kontext der vorliegenden Arbeit	78
4.1 Bewertung der Aussage 1 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables	82
4.2 Bewertung der Aussage 2 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables	83
4.3 Bewertung der Aussage 3 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables	83
4.4 Bewertung der Aussage 4 durch die Teilnehmer des Portfoliomanagement Roundtables	84
4.5 Verteilung der Befragten anhand der Branchen	86
4.6 Verteilung der Befragten anhand der Unternehmensgröße	86
4.7 Entwicklungsfokus der Unternehmen: Zwischen reiner Anpassungskonstruktion (1) und kompletter Neukonstruktion (100) im Sinne von PAHL & BEITZ	87
4.8 Entwicklungsfokus der Unternehmen geclustert nach Branchen	88
4.9 Entwicklungsfokus der Unternehmen gruppiert nach Unternehmensgröße (links) und -alter (rechts)	89
4.10 Überblick über aktuelle (links) und abgeschlossene Projekte (rechts) aufgetragen über unterschiedliche Unternehmensgrößen	89
4.11 Tag Cloud Analyse der Nennungen der meistgenutzten WMS	90
4.12 Gruppierung der Nennungen zu den meistgenutzten WMS	91
4.13 Bewertung der meistgenutzten WMS hinsichtlich der Effizienz der Daten Ein- und -Ausgabe, der Struktur, der Anwenderfreundlichkeit und der Sicherheit	92
4.14 Exemplarische Darstellung von Prozesslandkarten des Gesamtprozesses (1) sowie der Subprozesse (2-4)	95

4.15 Dreistufiges Vorgehen zur Prozessanalyse: (1) Workshop zur Prozessaufnahme, (2) Digitalisierung mithilfe der Modellierungstechnik, (3) Überführung in das iPeM	96
4.16 Anzahl der analysierten WMS und Objektarten im PEP	97
4.17 Verteilung des Anteils von kumulierter Objektarten über die kumulierten WMS	98
4.18 Durchschnittliche Anzahl der WMS, in denen ein Objekt gespeichert wird	99
4.19 Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Porsche Typ „911“ . . .	100
4.20 Vorgehen zur Untersuchung der Produktmodelle und der WMS: (1) Steckbriefe der WMS; (2) SysML Modelle der WMS; (3) WMS-Landkarte . .	101
4.21 Deduktive Ableitung von Konzepten anhand einer Struktur und induktive Ergänzung der Struktur z. B. durch neue Zielwerte	103
4.22 Iterationen bei der Baukasten- und Konzeptentwicklung	104
4.23 Abbildung der Produktmodelle in unterschiedlichen WMS	105
4.24 Durchgängiges Referenz-Produktmodell	106
4.25 Drei empirische Studien der Deskriptiven Studie I	108
5.1 Instanziierung des iPeM	111
5.2 Abstraktionsgrade des iPeM	112
5.3 Abstraktionsgrade der Instanziierung	114
5.4 Abstraktionsgrade der Individualisierung	115
5.5 Produktmodellierungs-Framework	116
5.6 Elemente der Baukastenentwicklung im Produktmodellierungs-Framework	124
5.7 Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Referenz-Produktmodell am Beispiel von Lego	125
5.8 Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Referenz-Produktmodell	125
5.9 Zusammenhang zwischen Referenz-Produktmodellen und dem Baukasten-Referenzmodell	126
5.10 Zusammenhang zwischen Referenz-Produktmodellen und dem Referenz-Baukastenmodell	127
5.11 Übertragbarkeit der Referenz-Produktmodelle: (1) bijektive Funktion, (2) injektive Funktion (3) surjektive Funktion, (4) keine Funktionen	128
5.12 Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Baukastenmodell . . .	129
5.13 Zusammenhang zwischen Produktmodellen und Baukastenmodell . . .	130
5.14 Produktmodellierungs-Framework	132
6.1 Produktmodellierungs-Framework im Kontext der Baukastenentwicklung	134
6.2 Komponenten-Sicht des Referenz-Produktmodells modelliert mit SysML: Auszug aus dem hierarchischen Konzept der Systemtheorie (links) und der Aufbereitung im strukturalen Konzept (rechts)	135

6.3	Erste Ebene der Zielsystem-Sicht des Referenz-Produktmodells im strukturalen Konzept der Systemtheorie modelliert mit SysML	136
6.4	Darstellung der Referenz-Produktmodelle, der Produkte und des Baukastens mit SysML	138
6.5	Portalkratzer in der Zentralkokerei Saar	139
6.6	Abhängigkeit von Anforderungen, Funktionen und Komponenten	141
6.7	Referenz-Produktmodell der Kratzerschaufel mit unterschiedlichen Ausprägungen	142
6.8	Matrixbasierte Darstellung der Kratzerschaufeln über die Produkte (links) und Häufigkeitsverteilung der Schaufeln (rechts)	143
6.9	Matrixbasierte Darstellung der Förderleistung über die Produkte (links) und Häufigkeitsverteilung der Förderleistung (rechts)	144
6.10	Evaluation des Frameworks in der Entwicklungspraxis	146
7.1	Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung	148
7.2	Drei empirische Studien der Deskriptiven Studie I	149
7.3	Produktmodellierungs-Framework	150
7.4	Evaluation des Produktmodellierungs-Frameworks in der Entwicklungspraxis	151
7.5	Einordnung von Forschungsarbeiten der Karlsruher Schule in das Produktmodellierungs-Framework	153

Tabellenverzeichnis

2.1	Merkmale der Frühen Phase nach VERWORN	42
2.2	Definitionen der Frühen Phase	44
2.3	Definitionen des Begriffs Modul	49
2.4	Definitionen des Begriffs Plattform	50
2.5	Definitionen von Baureihen	51
2.6	Definitionen von Baukästen	53
2.7	Merkmale von Baukästen	54
3.1	Typen von technikorientierten Forschungsprojekten	71
3.2	Steckbrief zur Forschungsmethode: Fragebogen	73
3.3	Steckbrief zur Forschungsmethode: retrospektives Protokoll	74
3.4	Steckbrief zur Forschungsmethode: teilnehmende Beobachtung	74
3.5	Steckbrief zur Forschungsmethode: Fallstudie	75
4.1	Elemente der Modellierungstechnik zur Repräsentation von Informati- onsflüssen im Produktentstehungsprozess	94

Glossar

1	Definition (Systems Engineering)	6
2	Definition (System)	10
3	Definition (Zielsystem)	22
4	Definition (Handlungssystem)	22
5	Definition (Objektsystem)	22
6	Definition (Produktgenerationsentwicklung)	37
7	Definition (Referenzprodukt)	38
8	Definition (Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung)	45
9	Definition (Modul)	49
10	Definition (Plattform & Hut)	51
11	Definition (Baureihe)	52
12	Definition (Baukasten)	53

Lebenslauf

Persönliche Daten

Vor- und Nachname Nikola Bursać
Geboren am 9. Juli 1986 in Bihać, Bosnien
Staatsangehörigkeit deutsch
Familienstand verheiratet

Bildungsweg

1997 - 2006 Gymnasium in der Taus (allg. Hochschulreife)
2007 - 2012 Studium Maschinenbau (Dipl.-Ing.),
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Abschluss mit Auszeichnung

Berufstätigkeit

2008 - 2010 Hilfwissenschaftlicher Mitarbeiter,
IPEK - Institut für Produktentwicklung,
Institut für Technische Mechanik,
Institut für Algebra und Geometrie,
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

2010 - 2011 Industriepraktikum bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG,
Abteilung für Innovationsmanagement und Wettbewerbsanalyse

2011 - 2012 Diplomarbeit in Kooperation mit der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Abteilung für Innovationsmanagement und Wettbewerbsanalyse

seit 2013 Selbstständiger Dozent,
für Qualitätsmanagement und für Projektmanagement,
bei der Sommerhoff AG;
für Variantenmanagement,
an der Dualen Hochschule Baden Württemberg (DHBW)

seit 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
IPEK - Institut für Produktentwicklung,
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
03/2015 Leiter der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik
und -management (EMM),
11/2015 Leiter der Forschungsabteilung CAE & EMM