

Helmut Scherer

Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen

Model Based Methods for the Modeling of the System of Objectives and the Correlation between Form and Function to support the Series Development of Modular Systems Using the Example of Hybrid Powertrains

Band 97

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Forschungsberichte



Helmut Scherer

Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen

Model Based Methods for the Modeling of the System of Objectives and the Correlation between Form and Function to support the Series Development of Modular Systems Using the Example of Hybrid Powertrains

Band 97

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt- Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen

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

genehmigte
Dissertation

von

Helmut Scherer
aus Landstuhl

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Juli 2016
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. M. Eigner

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 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 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

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

Vorwort zu Band 97

Die modernen Produkte im Fahrzeug- und Maschinenbau sind hochkomplexe mechatronische Systeme, deren Entwicklung eine große Herausforderung darstellt. Die globalen Märkte haben sich zu Käufermärkten entwickelt, auf denen für jede Nachfrage vielfältige Angebote diverser Hersteller zur Verfügung stehen. Das heißt, dass sich die Wettbewerbssituation zunehmend in allen Gebieten verschärft hat. Dies gilt natürlich auch für den Fahrzeugbau. Gleichzeitig ist die Entwicklung des Fahrzeugbaus geprägt durch eine zunehmende Vielfalt von Antriebslösungen, um den Emissionsansprüchen gerecht zu werden. Ferner werden den Kunden durch eine zunehmende Individualisierung immer mehr Produktalternativen und -varianten angeboten, um so im Wettbewerb bestehen zu können. Dieses gesamte Szenario führt zu einem komplexen und vernetzten Entwicklungsprozess. Wenn dann noch die Lieferantenbeziehungen in der Automobilindustrie über Tier 1-, Tier 2- und Tier 3-Zulieferer berücksichtigt werden, entsteht ein sehr komplexes Beziehungsnetzwerk. Die Produkte werden in Produktgenerationen entwickelt. Die Produktgenerationsentwicklung – PGE nach Albers postuliert, dass auf der Basis von Referenzprodukten – dies können eigene ältere Produktgenerationen sein oder auch diverse Wettbewerbsprodukte – die neue Produktgeneration durch drei grundlegende Variationsarten entsteht, die in jedem Produkt in unterschiedlichen Anteilen, bezogen auf die Teilsysteme, gleichzeitig auftreten. Diese Variationsarten sind die Lösungsfindung, ausgehend von einer Prinzipvariation, einer Gestaltvariation, oder einer Übernahmevariation. Jene grundlegende Beziehung in modernen komplexen Produkten muss also immer heruntergebrochen werden auf die Teilsysteme. Die Teilsysteme unterscheiden sich in ihrem Charakter und der Entwicklungsstrategie. Im Sinne der PGE ist eine „disruptive Innovation“ nur eine extreme Variante der PGE mit sehr hohem Prinzipvariationsanteil und kann daher mit dem gleichen Modell beschrieben werden.

Ein wichtiges Teilsystem im Fahrzeugbau ist z. B. der Hybrid-Antriebsstrang. Um hier zu flexiblen Lösungen zu kommen, kann als Entwicklungsprinzip die Baukastenentwicklung verwendet werden. Dabei entstehen allerdings komplexe Wechselwirkungen, da Teilsysteme, die in Baukästen entwickelt werden, oft in unterschiedlichen Fahrzeuglinien mit unterschiedlichen Entwicklungsgenerationen und unterschiedlichen Entwicklungshorizonten verwendet werden müssen. Hier durch modellbasierte Methoden eine entsprechende Modellierung des Zielsystems darzustellen, ist eine Herausforderung, der sich Herr Dr.-Ing. Helmut Scherer in seiner wissenschaftlichen Arbeit gestellt hat. Durch modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen für Fahrzeugantriebe, die er auf

der Basis der „KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung“ mit ihren grundlegenden Vorgehensweisen und Elementen entwickelt, leistet er einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag zum Umgang mit der Komplexität moderner mechatronischer Produktentwicklungen und kann durch die gleichzeitige Validierung des Vorgehens im Zuge realer Entwicklungsprojekte in einem Unternehmen auch die Praxisrelevanz seines Ansatzes zeigen.

Juli, 2016

Albert Albers

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Modellierungsmethoden für Baukasten-Zielsysteme (mit Entwicklungszielen, Anforderungen und Randbedingungen) und für Funktions-Gestalt-Zusammenhänge (für die Weitergabe von Lösungswissen) zur Unterstützung der Baukastenentwicklung vorgestellt und in der Serienentwicklung von Hybrid-Triebstrangbaukästen eingesetzt.

Die Entwicklung von Baukästen ist eine zielführende und etablierte Maßnahme in der Automobilindustrie, um die Vielfalt angebotener Fahrzeugvarianten zu erhöhen bei gleichzeitiger Senkung der internen Teilevielfalt. Allerdings steigert das Baukastenprinzip die Komplexität der Entwicklung: Ein Baustein muss nun den Zielen, Anforderungen und Randbedingungen mehrerer Fahrzeuge genügen (gestiegene inhaltliche Abhängigkeiten). Überdies werden die Fahrzeuge meist nicht zeitgleich, sondern zeitversetzt entwickelt (erhöhte Unsicherheit aufgrund von Zeitversatz). Um die dadurch erhöhte Komplexität in der Baukastenentwicklung besser handhabbar zu machen, kommt in der vorliegenden Arbeit der Ansatz der Modellbasierten Systementwicklung (MBSE) zum Einsatz.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wird eine baukastengerechte Modellierungsmethode für Zielsysteme entwickelt (Anforderungsmanagement). Diese Modellierungsmethode wird in der Produktgenerationsentwicklung eingesetzt, um ein Zielsystem-Referenzmodell für Hybrid-Triebstrangbaukästen zu erstellen. Aus diesem Referenzmodell können projektspezifische Baukasten-Zielsystemmodelle für mehrere unterschiedliche Hybridtriebstrang-Topologien abgeleitet werden. Dabei kann ein Großteil der enthaltenen Ziele, Anforderungen und Randbedingungen wiederverwendet werden. Die Methode ermöglicht weiterhin die Steigerung der Qualität sowie eine bessere Einschätzung der Unsicherheit von Baukasten-Zielen.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird eine Modellierungsmethode entwickelt, die den Funktions-Gestalt-Zusammenhang mithilfe des C&C²-Ansatzes in der Modellierungssprache SysML darstellen kann. Es wird das Modell eines Hybridmoduls erstellt, das die Weitergabe von Lösungswissen in der Produktgenerationsentwicklung über den Verlauf einer Baukasten-Serienentwicklung ermöglicht (Wissensmanagement). Aufgrund der bislang unerforschten Anwendung von SysML-Modellen in der Serienentwicklung wird die Akzeptanz der Methode in einem Praxistest empirisch ermittelt und evaluiert. Dazu wird der Nutzen der Modelle in Form von Entwickler-Feedback dem Aufwand in Form von Modellierungszeiten gegenübergestellt. Während der Nutzen des SysML-Modells positiv bewertet wird, fällt der Modellierungsaufwand vergleichsweise hoch aus. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden die Ursachen des Aufwands ermittelt sowie mögliche Abhilfemaßnahmen und weiterführender Forschungsbedarf diskutiert.

Abstract

Within this research work, modeling methods are developed with their focuses on systems of objectives of modular systems (including objectives, requirements and constraints) and on the correlation between form and function (to ensure knowledge transfer) to support the development of modular systems. These methods are applied within the series development of a modular system for hybrid drivetrains.

The development of modular systems is a productive and well-established measure in the automotive industry to increase the diversity of vehicle types offered and to lower the variety of components in-house at the same time. However, the modular principle increases complexity within product development: one module now must satisfy the objectives, requirements and constraints of several vehicles, i.e., there are increased dependencies with regards to content. Furthermore, vehicles using the same modular system are usually not developed simultaneously, but with offset program milestones. This leads to an increased uncertainty due to time offsets. In order to handle this increased complexity within modular system development, the Model Based Systems Engineering (MBSE) approach is applied.

In the first portion of this thesis, a modeling method is developed suitable for systems of objectives for modular systems. This modeling method is then applied in product generation engineering to generate a reference model of the system of objectives for modular hybrid drivetrain systems. Out of this reference model, project-specific models of the system of objectives can be derived for various hybrid drivetrain layouts. Throughout this process, the majority of the objectives, requirements and constraints can be reused. In addition, the method can help to increase quality as well as enable a better evaluation of the uncertainty of objectives for modular systems.

In the second portion of this thesis, a modeling method is developed which is able to describe the correlation between function and form, using the C&C² approach and the modeling language SysML. This method is applied to create a model of a hybrid module, which is utilized to ensure knowledge transfer in product generation engineering during the course of a multi-year series development of modular systems. Since there are limited research results to date concerning the application of SysML models within series development, the acceptance of the method is investigated, evaluated by a practical test within a vehicle manufacturer. To this end, the benefit of the models in terms of the developers' feedback is compared to the effort in terms of the required modeling time. While the use of the SysML model is viewed positively, the modeling effort is seen as relatively high. Based on these insights, the origins of these efforts are identified; feasible counter-measurements and further research need are also discussed.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe und als Entwicklungsingenieur für alternative Antriebe der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers herzlich danken für die Ermöglichung und Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit. Seine Ideen und Impulse haben diese Arbeit sowie meine Denkweise in vielerlei Hinsicht geprägt. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner für die Übernahme des Korreferats sowie die wertvollen Diskussionen bedanken.

Auch sei den Herren Dr.-Ing. Leo Spiegel, Immo Stache und Boris Knobloch für die unternehmensseitige Betreuung meiner Arbeit herzlich gedankt.

Weiterhin danke ich dem IPEK-Team, insbesondere den Forschungsgruppen Systemische Mobilität sowie Entwicklungsmethodik und -management. Die konstruktive Arbeitsatmosphäre und die erkenntnisreichen Diskussionen werde ich in guter Erinnerung behalten. Auch den Kolleginnen und Kollegen der Porsche AG möchte ich danken für die wertvollen Impulse aus Sicht der Entwicklungspraxis. Ein großer Dank geht ebenso an die Studierenden, deren Abschlussarbeiten ich betreut habe und die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die sowohl mich als auch mein Promotionsvorhaben in jedweder Hinsicht gefördert hat. Ihre Unterstützung und ihr immerwährender Zuspruch waren mir stets ein unverzichtbarer Rückhalt.

Ludwigsburg, im Juli 2016

Helmut Scherer

„Wissen in Teilen macht eine schöne Geschichte,
aber Weisheit entsteht, wenn wir das Ganze sehen.“

Aus einem chinesischen Kinderbuch²

² Ed Young: *7 blinde Mäuse*. Beltz & Gelberg, Basel, 2007.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1	Hybridfahrzeuge.....	5
2.1.1	Motivation, Grundlagen	5
2.1.2	Zwischenfazit	9
2.2	Methoden der Produktentwicklung	9
2.2.1	Systems Engineering und Modellbasierte Systementwicklung	10
2.2.2	Produktgenerationsentwicklung.....	16
2.2.3	Allgemeiner Problemlösungsprozess SPALTEN	17
2.2.4	Integriertes Produktentstehungsmodell	18
2.2.5	Modellierungsframework	23
2.2.6	Zwischenfazit	26
2.3	Entwicklung von Baukästen	26
2.3.1	Motivation, Grundlagen, Definitionen.....	27
2.3.2	Aktivitäten, Herausforderungen, Methoden	31
2.3.3	Komplexität in der Entwicklung von Baukästen	35
2.3.4	Zwischenfazit	40
2.4	Anforderungsmanagement.....	40
2.4.1	Motivation, Grundlagen, Definitionen.....	41
2.4.2	Aktivitäten, Herausforderungen, Methoden	44
2.4.3	Modellbasierte Ansätze	54
2.4.4	Anforderungsmanagement in der Entwicklung von Baukästen.....	56
2.4.5	Zwischenfazit	58
2.5	Funktions-Gestalt-Zusammenhang	58
2.5.1	Motivation, Grundlagen, Definitionen.....	58
2.5.2	Aktivitäten, Herausforderungen, Methoden	62
2.5.3	Modellbasierte Ansätze	66
2.5.4	Systems Modeling Language	68
2.5.5	Zwischenfazit	74
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	75
3.1	Forschungsbedarf, Hypothesen, Forschungsfragen.....	75
3.2	Forschungsumgebung	79
3.3	Forschungsdesign.....	79
4	Modellierung von Baukasten-Zielsystemen	85
4.1	Ziele der Methode	85
4.2	Validierung der Methoden-Ziele	88
4.3	Modellierungsmethode.....	91

4.3.1	Baukastengerechte Struktur.....	92
4.3.2	Modellierung des Zielsystems.....	97
4.3.3	Referenzmodell.....	102
4.3.4	Explikation von Unsicherheit.....	104
4.3.5	Anwendungsfallanalyse mit SPALTEN.....	107
4.3.6	Checklisten und Vorlagen.....	108
4.3.7	Formulierungsleitfäden.....	108
4.4	Implementierung und Anwendung.....	111
4.4.1	Implementierung ins Tool.....	111
4.4.2	Implementierung ins Unternehmen.....	114
4.4.3	Anwendung im Unternehmen.....	116
4.5	Diskussion und Zwischenfazit.....	121
5	Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs.....	123
5.1	Ziele der Methode.....	123
5.2	Modellierungsmethode.....	126
5.3	Anwendung und initiales Systemmodell.....	131
5.3.1	Umfang des initialen Systemmodells.....	131
5.3.2	Anwendung des initialen Systemmodells.....	132
5.3.3	Ergebnisse der Verifikation.....	137
5.4	Validierung der Methode.....	138
5.4.1	Impact Model.....	139
5.4.2	Experteninterviews.....	144
5.4.3	Praxistest.....	147
5.5	Diskussion und Zwischenfazit.....	163
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	165
6.1	Zusammenfassung.....	165
6.2	Ausblick.....	167
7	Anhang A: Modellierung von Baukasten-Zielsystemen.....	170
7.1	Zielsystemmodellierung nach ALBERS ET AL.....	170
7.2	Hauptmerkmaliste.....	171
8	Anhang B: Fragebogen zum Anforderungsmanagement.....	172
8.1	Fragen.....	172
8.2	Auswertungen.....	174
9	Anhang C: Ansichten und Beispiele des SysML-Modells.....	178
9.1	Auszüge aus Bau- und Funktionsstruktur.....	178
9.2	Beispiele für Funktionen und Lessons Learned in SysML.....	180
9.2.1	Fallbeispiel 1: Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten.....	180
9.2.2	Fallbeispiel 2: Werkstoffänderung am Trennkupplungs-Aktuator.....	182

9.2.3 Fallbeispiel 3: Optimierung der Entwärmung des Stators der E-Maschine	186
Literaturverzeichnis	190
Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten	212
Abbildungsverzeichnis	213

1 Einleitung

Das Automobil ist aus modernen Industriegesellschaften nicht mehr wegzudenken. Zahlreiche aufstrebende Wirtschaftsnationen sorgen zusätzlich für eine wachsende Fahrzeugnachfrage weltweit. Im Wandel der Zeit steht die profitable Entwicklung und Herstellung qualitativ hochwertiger Fahrzeuge vor immer neuen Herausforderungen. Eine davon ist die Veränderung der Absatzmärkte zu globalisierten Käufermärkten: Der Individualisierungswunsch der Kunden sowie differenzierte Käufergruppen mit heterogenen Wünschen sorgen für einen hohen Bedarf an Produktvarianz und fordern die Hersteller zur Erschließung von Produktnischen auf³.

Die Fahrzeughersteller stehen also vor der Aufgabe, die Vielfalt der angebotenen Fahrzeuge auszuweiten. Ohne das Ergreifen weiterer Maßnahmen würde jedoch diese Steigerung der Produktvielfalt zu einer erheblichen Verteuerung vieler unternehmensinterner Abläufe führen. In diesem Kontext bietet das **Baukastenprinzip** den Herstellern einen Ansatz, mit dem ein breites Spektrum unterschiedlicher Produkte (externe Vielfalt) auf Basis weniger Bausteine (interne Vielfalt) angeboten werden kann. Deswegen konnten sich die modulare Bauweise und die Entwicklung von Baukästen in jüngerer Vergangenheit in der Automobilindustrie immer stärker durchsetzen⁴.

Eine weitere Herausforderung für die Fahrzeughersteller ist die Einhaltung der immer strengeren Emissionsgesetzgebung. Während das Potenzial zur Reduktion von Emissionen bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen immer weiter ausgeschöpft ist, bieten **Hybridfahrzeuge** eine deutliche Verringerung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs⁵. Solche Hybridfahrzeuge sind häufig – analog zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen – nach dem Baukastenprinzip aufgebaut, um die Kosten der vergleichsweise aufwändigen Technologie zu vermindern.

Neben den Chancen, die das Baukastenprinzip in der Automobilindustrie bietet, bringt die Entwicklung von Baukästen neue Herausforderungen mit sich. Damit nämlich ihre Vorteile zum Tragen kommen, ist es erforderlich, dass die Entwicklung neuer, unterschiedlicher Fahrzeuge mithilfe weniger standardisierter Bausteine erfolgt. Wie ALBERS jedoch in seiner ersten zentralen Hypothese aufgezeigt hat, ist

³ Neubauer 2012; Schuh, Arnoscht & Schiffer 2012; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009;

⁴ Vgl. z. B. Hoffmann & Vietor 2014

⁵ Pflieger 2015

jeder Produktentwicklungsprozess einzigartig und individuell, d. h. jede dieser Fahrzeugentwicklungen ist geprägt von spezifischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen⁶. Darum ist in der Entwicklung von Baukästen – mehr noch als in der Entwicklung konventioneller Fahrzeuge – eine frühzeitige und langfristige Planung des Fahrzeugportfolios nötig⁷. Eine solche Planung findet aber unter einer hohen Unsicherheit statt, da zu solch einem frühen Zeitpunkt die benötigten technischen und wirtschaftlichen Ziele und Rahmenbedingungen noch nicht vollständig bekannt sind⁸.

Die vorliegende Arbeit vertieft die oben genannten Überlegungen weiter. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse sollen Komplexitätstreiber in der Baukastenentwicklung genauer identifiziert werden. Daraufhin werden neue Methoden zur Handhabung der Komplexität in der **Serienentwicklung von Baukästen** als ein Beitrag zur Karlsruher Schule entwickelt. Hierfür wird der Ansatz der **Modellbasierten Systementwicklung** (MBSE) eingesetzt.

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit werden zwei inhaltliche Schwerpunkte gebildet, die stets im Kontext der **Produktgenerationsentwicklung** untersucht werden: Zum einen soll im **Anforderungsmanagement** eine modellbasierte Methode entstehen, die dabei hilft, die gestiegene Komplexität von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen von Baukästen zu handhaben. Zum anderen sollen Modelle, die den Funktions-Gestalt-Zusammenhang enthalten, im **Wissensmanagement** der Baukastenentwicklung zur Weitergabe von Lösungswissen eingesetzt werden. In beiden Fällen soll der Entwickler⁹ als der spätere Anwender der Modellierungsmethoden im Sinne eines **menschzentrierten Ansatzes** im Mittelpunkt stehen¹⁰, um die Akzeptanz der neuen Methoden zu gewährleisten. Die erzeugten Modelle kommen in der **Baukasten-Serienentwicklung** von Hybrid-Triebstrangsystemen zum Einsatz.

Im Folgenden wird der Aufbau der vorliegenden Arbeit vorgestellt (Abbildung 1.1).

⁶ Albers 2010

⁷ Schuh, Arnoscht & Schiffer 2012

⁸ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

⁹ Um die Lesbarkeit zu erleichtern, wird in der vorliegenden Arbeit das generische Maskulinum verwendet, worin die weibliche Form stets eingeschlossen ist.

¹⁰ Albers 2011

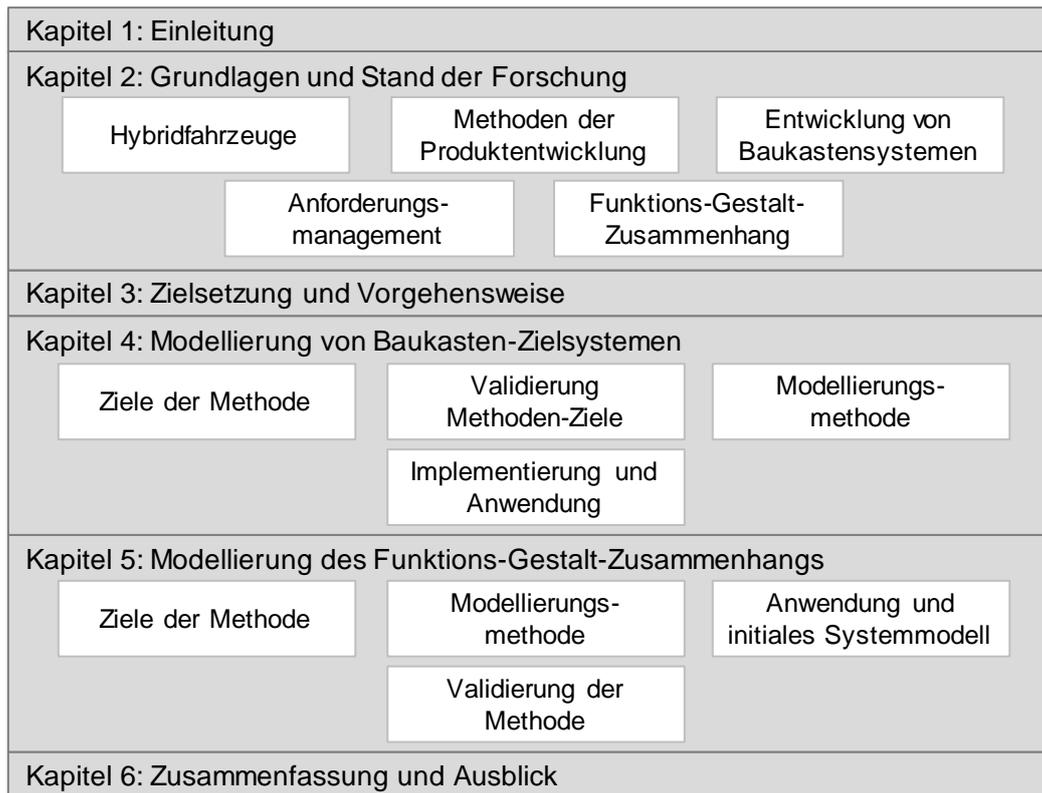


Abbildung 1.1: Übersicht über Aufbau und Struktur der Arbeit

Kapitel 2 vermittelt die Grundlagen der Forschungsfelder und diskutiert den derzeitigen Forschungsstand. Nach einer knappen Ausführung zu Hybridfahrzeugen werden bestehende Ansätze zur methodischen Produktentwicklung aufgeführt, darunter die Modellbasierte Systementwicklung. Danach werden die Besonderheiten der Baukastenentwicklung erörtert. An dieser Stelle erfolgt die Herleitung der Komplexitätstreiber in der Entwicklung von Baukästen. Beruhend auf den dortigen Erkenntnissen wird näher auf die beiden Schwerpunkte des Anforderungsmanagements (zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen) und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs technischer Systeme (zur modellbasierten Weitergabe von Lösungswissen) eingegangen.

In **Kapitel 3** wird der Forschungsbedarf auf der Grundlage des Forschungsstands hergeleitet. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird mit Forschungshypothesen und Forschungsfragen formuliert. Nach Vorstellung der Forschungsumgebung wird das methodische Vorgehen mithilfe des Forschungsdesigns aufgezeigt.

Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung und Anwendung der Modellierungsmethode für Ziele, Anforderungen und Randbedingungen von Baukästen. Die Ziele der Methode werden zunächst aufgeführt und anschließend mithilfe einer Fragebogen-Studie bestätigt. Daraufhin wird die Modellierungsmethode für Baukasten-Zielsysteme vorgestellt, die aus mehreren Einzel-Lösungsansätzen besteht. Hiernach werden die Ergebnisse und Erfahrungen zur Anwendung der Methode in der Baukasten-

Serienentwicklung von Hybrid-Triebstrangsystemen ausgeführt. Dafür wird näher auf die Implementierung der Modellierungsmethode in ein Tool sowie in ein Unternehmen der Automobilindustrie eingegangen.

In **Kapitel 5** werden die Entwicklung und die Anwendung einer Methode zur Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs behandelt. Der Darlegung der Methoden-Ziele folgt die Vorstellung der Methode, die den C&C²-Ansatz nach ALBERS enthält und in der Modellierungssprache Systems Modeling Language (SysML) umgesetzt wurde. Im Anschluss daran wird die Methode für die Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs eines Hybridmoduls eingesetzt und in diesem Zuge einer Verifikation unterzogen. Die Validierung der Methode erfolgt ebenfalls anhand dieses ausgeführten SysML-Modells des Hybridmoduls. Den Kern dieser Validierung bildet ein Praxistest im industriellen Umfeld einer Baukasten-Serienentwicklung. In ihm werden der Nutzen und der entstandene Aufwand des Modells einander gegenübergestellt.

Schließlich enthält **Kapitel 6** eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit sowie einen Ausblick auf mögliche künftige Forschungsthemen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt die wesentlichen Grundlagen zum Thema Baukastenentwicklung vor und diskutiert den zugehörigen Stand der Forschung. Zunächst wird eine Einführung in die Technik der **Hybridfahrzeuge** gegeben (Kapitel 2.1). Danach werden **Methoden der Produktentwicklung** vorgestellt und ihre Rolle bei der Erforschung neuer Entwicklungsmethoden beleuchtet (Kapitel 2.2). Der Teil zur **Entwicklung von Baukästen** erläutert die Besonderheiten der Baukasten-Serienentwicklung und leitet daraus die wesentlichen Herausforderungen ab (Kapitel 2.3). Das Teilkapitel zum **Anforderungsmanagement** behandelt Forschungsstand und Herausforderungen speziell zu Zielen, Anforderungen und Randbedingungen in der Baukasten-Serienentwicklung (Kapitel 2.4). Schließlich wird im letzten Teil die Rolle des **Funktions-Gestalt-Zusammenhangs** in der Produktentwicklung beschrieben sowie auf seine Bedeutung in der Baukastenentwicklung eingegangen (Kapitel 2.5).

2.1 Hybridfahrzeuge

Unter Hybridfahrzeugen versteht man allgemein Fahrzeuge, die für ihren Antrieb mindestens zwei unterschiedliche Energiewandlungsmaschinen samt zugehörigen Energiespeichern besitzen¹¹. Im engeren Sinn (so auch in der vorliegenden Arbeit) sind damit Fahrzeuge gemeint, deren Antriebsstrang neben der **Verbrennungskraftmaschine** (VKM) eine oder mehrere **elektrische Maschinen** (E-Maschinen) aufweist. Nach Erläuterung der **Motivation** zur Entwicklung von Hybridfahrzeugen werden die benötigten **Teilsysteme** und **Funktionen** eines Hybridantriebs vorgestellt. Abschließend werden die **Herausforderungen** bei der Entwicklung von Hybridantrieben umrissen.

2.1.1 Motivation, Grundlagen

Aufgrund der Abgasgesetzgebung in den wichtigsten Fahrzeugmärkten müssen Fahrzeughersteller immer **strengere Emissionsgrenzwerte** einhalten. Die kontinuierliche Optimierung der konventionellen Antriebsstränge, bestehend aus VKM und Getrieben, reicht zur Einhaltung dieser Grenzwerte nicht mehr aus¹². Ein **Hybridantrieb** ermöglicht hingegen eine **deutliche Kraftstoffersparnis**, mit der eine **Verringerung der Emissionen** einhergeht. Zum einen können Betriebszustände der

¹¹ EU-Richtlinie 2007/46/EG

¹² Hofmann 2014

VKM mit schlechtem Wirkungsgrad vermieden werden, zum anderen kann in Verzögerungsphasen Energie durch Rekuperation gewonnen und später wieder zum Antrieb des Fahrzeugs eingesetzt werden. Zudem gibt es immer mehr Städte, die zur Reinhaltung der Luft Einfahrverbote für konventionell angetriebene Fahrzeuge verhängen. Hybridfahrzeuge sind von diesen Regelungen teilweise ausgenommen, weil sie lokal emissionsfreies Fahren ermöglichen. Darüber hinaus können die Fahrzeughersteller die noch relativ junge Hybridtechnologie gezielt nutzen, um mit Begeisterungsfaktoren¹³ Attribute ihres Markenimages (z. B. Technologie-Führerschaft, Fahrkomfort und Fahrsicherheit, Fahrdynamik und Sportlichkeit) zu stützen und Kaufanreize zu schaffen.

Hybridantriebe können in unterschiedliche **Triebstrangtopologien** eingeteilt werden (Abbildung 2.1).

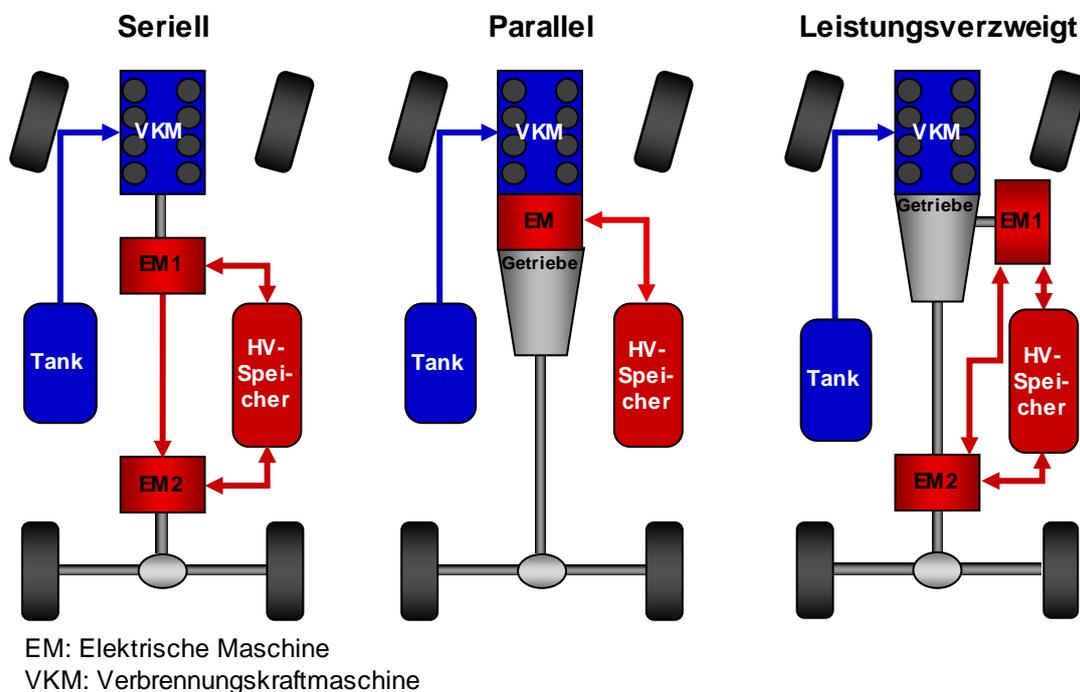


Abbildung 2.1: Hybrid-Triebstrangtopologien (Auswahl)¹⁴

Die Topologie legt fest, wie die Teilsysteme des Triebstrangs miteinander verschaltet sind. Die serielle Topologie überträgt die Antriebsleistung der VKM auf rein elektrischem Wege zu den Rädern. Dagegen können in der parallelen Topologie sowohl die VKM als auch die E-Maschine das Fahrzeug getrennt oder gemeinsam beschleunigen und verzögern. Die leistungsverzweigte Topologie ist eine Mischform

¹³ Siehe Kapitel 2.2.2

¹⁴ Eine ausführliche Übersicht über weitere Topologien samt Ausführungsbeispielen liefert HOFMANN (Hofmann 2014).

der beiden erstgenannten. Es besteht also die Möglichkeit, das Fahrzeug mit einem seriellen und einem parallelen Leistungspfad anzutreiben. Zur weiteren Differenzierung können Parallelhybrid-Topologien nach den möglichen Anbindungsarten der E-Maschine aufgeteilt werden (Abbildung 2.2).

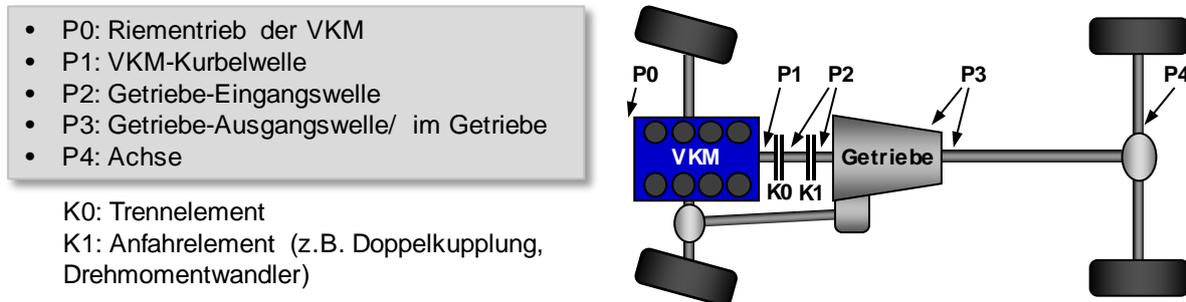


Abbildung 2.2: Mögliche Anbindungsarten der E-Maschine in parallelen Hybridtriebsträngen¹⁵

Ein Hybridtriebstrang kann **mehr Betriebszustände** einnehmen als der Triebstrang eines konventionellen Fahrzeugs. Diese zusätzlichen Betriebszustände dienen zum einen der Einsparung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch (z. B. elektrisches Fahren, Start-Stopp-Betrieb der VKM) und zum anderen der Steigerung der Fahrleistung (z. B. Boosten). Zur Realisierung dieser Betriebszustände sind neben den Teilsystemen eines konventionellen Triebstrangs (VKM sowie Getriebe als Schalt-, Achs- und Verteilergetriebe¹⁶) **neue Teilsysteme** wie E-Maschinen sowie Kupplungen als Schalt- und Trennelemente erforderlich¹⁷. Je höher die installierte elektrische Leistung, desto größer ist das Einsparpotenzial von Emissionen und Kraftstoff. Jedoch steigt damit auch im Allgemeinen die Anzahl der Teilsysteme und der Betriebsmodi. Insbesondere Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEVs) zeichnen sich aufgrund ihrer zusätzlichen Auflademöglichkeit am Stromnetz durch eine hohe Anzahl an Teilsystemen und Betriebszuständen aus. Speziell sportliche Hybridfahrzeuge besitzen viele Kombinationsmöglichkeiten von Fahrmodi und Betriebszuständen, denn sie müssen eine hohe Spreizung zwischen verbrauchsorientierter und sportlicher Fahrweise beherrschen¹⁸. Neben den aufgeführten stationären Betriebszuständen müssen die transienten

¹⁵ Nach Schäfer 2009

¹⁶ Literatur zu Verbrennungskraftmaschinen: van Basshuysen & Schäfer 2015. Literatur zu Getrieben in Fahrzeugen: Naunheimer, Bertsche & Lechner 2007

¹⁷ Literatur zu elektrischen Maschinen: Spring 2009; Binder 2012. Literatur zu weiteren Teilsystemen eines Hybrid-Triebstrangs: Leistungselektronik (siehe Binder 2012) und Hochvoltspeicher (siehe Jossen & Weydanz 2006).

¹⁸ Kerner, Spiegel, Hauck & Rüger 2013

Zustandsübergänge mit genauso viel Sorgfalt entwickelt werden, denn sie sind im Empfinden des Fahrers zum Antriebskomfort ebenso wichtig¹⁹.

Die Abbildung 2.3 zeigt den Hybridtriebstrang eines PHEV am Beispiel des Porsche 918 Spyder. Neben einer abkoppelbaren E-Maschine, die die Vorderachse antreibt (P4-Topologie), ist zwischen der VKM und dem Doppelkupplungsgetriebe ein sog. Hybridmodul verbaut, das eine zweite E-Maschine und eine Trennkupplung zum Ablegen der VKM während der Fahrt enthält (P2-Topologie).

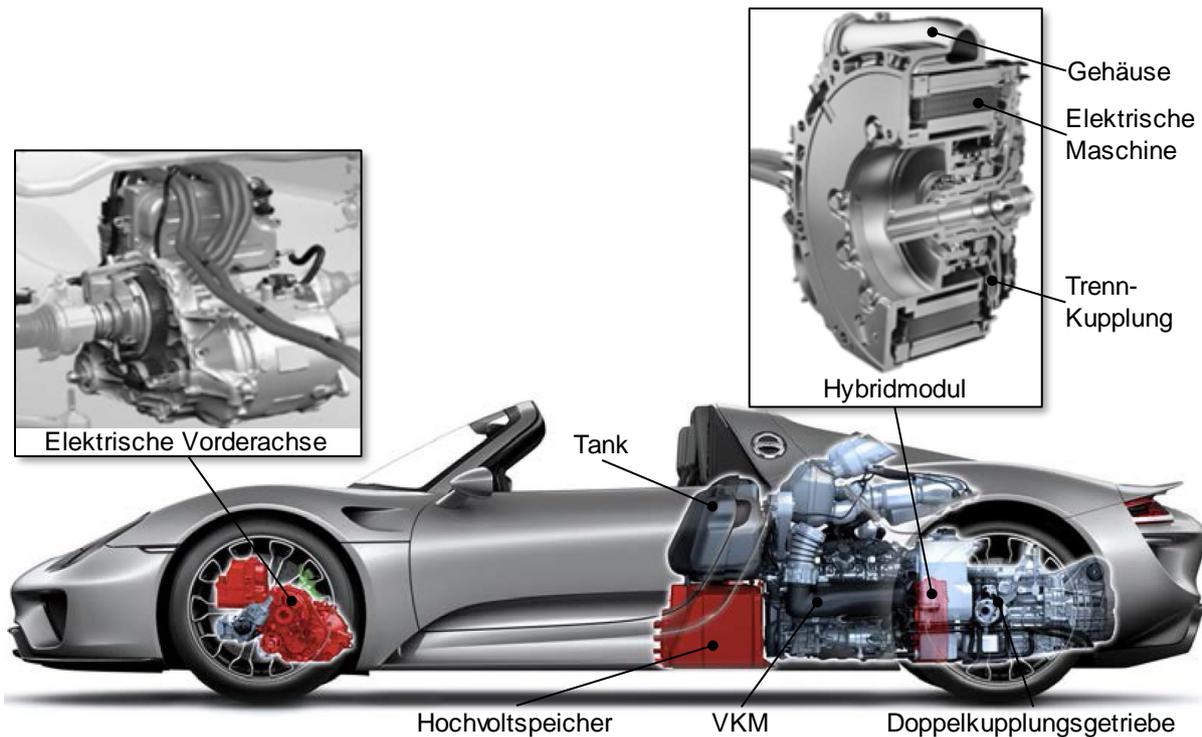


Abbildung 2.3: Hybridantrieb des Porsche 918 Spyder²⁰

Aufgrund der Anzahl an Teilsystemen und Betriebszuständen kann ein Hybridtriebstrang als ein **komplexes technisches System** bezeichnet werden²¹: Durch die vielen Teilsysteme und Wirkzusammenhänge ergibt sich die Kompliziertheit. Weiterhin sorgt die Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten – resultierend aus der Vielzahl an Fahrmodi, Betriebszuständen und Funktionen der Ablaufsteuerung – für eine hohe Dynamik, womit sämtliche Bestandteile der Definition von Komplexität²² vorhanden sind.

¹⁹ Birkhold 2013

²⁰ Nach Kerner, Spiegel, Hauck & Rüger 2013

²¹ Albers, Düser & Ott 2007; Albers, Zingel & Maletz 2011

²² Vgl. z. B. Weber 2005

Aus der Komplexität der Hybridfahrzeuge ergeben sich **neue Herausforderungen bei der Entwicklung** der Teilsysteme eines Hybridtriebstrangs. Die Bauraum-Anforderungen eines Hybridantriebs sind anspruchsvoller, da der Großteil der Hybridtriebstränge in Fahrzeuge integriert wird, deren Fahrzeugarchitektur am Bauraumbedarf von konventionellen Antrieben ausgerichtet ist. Nach KOPPENHAGEN ist das Produkt der Ausgangspunkt für prozessuale Komplexität im Unternehmen²³. Steigt also die Komplexität des Produkts, so steigt auch die Komplexität der zugehörigen Entwicklungsprozesse. Die höhere Anzahl und Neuigkeit der Teilsysteme (z. B. Hochvoltspeicher) in einem Hybridfahrzeug erfordern mehr denn je die Zusammenarbeit von Entwicklern unterschiedlicher Fachdisziplinen. Darüber hinaus können Missverständnisse aufgrund unterschiedlicher Wissens- und Erfahrungswelten der Projektbeteiligten die Komplexität der Entwicklung weiter erhöhen²⁴. Das IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe forscht intensiv an der Entwicklung und Validierung von Antrieben für Hybrid- und E-Fahrzeuge, sowohl auf Ebene des Gesamtfahrzeugs als auch der Teilsysteme²⁵.

2.1.2 Zwischenfazit

Hybridantriebe sind ein anerkannter Weg, um den Kraftstoffverbrauch und damit die Emissionen von Fahrzeugantrieben zu senken. Sie leisten einen unverzichtbaren Beitrag zur Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte, die für Fahrzeughersteller bindend ist. Gleichzeitig bilden Hybridfahrzeuge ein **komplexes Entwicklungsumfeld**, verursacht durch die strukturelle und dynamische Komplexität der Produksubstanz einerseits sowie durch die daraus resultierende Prozesskomplexität im Unternehmen andererseits. Im vielschichten Spannungsfeld heutiger Produktentwicklungen (effiziente Nutzung verfügbarer Entwicklungsressourcen, kurze Entwicklungszeiten, Profitabilität des Gesamtunternehmens) erscheint es lohnend, **neue Methoden** zu erforschen, die die Entwicklung innovativer Hybrid-Triebstrangsysteme unterstützen können.

2.2 Methoden der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung besteht aus einer Vielzahl von Aktivitäten und Handlungsabläufen mit dem Ziel, ein technisches System zu entwickeln. Dabei entsteht der Entwicklungsfortschritt abstrakt gesprochen durch die Überführung eines

²³ Kopenhagen 2004, dort nach Wüpping 1998

²⁴ Braun 2003

²⁵ Vgl. u. a. Albers et al. 2014; Albers et al. 2014a; Albers et al. 2014b; Matros, Schille, Behrendt & Holzer 2015

Ist-Zustands in einen Soll-Zustand im Laufe zahlreicher Iterationen²⁶. Dem Entwickler stehen hierfür zahlreiche Methoden, Frameworks und Ansätze als Unterstützung zur Verfügung. Im Folgenden werden davon diejenigen vorgestellt, die in der vorliegenden Arbeit als Grundlagen verwendet werden. Dabei sehen die Ansätze stets den Menschen im Zentrum der Produktentstehung und als Bestandteil eines interdisziplinären Problemlösungsteams²⁷.

2.2.1 Systems Engineering und Modellbasierte Systementwicklung

In der vorliegenden Arbeit wird ein modellbasierter Ansatz für die Serienentwicklung von Baukästen entwickelt. Die dafür essenziellen Begriffe des **Systems Engineering** und der **Modellbasierten Systementwicklung** (MBSE, engl. Model Based Systems Engineering) werden nun vorgestellt und erläutert. Unter Einbezug von **Allgemeiner Systemtheorie** und **Allgemeiner Modelltheorie** wird die MBSE mit Zielen, Leistungsvermögen und dem noch herrschenden Forschungsbedarf dargelegt.

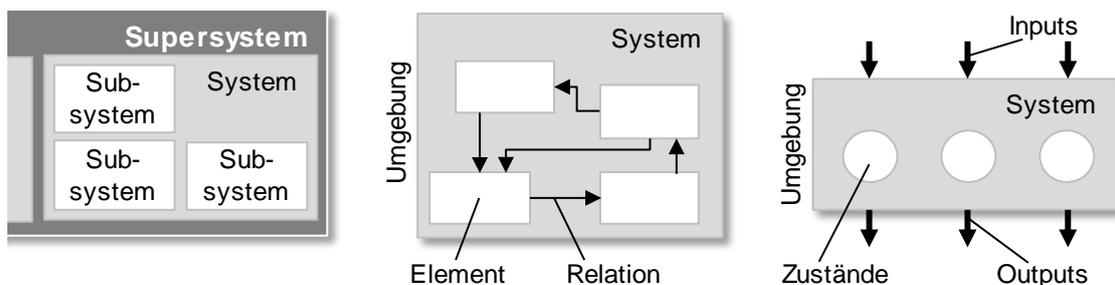


Abbildung 2.4: Hierarchisches, struktureles und funktionales Systemkonzept²⁸

ROPOHL beschreibt drei Kernaspekte der Allgemeinen Systemtheorie²⁹ (Abbildung 2.4). Das **hierarchische Konzept** legt Systemgrenzen fest; so kann jedes System als Teil eines Supersystems und bestehend aus Subsystemen aufgefasst werden³⁰. Wechselt der Betrachter die Systemebene, kann dasselbe System selbst zum Supersystem oder Subsystem werden³¹. Das **strukturele Konzept**³² fasst das System als „zergliedertes Ganzes“³³ auf, bestehend aus seinen Elementen und

²⁶ Die Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand wird als allgemein als Problem bezeichnet, wobei ALBERS ET AL. zwischen einer geplanten Abweichung (Planungssituation) und einer unerwarteten Abweichung (Notsituation) unterscheiden (Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005).

²⁷ Albers 2011

²⁸ Nach Ropohl 2009

²⁹ Ropohl 1975

³⁰ Albers & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013

³¹ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013, dort nach Muschik 2011

³² Definition „Struktur“: Menge der Relationen eines Systems (Zingel 2013, dort nach Ropohl 1975)

³³ Lohmeyer 2013, S. 15, dort nach Oerding 2009

Relationen³⁴. Das System als Ganzes ist also mehr als die Summe seiner Teile; die umfassende Betrachtung und Beschreibung eines Elements ist somit immer nur unter Einbezug seiner Relationen zu den Nachbarn sinnvoll möglich³⁵. Das **funktionale Konzept** beschreibt nicht den inneren Aufbau des Systems, sondern lediglich seine Interaktion mit der Umwelt durch Ein- und Ausgangsgrößen (In- & Outputs) und seinen von außen wahrnehmbaren Zustand³⁶.

Das **Systems Engineering** nutzt u. a. die drei Systemkonzepte nach ROPOHL für die Entwicklung technischer Systeme. Die INCOSE³⁷ empfiehlt folgende Definition: Systems Engineering ist „ein interdisziplinärer Ansatz und ein Mittel zur Umsetzbarkeit und Realisierbarkeit erfolgreicher [technischer] Systeme“³⁸. Systems Engineering kam erstmalig Ende der 50er-Jahre des 20. Jahrhunderts in der Entwicklung von Verteidigungssystemen sowie der Luft- und Raumfahrtbranche zum Einsatz, da dort der Bedarf an methodischer Unterstützung der Entwicklung aufgrund von hoher Produktkomplexität, Zusammenführen verschiedener Technologien sowie allgemeinem Mangel an Validierungsmöglichkeiten mittels Prototypen zu verspüren war³⁹. Ehemalige Offiziere der Air Force brachten den Ansatz mit zur NASA ins Apollo-Raumfahrtprogramm⁴⁰. Der Bedarf an Systems Engineering nimmt heutzutage auch in anderen Branchen zu, denn dort werden Produkte und die zugehörigen Entwicklungsprozesse ebenfalls immer komplexer⁴¹.

Die **Ziele des Systems Engineering** sind die **Erhöhung der Transparenz** in der Entwicklung multidisziplinärer Systeme, indem Wechselwirkungen des zu entwickelnden Systems und des zugehörigen Projekts betrachtet werden. Die Vernetzung vieler Teilsysteme soll durch eine **ganzheitliche Problembetrachtung** beherrschbar werden⁴². Nach HABERFELLNER ET AL. ermöglicht das Systemdenken, komplexe Systeme besser zu verstehen und zu gestalten, indem es Elemente und Relationen mithilfe von Modellen beschreibt und indem es das **ganzheitliche Denken** unterstützt⁴³. Die Abbildung 2.5 zeigt zu letztgenanntem Punkt einen

³⁴ Definition „Relation“: Zusammenhang zwischen einem Attribut eines (Sub)Systems und einem Attribut eines anderen (Sub)Systems (Zingel 2013, dort nach Ropohl 1975)

³⁵ Albers & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013; Zingel 2013

³⁶ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013, dort nach Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007; Zingel 2013

³⁷ International Council on Systems Engineering

³⁸ Walden et al. 2015, S. 265

³⁹ Zingel 2013; Kleiner, Krastel & Langlotz 2013

⁴⁰ Neufeld 2009

⁴¹ Gausemeier et al. 2013

⁴² Albers, Ebel & Lohmeyer 2012; Gausemeier et al. 2013

⁴³ Albers & Lohmeyer 2012; Haberfellner, de Weck, Fricke & Vössner 2012

Lösungsansatz am Beispiel einer Fahrzeugentwicklung: Hier ist das Fahrzeug nicht das „äußerste“ System, sondern es ist stets eingebettet in die umgebenden Supersysteme.

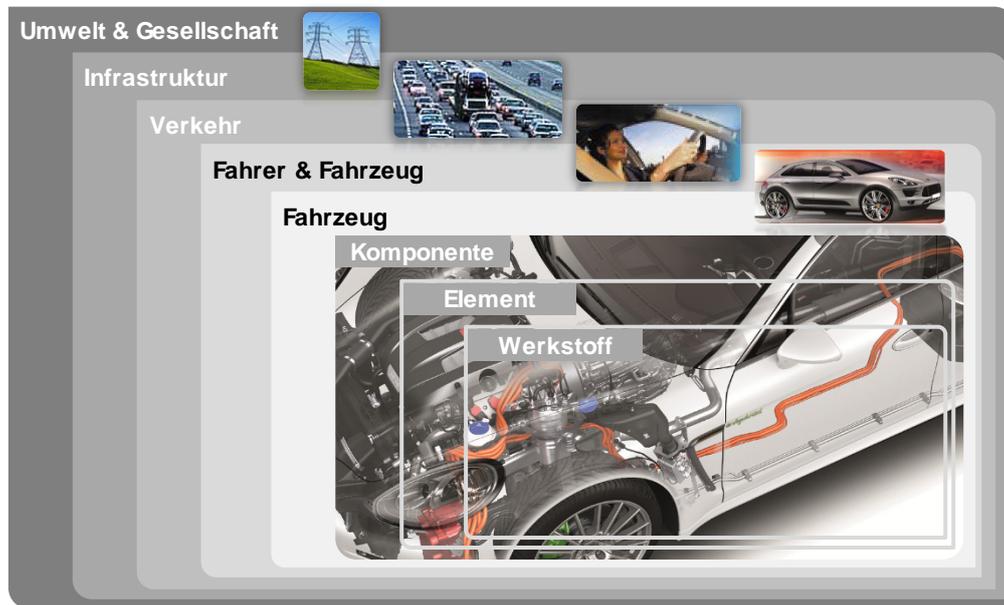


Abbildung 2.5: Systemebenen in der Modellbildung eines Fahrzeugs⁴⁴

In der Literatur wird der Bedarf an Systems Engineering in der **Automobilindustrie** aufgrund der zunehmend steigenden Komplexität der Fahrzeuge betont. Dabei sorgen die Rahmenbedingungen wie die hohe Variantenvielfalt dafür, dass Themen wie **Anforderungsmanagement** und **Wissensmanagement** als besonders erfolgskritisch angesehen werden. Ein weiteres Handlungsfeld sind Methoden zur Handhabung der Komplexität der **Baukastenentwicklung**. Als ebenso wichtig wird das Thema der **Modellbasierten Systementwicklung** erachtet. Der Nutzen von Systems Engineering wird u. a. in der **Qualitätssteigerung und -sicherung** sowie in der **Wiederverwendbarkeit von Lösungswissen** gesehen.⁴⁵

Die **Modellbasierte Systementwicklung** (MBSE) als Bestandteil des Systems Engineering lenkt die Aufmerksamkeit auf den Einsatz von Modellen (von Produkten und Prozessen) in der Produktentwicklung. Zunächst sei der Kern der **Allgemeinen Modelltheorie** knapp wiedergegeben. Nach STACHOWIAK zeichnet sich jedes Modell durch die folgenden drei Hauptmerkmale aus⁴⁶: das **Abbildungsmerkmal** (d. h. das Modell ist stets Abbild oder Repräsentation eines natürlichen oder künstlichen

⁴⁴ Albers & Ott 2011

⁴⁵ Gausemeier et al. 2013

⁴⁶ Stachowiak 1973

Originals⁴⁷), das **Verkürzungsmerkmal** (d. h. nur aus Sicht des Modellierers relevante Attribute des Originals werden erfasst) und das **Pragmatische Merkmal** (d. h. ein Modell dient immer einem bestimmten Zweck).

In der Produktentwicklung sind Modelle allgegenwärtig⁴⁸: Oft geschieht die Modellbildung automatisch im Kopf des Entwicklers beim Erarbeiten einer technischen Lösung. Modelle können also **mentale Modelle** (d. h. ausschließlich im Kopf des Entwicklers vorhanden⁴⁹) sein, einfache Handskizzen bis hin zum hochintegrierten CAD-Modell, das sämtliche geometrische Daten eines Systems einschließlich Werkstoff-, Fertigungs- und Toleranzangaben enthält. Unter den Modellbegriff fallen also nicht nur Berechnungsmodelle, die bei Bereitstellung der erforderlichen Inputs einen Output in Form von Zahlenwerten liefern, sondern auch rein deskriptive Modelle genügen den drei Hauptmerkmalen, beispielsweise mit dem Zweck, das Systemverständnis des Entwicklerteams zu steigern. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird unter dem modellbasierten Ansatz stets der Einsatz von **rechnerbasierten, objektorientierten Modellen** verstanden.

Im Folgenden werden die **Ziele der Modellbasierten Systementwicklung** aufgeführt. In der MBSE nehmen Modelle des zu entwickelnden Systems eine bestimmende Rolle ein, um Analyse, Anforderungsmanagement, Design und Validierung eines technischen Systems zu unterstützen⁵⁰. Methoden des MBSE-Ansatzes können also allgemein gesprochen zur **Steigerung des Systemverständnisses** beitragen⁵¹. Weiterhin können sie den Paradigmenwechsel weg von traditionellen dokumentenbasierten Vorgehensweisen in der Produktentwicklung ermöglichen⁵². In der dokumentenbasierten Entwicklung, in der Informationen verteilt in zahlreichen Unterlagen vorliegen, ist das Einpflegen von Änderungen und die Sicherstellung der Konsistenz ab einer gewissen Entwicklungskomplexität nur noch schwer möglich⁵³. In der MBSE hingegen werden Informationen in ganzheitlichen Modellen⁵⁴ verwaltet, die kontinuierlich gepflegt und aktualisiert werden⁵⁵. So kann der Informationsfluss für sämtliche Projektbeteiligten verbessert werden. Ein weiteres Ziel der MBSE ist das **Weiterreichen**

⁴⁷ Zingel 2013

⁴⁸ Braun 2013

⁴⁹ Lohmeyer 2013, dort nach Meboldt 2008

⁵⁰ Albers & Zingel 2011; Friedenthal, Moore & Steiner 2012

⁵¹ Albers & Wintergerst 2014

⁵² Albers & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013, dort nach Estefan 2007

⁵³ Gausemeier et al. 2013

⁵⁴ Unterschiedliche Modelltypen mit unterschiedlichen Zielsetzungen lassen sich durch integrierte oder föderierte Ansätze zu ganzheitlichen Ansätzen kombinieren (Grundel et al. 2014).

⁵⁵ Albers & Lohmeyer 2012; Herzig & Brandstätter 2010

entwicklungsrelevanter Informationen, welche in den Modellen gespeichert werden können. So kann Wissen, das zuvor in den Köpfen der Entwickler vorhanden war, externalisiert werden; sämtliche Projektbeteiligte können sich einen einheitlichen Kenntnisstand aneignen, und der kontinuierliche Informationsfluss, auch zwischen einzelnen Entwicklungsphasen, wird begünstigt⁵⁶.

Um Modelle in der Produktentwicklung erstellen und nutzen zu können, wird neben der **Sprache**, mit der das Modell erzeugt wird, und dem **Tool** (d. h. dem Software-Werkzeug) auch eine **Modellierungsmethode** benötigt⁵⁷. Dabei ist die **Unterstützung der Modellierung** auf verschiedenen Detaillierungs- und Abstraktionsebenen eine der zentralen Herausforderungen. Eine große Schwierigkeit besteht in dem Bestreben, ein komplexes System und seine Umgebung auf ein abstraktes Modell zu reduzieren, ohne dabei wichtige Details einzubüßen, womit Informationen verloren gehen können⁵⁸. An dieser Stelle sei betont, dass die MBSE zwar einen Beitrag leisten kann, um mit der Komplexität der Produktentwicklung mithilfe von (grafisch aufbereiteten) Modellen besser umgehen zu können. Komplexität kann jedoch nicht „weganalysiert“ oder durch Zerlegen in kleine Probleme eliminiert werden. Letztlich vermag nur der Entwickler selbst den entscheidenden Beitrag zur Lösung einer komplexen Fragestellung zu leisten⁵⁹. Weitere Herausforderungen sind die Verwaltung und Versionierung der entstehenden MBSE-Modelle. Dies kann mit Prinzipien des Product Lifecycle Management (PLM) erfolgen, wofür EIGNER ET AL. den Begriff Systems Lifecycle Management geprägt haben⁶⁰.

In der Modellbasierten Systementwicklung müssen mehrere **Qualitätskriterien für Modelle** beachtet werden. Dazu führen ALBERS und LOHMEYER die folgenden erforderlichen Eigenschaften von Modellen auf: Ganzheitlichkeit, Reduktion, Durchgängigkeit, Kontinuität, Skalierbarkeit und Akzeptanz⁶¹. Die Akzeptanz kann weiter differenziert werden in organisatorische Akzeptanz (erreichbar u. a. durch gute Prozesseinbindung der Methode) und in individuelle Akzeptanz (Akzeptanz des Anwenders, d. h. des Entwicklers)⁶². Letztere kann durch Entwicklung eines

⁵⁶ Albers 2010; Albers et al. 2016; Lohmeyer 2013; Stechert 2010

⁵⁷ Albers, Munker, Zingel & Behrendt 2013, dort nach Friedenthal, Moore & Steiner 2012

⁵⁸ Kalawsky 2009

⁵⁹ Albers 2010

⁶⁰ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014, dort nach Eigner 2013 sowie Sendler 2012

⁶¹ Albers & Lohmeyer 2012. Vgl. auch: Pitschke 2011; Badke-Schaub, Daalhuizen & Roozenburg 2011

⁶² Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012, dort nach Albers & Lohmeyer 2012

menschzentrierten Ansatzes erzielt werden⁶³. Die Durchgängigkeit lässt sich nach ALBERS und LOHMEYER in folgende Unterpunkte zerlegen⁶⁴:

- **Horizontale Durchgängigkeit** (Modelle sind zeitlich durchgängig verwendbar; dazu müssen sie kontinuierlich erweiterbar und aktualisierbar sein)
- **Vertikale Durchgängigkeit** (Der kontinuierliche Wechsel von Hierarchie-Ebenen und unterschiedlichen Blickwinkeln ist möglich)
- **Konsistenz** (Zwei unterschiedliche Modelle desselben Produkts widersprechen sich nicht, sondern ergänzen sich)

Um den essenziellen Aspekt der Durchgängigkeit in der MBSE toolseitig zu ermöglichen, wird im Kontext des PLM an Lösungen zur Kompatibilität unterschiedlicher Softwaresysteme geforscht. Das Forschungsprojekt CRYSTAL beispielsweise befasst sich unter Betrachtung realer Entwicklungsfälle aus der Industrie mit der Schaffung eines Softwarestandards, der es eigenständigen Tools ermöglicht, über die Produktentwicklungs- und Produktlebensphasen hinweg Daten auszutauschen und zu vernetzen. Damit soll die Entwicklung sicherheitsrelevanter eingebetteter Systeme in der Fahrzeug- und Medizintechnik unterstützt werden.⁶⁵

Der letzte Teil des Kapitels geht auf die **Verbreitung von Systems Engineering im industriellen Umfeld** ein. Zahlreiche Forschungsaktivitäten der jüngsten Vergangenheit haben zu einer **breiten Wissensbasis** zu Systems Engineering geführt⁶⁶. Dem gegenüber stehen empirische Untersuchungen, die feststellen, dass Systems Engineering trotz hohem Interesse der Unternehmen im industriellen Umfeld **noch nicht flächendeckend** zum Einsatz kommt⁶⁷. Dafür werden mehrere Gründe aufgeführt. Als Erstes sind teilweise **fehlende Methoden** und **unzureichende Toolunterstützung** zu nennen; außerdem können **fehlende** individuelle und organisatorische **Akzeptanz** beobachtet werden⁶⁸. Zudem ist das Verhältnis von (zunächst hoch erscheinendem) **Aufwand** und (eventuell erst später eintretendem) **Nutzen** von Systems-Engineering-Methoden nur schwer greifbar und zu bewerten. Insbesondere der Nutzen des Systems Engineering, den manche Arbeiten über Schätzungen des reduzierten Entwicklungsrisikos zu ermitteln versuchen, lässt sich im Voraus nur schwer quantifizieren⁶⁹. Darüber hinaus kommt

⁶³ Albers & Lohmeyer 2012

⁶⁴ Albers & Lohmeyer 2012

⁶⁵ El Salloum et al. 2013; weitere exemplarische Publikationen im Kontext von CRYSTAL: Theelen & Hooman 2015; Gallego, Alvarez-Rodríguez, Llorens 2015; Brusa et al. 2014

⁶⁶ Broy et al. 2010

⁶⁷ Gausemeier et al. 2013; Martin et al. 2013

⁶⁸ Albers & Zingel 2013a;

⁶⁹ Schulze & Strožek 2013; Gausemeier et al. 2013

erschwerend hinzu, dass bereits existierende Ergebnisse⁷⁰ zu Aufwand und Nutzen aufgrund der Einzigartigkeit jeder Produktentwicklung nur schwer auf andere Branchen, Unternehmen und Produkte übertragbar sind. Es kann also festgehalten werden, dass sowohl die Akzeptanz als auch die **Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen** von Systems-Engineering-Methoden fallspezifisch ermittelt werden sollten⁷¹.

2.2.2 Produktgenerationsentwicklung

Die Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS ET AL. ist ein neues Erklärungsmodell zur Beschreibung der Entwicklung neuer Generationen technischer Systeme. Eine neue Produktgeneration setzt sich stets aus übernommenen und angepassten Anteilen der alten Produktgeneration (sog. **Übernahmevariation**) sowie neu entwickelten Anteilen zusammen (Abbildung 2.6). Jene neu entwickelten Anteile eines Produkts kommen durch **Prinzip-** und **Gestaltvariation** zustande, wobei die Autoren hervorheben, dass insbesondere die Gestaltvariation viel Sorgfalt und kreative Schaffenskraft der Systemkonstruktoren erfordert, um innovative Produkte hoher Qualität hervorzubringen.⁷²

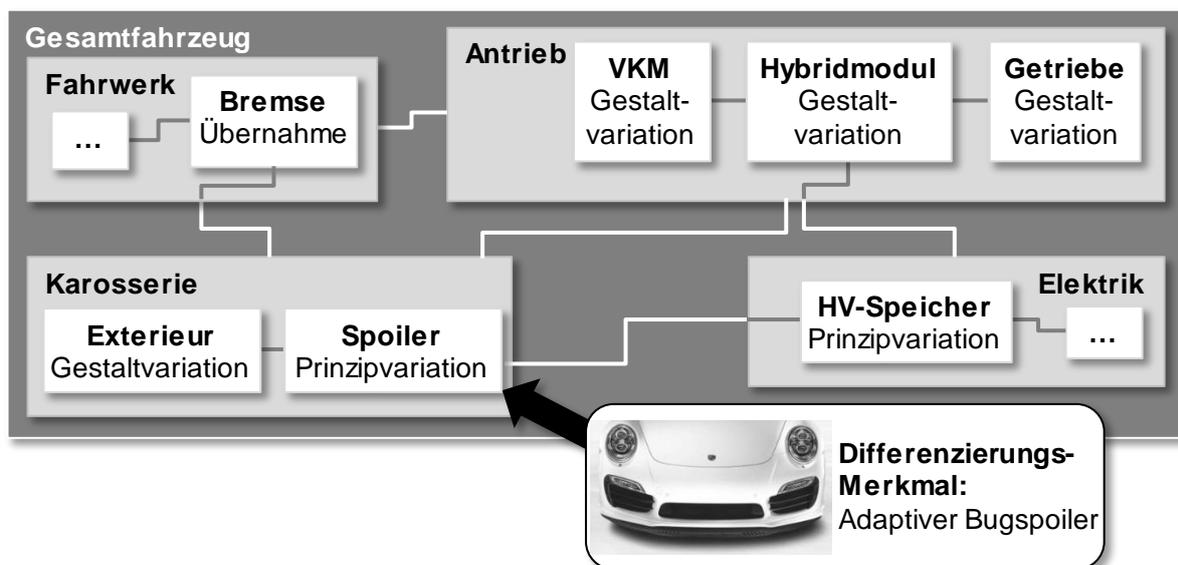


Abbildung 2.6: Produktgenerationsentwicklung der Teilsysteme eines Fahrzeugs⁷³

Die übernommenen Teilsysteme können der Vorgängergeneration des Produkts oder eines Wettbewerbsprodukts entstammen, oder die grundsätzliche Struktur wird von

⁷⁰ Vgl. z. B. Honour 2004; Honour 2013; Kaffenberger, Schulze & Weber 2013

⁷¹ Endler, Steffen, Lohberg & Munker 2013

⁷² Albers et al. 2014c

⁷³ Nach Albers, Bursac & Wintergerst 2015

einem bereits vorhandenen Produkt übernommen. Innovative Produkte⁷⁴ setzen sich also sehr selten aus vollumfänglich neuen Subsystemen zusammen. Folgende Vorteile können so erzielt werden: Die Attraktivität eines Produkts (aus Sicht des Kunden) kann mit einem geringeren Entwicklungs-Aufwand und -Risiko (für den Hersteller) aufrechterhalten werden, Anpassungen an geänderte Randbedingungen (z. B. neue Gesetzeslage) bleiben auf Teilsysteme beschränkt, und eine Kostenreduktion bei Teilsystemen bei gleichbleibender Qualität des Gesamtprodukts kann selektiv vorgenommen werden.

Ein Beispiel für Produktgenerationsentwicklung aus der Fahrzeugbranche ist der Porsche 911, dessen Generationen bei stets gleichbleibender Struktur (Heck-Boxermotor, 2+2-Sitzigkeit) jeweils Subsysteme mit hohem Neuentwicklungsanteil aufweisen, beispielsweise die Turboaufladung der VKM mit variabler Turbinengeometrie (Typ 997) oder einem adaptiven, pneumatisch ausfahrbaren Bugspoiler (Typ 991)⁷⁵.

2.2.3 Allgemeiner Problemlösungsprozess SPALTEN

Der allgemeine Problemlösungsprozess SPALTEN wurde von ALBERS ET AL.⁷⁶ als Hilfsmittel entwickelt, um Probleme (Planungs- und Notsituationen⁷⁷) systematisch zu lösen. Vor dem Durchlaufen der Prozessschritte wird ein Problemlösungsteam (PLT) zusammengestellt. SPALTEN ist ein Akronym und setzt sich aus den folgenden Aktivitäten zusammen⁷⁸:

- **Situationsanalyse** (Beschaffung relevanter Informationen)
- **Problemeingrenzung** (Fokussierung auf den Kern des Problems)
- **Alternative Lösungen aufzeigen** (z. B. mit intuitiven und diskursiven Methoden)
- **Lösungsauswahl** (mithilfe von Methoden zur Bewertung von Lösungen)
- **Tragweitenanalyse** (Prüfen möglicher Chancen und Risiken)
- **Entscheiden und Umsetzen** (der ausgewählten Lösung)
- **Nachbereiten und Lernen** (zur Sicherung der relevanten Informationen)

⁷⁴ Ein Produkt ist nach SCHUMPETER dann innovativ, wenn sich eine Erfindung (Invention) am Markt erfolgreich etabliert (Schumpeter 1939).

⁷⁵ Albers, Bursac & Wintergerst 2015; Danisch 2011; Gönüldinc & Hölzel 2014

⁷⁶ Albers, Burkardt & Saak 2002

⁷⁷ Vgl. Definition Problem in Kapitel 2.2

⁷⁸ Albers & Braun 2011

Weitere Problemlösungsmethoden aus der Literatur sind der Problemlösungszyklus nach HABERFELLNER ET AL. und der Vorgehenszyklus nach EHRENSPIEL⁷⁹. In der vorliegenden Arbeit wurde der SPALTEN-Prozess aufgrund der folgenden Eigenschaften eingesetzt: Er besitzt **fraktalen Charakter** (vgl. Abbildung 2.7), d. h. jeder Prozessschritt kann in einen weiteren SPALTEN-Prozess zerlegt werden⁸⁰. Als Besonderheit sieht der Prozess vor, nach jedem Prozessschritt die Eignung des PLT zu prüfen und seine Zusammensetzung bei Bedarf anzupassen⁸¹. Die rückführenden Pfeile des Informationschecks (IC) symbolisieren, dass nach jedem Prozessschritt das Zwischenergebnis überprüft werden sollte. Ist es nicht zufriedenstellend, so ist ein Rückspringen zu einem der vorangegangenen Prozessschritte möglich.

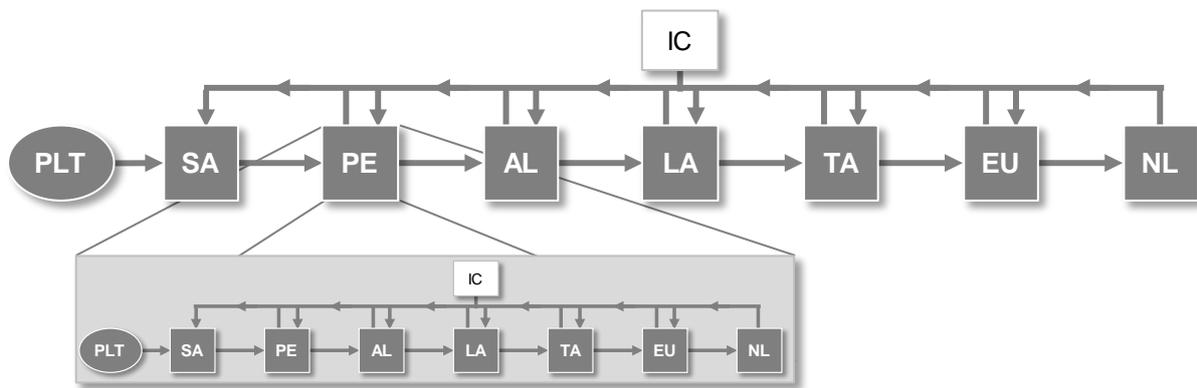


Abbildung 2.7: Allgemeiner Problemlösungsprozess SPALTEN nach ALBERS⁸²

Der SPALTEN-Prozess ist ein wichtiger Bestandteil des integrierten Produktentstehungsmodells, das im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

2.2.4 Integriertes Produktentstehungsmodell

Die erste Hypothese der Produktentstehung nach ALBERS besagt, dass jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell ist⁸³. Es bedarf also eines Modells, das die Produktentstehung vollumfänglich beschreibt und ein agiles Vorgehen ermöglicht. Als Basis des in dieser Arbeit verwendeten Produktentstehungsmodells dient das sogenannte **ZHO-Modell** (Abbildung 2.8), welches auf die Arbeiten von ROPOHL⁸⁴ zurückgeht und am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe permanent weiterentwickelt wird.

⁷⁹ Haberkellner, de Weck, Fricke & Vössner 2012; Ehrlenspiel 2009

⁸⁰ Albers & Muschik 2010; Albers & Muschik 2010a

⁸¹ Albers, Reiß & Bursac 2016

⁸² Nach Albers & Braun 2011a

⁸³ Albers & Braun 2011, dort nach Albers 2010

⁸⁴ Ropohl 1975; Ropohl 2009

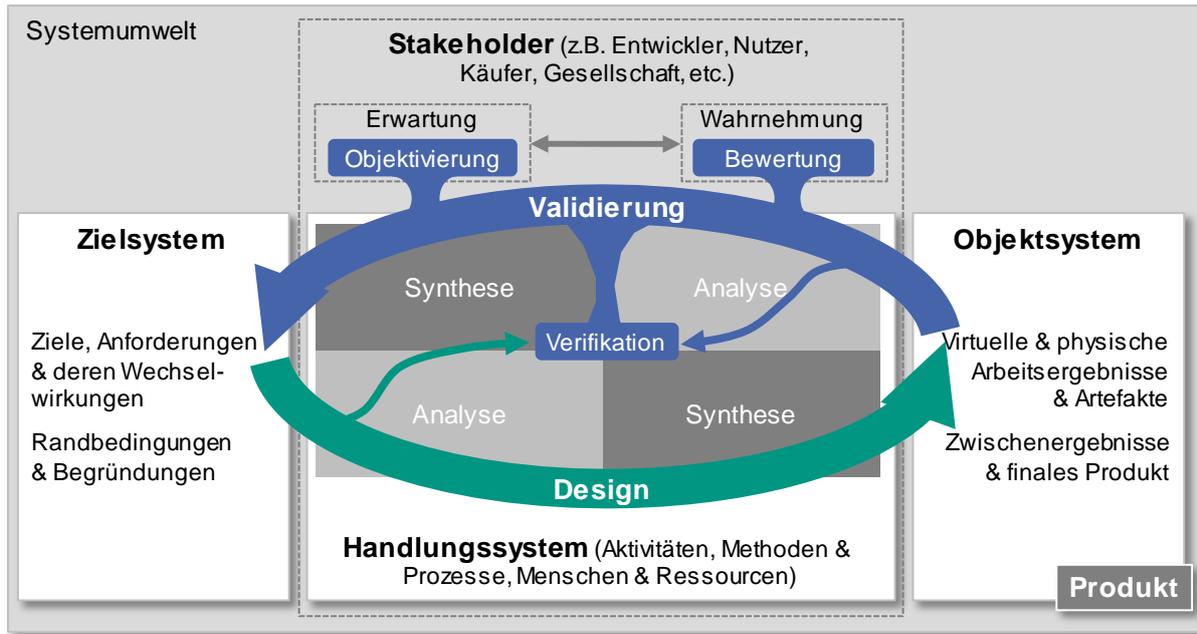


Abbildung 2.8: ZHO-Modell nach ALBERS⁸⁵

Nach der zweiten Hypothese der Produktentstehung von ALBERS kann die Produktentstehung als die Transformation eines (anfängs vagen) Zielsystems in ein Objektsystem durch ein Handlungssystem beschrieben werden⁸⁶. Das **Zielsystem**⁸⁷ enthält dabei die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen des zu entwickelnden Systems (einschließlich deren Relationen und Begründungen)⁸⁸. Es beschreibt also dessen gewünschte Eigenschaften und Zustände, ohne Lösungen vorwegzunehmen. Das Zielsystem wird im Zuge des Entwicklungsfortschritts kontinuierlich erweitert und ausdetailliert. Es definiert den Zweck des Objektsystems, enthält Vorgaben fürs Handlungssystem sowie strategische Komponenten des Unternehmens⁸⁹. Im **Objektsystem** werden alle (Zwischen-)Ergebnisse der Produktentwicklung abgelegt, darunter u. a. CAD- und Berechnungsmodelle, Dokumente und Prototypen⁹⁰. Während der Produktentwicklung wächst sein Inhalt also fortwährend an, bis es schließlich das fertige Produkt enthält, einschließlich der gesamten Entwicklungsdokumentation. Die Inhalte des Zielsystems sind stets Informationen (also von immateriellem Charakter); Inhalte des Objektsystems sind stets passiv

⁸⁵ Nach Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger 2015 sowie Albers & Braun 2011a

⁸⁶ Albers 2010; Albers, Sadowski & Marxen 2011

⁸⁷ Der Begriff „Zielsystem“ im Kontext des ZHO-Modells meint nicht den Zielzustand des zu entwickelnden Systems, sondern die Entwicklungsziele, die als Elemente repräsentiert und mit Relationen verknüpft werden.

⁸⁸ Albers & Braun 2011a

⁸⁹ Meboldt 2008

⁹⁰ Albers & Braun 2011a

(also nicht agierend). Folglich spielen sich alle aktiven Prozesse im Handlungssystem ab⁹¹. Ziel- und Objektsystem werden im **Handlungssystem** gebildet und sind ausschließlich über dieses miteinander verbunden⁹². Dazu enthält das Handlungssystem sowohl die erforderlichen Aktivitäten, Methoden und Prozesse als auch die Ressourcen, also u. a. Entwicklungsteam und -budget, Prüfstands- und Simulations-Kapazitäten.

Mithilfe des ZHO-Modells können auch die Aktivitäten Validierung und Verifikation erklärt werden, die laut der dritten Hypothese von ALBERS zu den zentralen Aktivitäten der Produktentstehung gehören⁹³. In Anlehnung an die Definition der **Validierung** in der VDI-Richtlinie 2206 definieren ALBERS ET AL.⁹⁴ einen Validierungszyklus (vgl. Abbildung 2.8), mit dem die Stakeholder (engl. Interessenvertreter, u. a. Anwender und Kunden des Produkts, Akteure des Handlungssystems, z. B. Entwickler) prüfen können, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist. Als Teilschritt dieses Zyklus vergleicht die **Verifikation** Elemente des Objekt- und Zielsystems zur Prüfung von deren Konformität. Zur Unterstützung der systematischen Validierung können speziell dafür entwickelte Lösungsansätze eingesetzt werden, z.B. der IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz⁹⁵.

Auf Basis des ZHO-Modells entwickeln ALBERS, EBEL und LOHMEYER⁹⁶ einen menschenzentrierten Ansatz, der die Denk- und Handlungsabläufe des Entwicklers in Bezug zu Ziel- und Objektsystem der Produktentstehung setzt. Dieses **erweiterte ZHO-Modell** (Abbildung 2.9) besteht aus mehreren Schleifen der **Analyse** (Handlung zum Verstehen eines existierenden Systems mit dem Resultat der Erkenntnis) und der **Synthese** (Handlung zum Erschaffen eines noch nicht existierenden Systems mit dem Resultat eines Ziels oder Objekts)⁹⁷, die folgendermaßen zu verstehen sind: Bestehende Objekte (z. B. das Produkt der Vorgängergeneration) werden analysiert. Das so gewonnene Wissen wird in der Wissensbasis des Entwicklers abgelegt. Mithilfe dieses Wissens werden Rückschlüsse zum verfolgten Ziel (z. B. Entwicklung eines technischen Systems) gezogen und das Zielsystem erweitert, verfeinert oder geändert⁹⁸. Die Ziele werden hiernach analysiert, um den (mentalen) Lösungsraum zu bilden. Dieser wird in der

⁹¹ Muschik 2011

⁹² Albers & Braun 2011a; Muschik 2011

⁹³ Albers 2010

⁹⁴ VDI 2206; Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

⁹⁵ Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

⁹⁶ Albers, Ebel & Lohmeyer 2013

⁹⁷ Ebel 2015, dort nach Lohmeyer 2013

⁹⁸ Ebel 2015

anschließenden Synthese in Arbeitsergebnisse (z. B. Dokumente, Berechnungsergebnisse, physische und virtuelle Prototypen) überführt, welche dann im Objektsystem abgelegt werden. Der geschlossene Kreislauf, der seiner Form nach als liegende Acht bezeichnet wird, wird im Laufe einer Produktentwicklung immer wieder durchlaufen, wodurch das Ziel- und das Objektsystem iterativ und evolutionär weiterentwickelt werden⁹⁹.

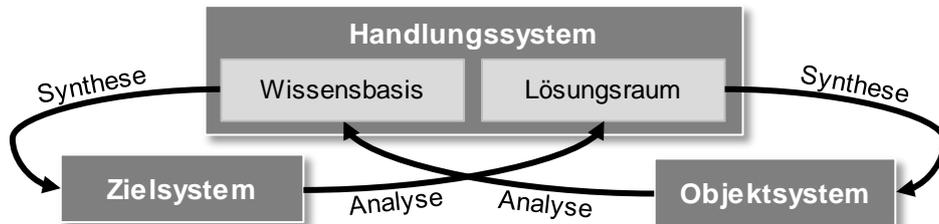


Abbildung 2.9: Erweitertes ZHO-Modell (liegende Acht)¹⁰⁰

Wird das ZHO-Modell um Problemlösungsmethoden und teamorientierte Entwicklungsprozesse erweitert, so erhält man das **integrierte Produktentstehungsmodell** (iPeM) nach ALBERS¹⁰¹ (Abbildung 2.10). Alternative Produktentstehungsmodelle sind u. a. das erweiterte V-Modell für die MBSE nach EIGNER ET AL. und das Paderborner 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER¹⁰². Das iPeM wird in der vorliegenden Arbeit verwendet, denn es hatte – aufgrund seiner Verwandtschaft zum ZHO-Modell – einen wesentlichen Einfluss auf Vorstellung und Verständnis der modellhaften Abbildung einer Produktentstehung.

Die Herausforderungen eines modernen Produkts schlagen sich unmittelbar als Randbedingungen seines Entstehungsprozesses nieder: Interdisziplinäre Problemlösungsteams (aufgrund der Komplexität der Produkte) entwickeln mechatronische Produkte möglichst hoher Qualität nach Prinzipien des Simultaneous Engineering (aufgrund der Forderung nach kurzer Time-to-Market, mit der Folge hoher Granularität der Organisationsstruktur)¹⁰³. In diesem Kontext bringt das iPeM, das als Metamodell oder Framework aufgefasst werden kann, die **Sicht der Entwickler** (wie z. B. in den VDI-Richtlinien 2206 und 2221¹⁰⁴) und die **Sicht des**

⁹⁹ Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

¹⁰⁰ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012. Siehe auch: Lohmeyer, Meboldt & Matthiesen 2013

¹⁰¹ Neben den neueren Veröffentlichungen blickt das iPeM bereits auf eine mehrjährige Forschungsgeschichte zurück und wird am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe permanent weiterentwickelt (Albers, Muschik & Braun 2010; Albers & Muschik 2010a; Meboldt 2008; Albers & Meboldt 2007).

¹⁰² Eigner, Gilz & Zafirov 2012; Gausemeier, Plass & Wenzelmann 2009

¹⁰³ Albers & Braun 2012; Braun 2013

¹⁰⁴ VDI 2206; VDI 2221

Managements (wie z. B. im Stage-Gate-Modell nach COOPER¹⁰⁵) auf die Produktentstehung zusammen¹⁰⁶. Dazu wird das Handlungssystem des ZHO-Modells weiter unterteilt und ausdetailliert.

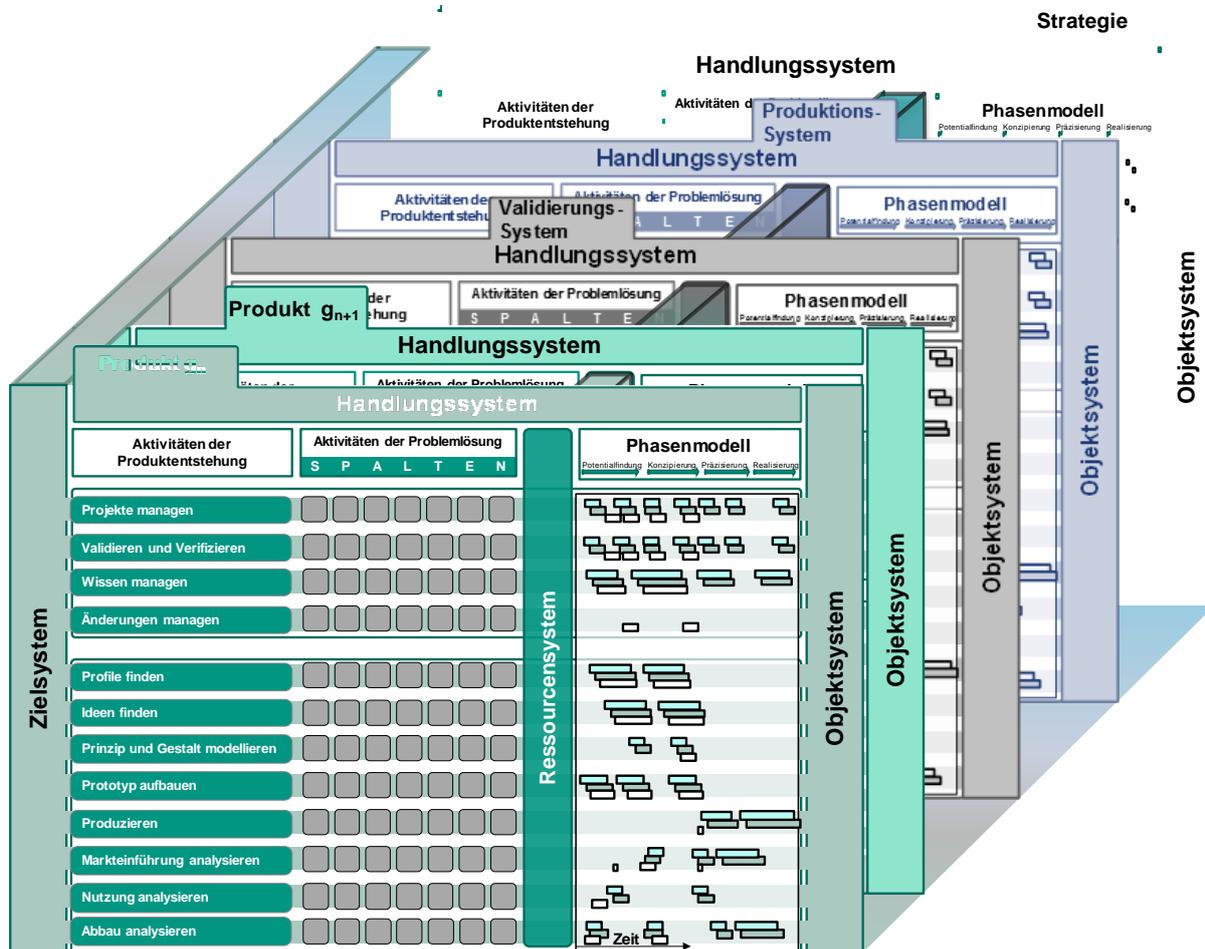


Abbildung 2.10: Integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM)¹⁰⁷

Die **Aktivitätenmatrix** wird gebildet aus den Aktivitäten des SPALTEN-Problemlösungsprozesses¹⁰⁸ und den Aktivitäten der Produktentstehung (Abbildung 2.10)¹⁰⁹. Sie ist zunächst generisch und projektungebunden, da sie keine zeitliche Dimension vorgibt¹¹⁰. Somit wird die zeitliche Abfolge der Aktivitäten bewusst nicht festgelegt, damit der sequenzielle Ablauf üblicher Entstehungsprozesse überwunden und die parallele und iterative Anordnung der Aktivitäten ermöglicht werden kann¹¹¹.

¹⁰⁵ Cooper 1990

¹⁰⁶ Albers & Braun 2011

¹⁰⁷ Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016

¹⁰⁸ Siehe Kapitel 2.2.3

¹⁰⁹ Albers & Braun 2012; Braun 2013

¹¹⁰ Ebel 2015

¹¹¹ Braun 2013; Albers, Sadowski & Marxen 2011; Ebel 2015

Im **Phasenmodell** werden diese Aktivitäten dann zeitlich eingeplant und in Relation zueinander gesetzt, wodurch der Projektbezug der einzelnen Aktivitäten entsteht¹¹². Aus dem **Ressourcensystem** heraus werden sämtliche Aktivitäten mit Budget, Entwicklerteams, Prüfstandskapazitäten etc. versehen¹¹³. Die unterschiedlichen Ebenen dienen sowohl der Darstellung unterschiedlicher Produktgenerationen als auch der Entwicklungen von Validierungs- und Produktionssystemen sowie der Unternehmensstrategie¹¹⁴.

Aus dem Metamodell iPeM lassen sich verschiedene Modelltypen ableiten, die sich in Abstraktionsgrad und Projektbezug voneinander unterscheiden. Das Referenzmodell dokumentiert die Erfahrungen aus ähnlichen früheren Projekten in Form von Fragmenten bewährter Lösungsansätze und dient als Vorlage, um künftige Produktentwicklungen effizient planen zu können¹¹⁵. Auf diese Weise kann es den Wissenstransfer zum Entwicklungsprozess, insbesondere im Kontext der Produktgenerationsentwicklung, unterstützen. Das Implementierungsmodell beschreibt den geplanten Soll-Verlauf einer spezifischen Produktentwicklung und wird zur Planung aller dazu erforderlichen Phasen und Ressourcen verwendet, wogegen das Anwendungsmodell den realen Ist-Verlauf des Projekts wiedergibt¹¹⁶.

2.2.5 Modellierungsframework

Zur Einteilung unterschiedlicher Modelltypen können in der Literatur diverse Ansätze gefunden werden, darunter das Paderborner 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER, PLASS und WENZELMANN sowie der Ansatz zum Variantenmanagement mit MBSE nach BECKER, DEYNET und SCHWEIGER¹¹⁷. In der vorliegenden Arbeit wird das Modellierungsframework von ALBERS und BURSAC¹¹⁸ (Abbildung 2.11) eingesetzt, da es – bis ins Forschungsdesign hinein – zur Einteilung der Modelle genutzt werden kann. Es dient dazu, unterschiedliche Abstraktionsgrade der Systemmodellierung zu klassifizieren und damit die Aktivitäten in der Modellbasierten Systementwicklung zu unterstützen.

¹¹² Ebel 2015; Albers 2010

¹¹³ Albers 2010

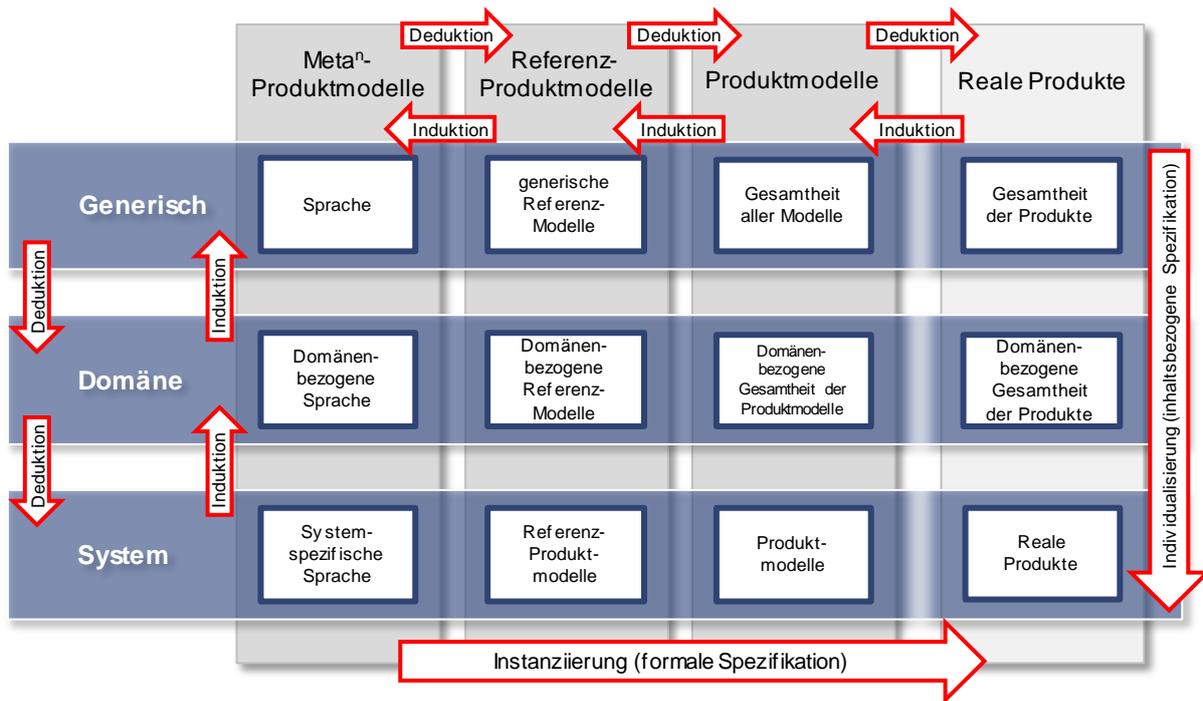
¹¹⁴ Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016

¹¹⁵ Albers & Meboldt 2007

¹¹⁶ Meboldt 2008

¹¹⁷ Gausemeier, Plass & Wenzelmann 2009; Becker, Deynet & Schweiger 2014

¹¹⁸ Albers et al. 2014d; Bursac 2016

Abbildung 2.11: Modellierungsframework nach ALBERS und BURSAC¹¹⁹

Die Abstraktionsgrade des Frameworks lehnen sich an die möglichen Abstraktionsstufen des iPeM an und sollen die **Wiederverwendung** von Modellinhalten und -strukturen im Kontext der Produktgenerationsentwicklung erleichtern. Weiterhin kann es in der Forschung zu Methoden des MBSE-Ansatzes in der Baukastenentwicklung eingesetzt werden¹²⁰. Außerdem konnte seine Tauglichkeit zur Klassifizierung und Abgrenzung unterschiedlicher Forschungsvorhaben im Gebiet der MBSE erwiesen werden¹²¹. Nachfolgend wird die Funktionsweise des Frameworks beschrieben und näher auf die Zielsetzung jener Modell-Abstraktionsgrade eingegangen, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden.

Die vertikale Achse des Frameworks nimmt von oben nach unten zunächst eine Konkretisierung von der *generischen Ebene* zur *Domänen-Ebene*¹²² (z. B. Fahrzeugtechnik) vor. Je nach Ausrichtung der Modelle können beliebig viele Domänen-Ebenen eingezogen werden (z. B. Branche, Unternehmen, Abteilung, Fachdisziplin). Die *System-Ebene* bezeichnet sämtliche Modelltypen, die einem

¹¹⁹ Albers et al. 2014d; Bursac 2016

¹²⁰ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

¹²¹ Albers et al. 2014d

¹²² Unter einer Domäne wird eine bestimmte Branche, Produktgattung oder Fachdisziplin verstanden (Alt 2012).

konkreten, zu entwickelnden System (z. B. Gesamtfahrzeug, Hybridmodul) zugeordnet werden können¹²³.

Über die horizontale Achse erfolgt von links nach rechts eine zunehmende Konkretisierung von Modellen bis hin zum physisch vorliegenden *realen Produkt*. Angefangen bei den *Meta-Modellen*, wo die meisten Modellierungssprachen zu finden sind (z. B. UML und SysML¹²⁴), können im Feld *Domänen-bezogene Sprache* fachdisziplinspezifische Sprachen eingeordnet werden (z. B. der C&C²-Ansatz in SysML¹²⁵ in der Domäne Maschinenbau). Das Feld *Produktmodell auf System-Ebene* (im Folgenden als Systemmodell bezeichnet) enthält Modelle des zu entwickelnden Systems (z. B. SysML-Modell des Hybridmoduls). Das *Referenz-Produktmodell auf System-Ebene* (im Folgenden als Referenzmodell bezeichnet) weist in der Regel hohe inhaltliche und strukturelle Gemeinsamkeiten mit dem Systemmodell auf, da es auf Referenzprodukten (z. B. Vorgänger- oder Wettbewerbs-Produkte) des zu entwickelnden Systems im Sinne der Produktgenerationsentwicklung basiert. Die Ziele sowie die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des Referenzmodells werden nun vorgestellt.

Der Aufwand der Modellerstellung wird oft als Hinderungsgrund zur Einführung modellbasierter Ansätze angesehen¹²⁶. In der Literatur wird deshalb an zahlreichen Stellen die **Wiederverwendbarkeit von Modellinhalten** gefordert¹²⁷. Mit dem Ansatz der Produktgenerationsentwicklung, dem über 90 % der Entwicklungsprozesse folgen, wird ein konsequentes Denken in Produktgenerationen möglich¹²⁸. Dabei liegt der **Nutzen des Referenzmodells** in der **Arbeitserleichterung**, die entsteht, wenn Inhalte und Strukturen des Referenzmodells zur Erzeugung von Systemmodellen wiederverwendbar sind. Die Referenzmodelle können somit den Aufwand zur Modellbildung neuer Produktgenerationen drastisch reduzieren. Sie leisten damit einen wertvollen Beitrag zur Senkung der Anwendungsschwelle bei der Einführung modellbasierter Ansätze. Weiterhin kann die **Steigerung der Qualität** der Systemmodelle erzielt werden, weil – anstatt ohne Anhaltspunkte „bei Null“ anfangen zu müssen – auf bestehende, geprüfte Referenzmodelle zurückgegriffen werden kann.

¹²³ Albers et al. 2014d; Bursac 2016

¹²⁴ Siehe Kapitel 2.5.4

¹²⁵ Siehe Kapitel 2.5.4

¹²⁶ Siehe Kapitel 2.2.1

¹²⁷ Vgl. u. a. Albers, Ebel & Sauter 2010; Albers et al. 2014c; Pohl & Rupp 2011; Bühne, Lauenroth & Pohl 2004

¹²⁸ Albers et al. 2014c

Im Rahmen der Wiederverwendung von Modellinhalten kann das Referenzmodell auch als **Tool für das Wissensmanagement** aufgefasst werden¹²⁹. In ihm können **Lessons Learned** („gelernte Lektionen“, d. h. Erfahrungen zur erfolgreichen Bewältigung von Problemen abgeschlossener Entwicklungen) und **Best Practices** (bewährte Verfahren, d. h. Informationen zu bewährten technischen Lösungen und Vorgehensweisen mit Referenzcharakter) zunächst gespeichert und spätestens bei Erstellung eines neuen Systemmodells direkt übernommen oder zumindest erneut in Erinnerung gerufen werden¹³⁰. So steht durch das Framework im Wissensmanagement, das von zentraler Bedeutung für den nachhaltigen Erfolg und den Wettbewerbsvorteil eines Unternehmens ist, ein modellbasierter Ansatz zur Verfügung¹³¹.

2.2.6 Zwischenfazit

Das **Systems Engineering** – und darauf aufbauend die **Modellbasierte Systementwicklung** – ist ein Ansatz, der das Systemverständnis und das ganzheitliche Denken in der Entwicklung komplexer technischer Systeme fördern kann. Im Kontext der **Produktgenerationsentwicklung** kann der MBSE-Ansatz eingesetzt werden, um Wissen und Informationen aus Ziel- und Objektsystem vergangener Produktgenerationen zwecks Wiederverwendung rechnerbasiert zur Verfügung zu stellen. Hierbei hilft das **Modellierungsframework**, unterschiedliche Abstraktionsgrade in der Systemmodellierung (z. B. System- und Referenzmodelle) transparent zu strukturieren. Obwohl in der Automobilindustrie ein hoher **Bedarf** an methodischer Unterstützung in den Bereichen **Anforderungs- und Wissensmanagement** herrscht, sind Methoden des MBSE-Ansatzes in der industriellen Anwendung bislang wenig verbreitet. Deswegen empfiehlt es sich, die Praxistauglichkeit und Akzeptanz neu entwickelter MBSE-Methoden im Rahmen der Forschung zu evaluieren. Dazu ist das **erweiterte ZHO-Modell** geeignet, da es zum einen die Produktentwicklung unterstützen und zum anderen auch eingesetzt werden kann, um neue **menschzentrierte Entwicklungsmethoden** zu erforschen.

2.3 Entwicklung von Baukästen

Nach der Vorstellung der Methoden der Produktentwicklung allgemein geht dieses Kapitel näher auf die Besonderheiten der Entwicklung von Baukästen ein. Dabei wird

¹²⁹ Als Wissensmanagement werden sämtliche Aktivitäten zum zielgerichteten Umgang mit Wissen bezeichnet (Schmalenbach 2013, dort nach Reinmann-Rothmeier & Mandl 2000; vgl. auch VDI 5610).

¹³⁰ Meboldt 2011; Zingel 2013

¹³¹ Albers et al. 2014c; Schmalenbach 2013, dort nach Köck & Willfort 2007 sowie Roth, Binz & Watty 2010

speziell der Einsatz von **Baukästen in der Fahrzeugindustrie** beleuchtet. Die **Motivation** für die Entwicklung von Baukästen sowie wichtige **Grundlagen** und **Definitionen** werden in Kapitel 2.3.1 vorgestellt. Danach behandelt das Kapitel 2.3.2 **Aktivitäten, Herausforderungen und Methoden**. Die wesentlichen **Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung** werden in Kapitel 2.3.3 hergeleitet.

2.3.1 Motivation, Grundlagen, Definitionen

Der Grundgedanke von Baukästen zur Konfiguration von Gebrauchsgegenständen (auch Möbel und Architektur) und technischen Systemen lässt sich zurückverfolgen bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts¹³². Er gehört zu den prägenden Gestaltungsprinzipien des Nachkriegs-Funktionalismus¹³³. In der Entwicklung technischer Systeme der heutigen Zeit wird eine **Umsetzung des Baukastenprinzips** aufgrund der hohen Tragweite durch die **strategische Entscheidung des Managements** vorgegeben¹³⁴.

Die Beweggründe zur Einführung von Baukästen aus Sicht des Unternehmens können mit dem Wandel der Absatzmärkte zu globalisierten Käufermärkten erklärt werden: Der Individualisierungswunsch der Kunden sowie differenzierte Käufergruppen mit heterogenen Wünschen sorgen für einen hohen Bedarf an Produktvarianz und fordern die Hersteller zur Erschließung von Produktnischen auf¹³⁵. Zusammengefasst wird die **Maximierung der externen Vielfalt** (d. h. die Menge der am Markt angebotenen Produktvarianten eines Unternehmens, die der Käufer wahrnimmt) gefordert¹³⁶. Ohne das Ergreifen weiterer Maßnahmen würde diese Steigerung der Produktvielfalt zu einer erheblichen Verteuerung vieler unternehmensinterner Abläufe führen. Das Baukastenprinzip bietet den Herstellern in diesem Kontext einen produktseitigen Rationalisierungs-Ansatz, der die **Minimierung der internen Vielfalt** ermöglicht¹³⁷. Die Grundidee dahinter: Auf Basis weniger Bausteine (interne Vielfalt) kann ein breites Spektrum unterschiedlicher Produkte (externe Vielfalt) angeboten werden. Weitere Treiber der Entwicklung von Baukästen sind die Senkung der Teilevielfalt im After-Sales-Bereich, die Vereinfachung der Abläufe in Produktion und Montage sowie die leichte

¹³² Einen guten Überblick über die Forschungs- und Technik-Geschichte des Baukasten-Prinzips liefert KOPPENHAGEN (Kopenhagen 2004). Siehe auch: Droste 2012

¹³³ Seeger 2014

¹³⁴ Schuh, Arnoscht & Schiffer 2012

¹³⁵ Neubauer 2012; Schuh, Arnoscht & Schiffer 2012; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009

¹³⁶ Feldhusen & Grote 2013; Bartuschat 2001

¹³⁷ Feldhusen & Grote 2013; Bartuschat 2001; Krause, Kipp & Blees 2012

Austauschbarkeit einzelner Bausteine durch den Nutzer des Produkts (Anwenderbaukasten) oder den Hersteller (Herstellerbaukasten, z. B. zur unabhängigen Weiterentwicklung eines Bausteins)¹³⁸. Diesen Chancen stehen einige **technische Nachteile** und **wirtschaftliche Risiken** gegenüber, u. a. erhöhter Bauraumbedarf und Gewicht der Bausteine im Vergleich zur Integralbauweise, Kompromissfindung bei technischen Eigenschaften zur Wahrung des Gleichteileprinzips, Imageverluste bei zu geringer Differenzierung der Produktvarianten sowie strengere Anforderungen an die Produktqualität zur Vermeidung kostspieliger Rückrufaktionen¹³⁹.

Zu den zentralen Begriffen der Baukastenentwicklung haben ALBERS ET AL. trennscharfe **Definitionen im Kontext des Systems Engineering** geschaffen, die gemeinsam eine Ontologie bilden¹⁴⁰. Diese Definitionen, die auch auf dem Begriffsverständnis aus der Literatur¹⁴¹ aufsetzen, werden im Folgenden vorgestellt. Danach wird der **fraktale Charakter** in der Bauweise technischer Systeme erörtert.

Ein **Modul** ist ein technisches Subsystem, das sich durch andere technische Subsysteme ersetzen lässt, sodass die Menge aller Funktionen oder Attribute des technischen Systems variiert wird¹⁴².

Die Gesamtfunktion eines modular aufgebauten Systems kann also durch Substitution seiner Subsysteme variiert werden (z. B. Ersetzen eines Handschalt-Getriebes durch ein Doppelkupplungsgetriebe). Sonderfälle dieser Substitution sind das Hinzufügen oder Weglassen eines Moduls (z. B. Triebstrang mit oder ohne Hybridmodul). Zur Steigerung der Austauschbarkeit der Module¹⁴³ sind wenige, standardisierte Schnittstellen zielführend¹⁴⁴. Die Einteilung eines Systems in Module kann aus unterschiedlichen Blickwinkeln seiner Lebensphasen (z. B. Entwicklungs-Sicht meist funktional, Produktions-Sicht meist montagebezogen, Beschaffungs-, Gebrauchs-Sicht u. v. m.) erfolgen¹⁴⁵.

¹³⁸ Kopenhagen 2004; Achleitner & Döllner 2011, dort nach Dietrich 2011; Blees 2011

¹³⁹ Kopenhagen 2004; Stechert 2010; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009; Renner 2007; Sedchaicharn 2010

¹⁴⁰ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

¹⁴¹ U. a. Göpfert 1999; Feldhusen & Grote 2013; Ponn & Lindemann 2008; Schuh 2005

¹⁴² Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

¹⁴³ Die Austauschbarkeit der Module ist ein zentrales Unterscheidungskriterium von modularer und integraler Bauweise (vgl. Sedchaicharn 2010).

¹⁴⁴ Kopenhagen 2004; Blees 2011

¹⁴⁵ Blees 2011; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009

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 variieren¹⁴⁶.

Subsysteme, die der Plattform eines Systems angehören, müssen nicht zwingend physisch verbunden sein (z. B. bei der Menge aller Bauteile, die in mehreren Varianten eines Hybridmoduls unverändert zum Einsatz kommt). In der Praxis ist dies jedoch oft der Fall (z. B. Plattform als Bodengruppe und Achsen eines Fahrzeugs), weshalb eine Plattform häufig auch als „Schnittstellenträger“ bezeichnet wird¹⁴⁷. In der Fahrzeugtechnik blicken Plattformen auf eine lange Tradition zurück und sind ein anerkanntes Mittel zur Kostenreduktion durch die Nutzung technischer Synergien¹⁴⁸.

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 werden¹⁴⁹.

In der Entwicklung beispielsweise von E-Maschinen-Baureihen ist es üblich, die Leistung durch Anpassung der elektromagnetisch wirksamen Länge zu variieren. Damit bleibt die Geometrie der Statorbleche für alle Baureihenmitglieder gleich, sodass dasselbe Stanzwerkzeug verwendet werden kann¹⁵⁰.

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 oder Attribute konfigurieren zu können¹⁵¹.

Ein Baukasten kann sowohl Module, Plattformen und Hüte sowie Baureihen enthalten. Bei der Fahrzeugentwicklung (Herstellerebaukasten) ist ein Baukasten also noch kein gebrauchsfertiges Produkt. In der Baukastenentwicklung werden folglich die Subsysteme entwickelt und miteinander zu gebrauchsfertigen Fahrzeugen

¹⁴⁶ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

¹⁴⁷ Feldhusen & Grote 2013

¹⁴⁸ Hoffmann & Vietor 2014; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009

¹⁴⁹ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015. Definition Produktarchitektur siehe Kapitel 2.5.1

¹⁵⁰ Vgl. z. B. Kieser & Blessing 2010

¹⁵¹ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

kombiniert¹⁵². Zusätzlich wird das Baukasten-Regelwerk – also die Festlegung von Bauräumen, Schnittstellen und Kombinationsmöglichkeiten – definiert und seine Einhaltung überwacht.

In der Literatur zur Baukastenentwicklung finden sich zahlreiche Beispiele, in denen **Mischformen der Modul-, Plattform- und Baureihen-Bauweise** beobachtet werden¹⁵³. Mithilfe der Systemtechnik gelingt es, diese Beobachtungen durch einen systematischen Ansatz mit dem **fraktalen Charakter der Bauweise technischer Systeme** zu erklären (Abbildung 2.12).

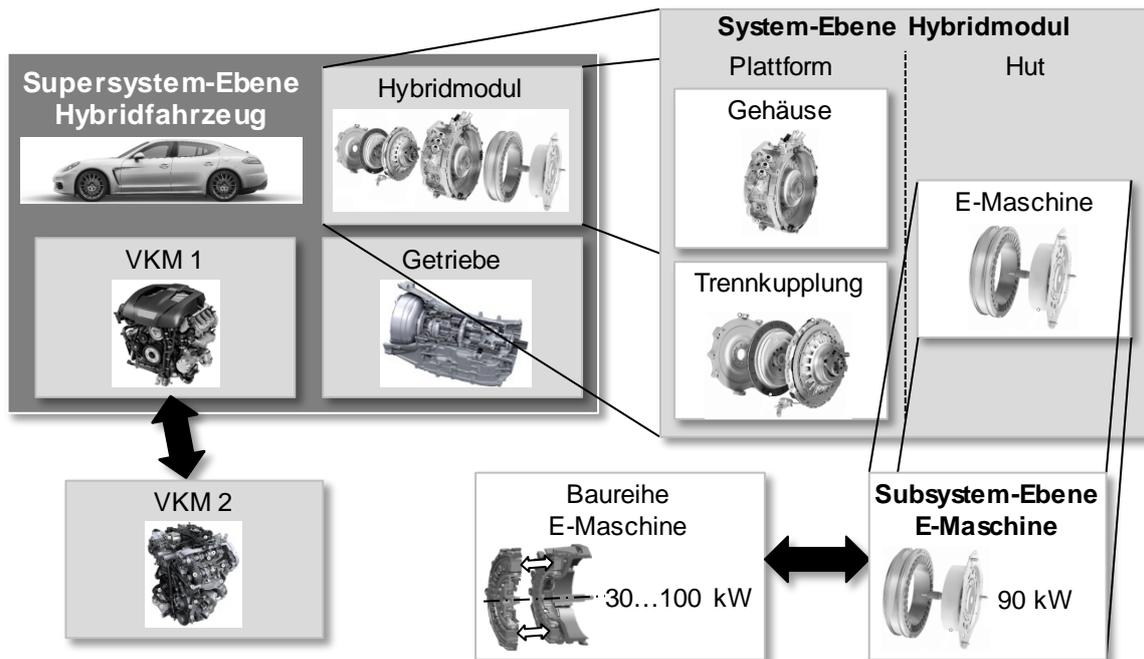


Abbildung 2.12: Fraktaler Charakter der Bauweise eines Hybridfahrzeugs¹⁵⁴

Der Grundgedanke lautet, dass auf jeder Systemebene eine andere Bauweise vorherrschen kann, unabhängig von den Bauweisen auf Supersystem- und Subsystem-Ebene. Im exemplarischen Beispiel herrscht auf der *Supersystem-Ebene* Hybridfahrzeug die modulare Bauweise (VKM kann substituiert, Hybridmodul kann weggelassen werden). Indes ist das Hybridmodul auf *Systemebene* in sich gemäß der Plattformbauweise aufgebaut, denn die Plattform (Gehäuse und Trennkupplung) bleibt beim Austausch der E-Maschine (Hut) immer gleich. Die E-Maschine auf *Subsystem-Ebene* ist wiederum Mitglied einer Baureihe, die über Variation der elektromagnetisch wirksamen Länge unterschiedliche Leistungsstufen enthält.

¹⁵² Im weiteren Verlauf der Arbeit schließt der Begriff „Baukasten-Entwicklung“ also die Entwicklung von Modulen und Subsystemen eines Baukastens mit ein.

¹⁵³ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015; vgl. auch: Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009; Seeger 2014; Krull & Mattfeld 2012; Hoffmann & Vietor 2014

¹⁵⁴ Abbildungen entnommen aus: Semmler et al. 2013; Kieser & Blessing 2010; Porsche 2014

In der Fahrzeugtechnik können mehrere Arten von Baukästen unterschieden werden. Zum einen gibt es Baukästen, deren Elemente die Grundarchitektur eines Fahrzeugs vorgeben (z. B. durch Lage und Anordnung des Triebstrangs, Anzahl der Sitzplätze). Sie sollen im Kontext dieser Arbeit als **Fahrzeugbaukästen** bezeichnet werden (z. B. Modularer Querbaukasten (MQB) und Modularer Längsbaukasten (MLB) des VW-Konzerns¹⁵⁵). Zum anderen existieren Baukästen, mit denen die Komponenten des Fahrzeugs konfiguriert werden können (z. B. Modularer Dieselbaukasten von VW, Getriebebaukasten von ZF¹⁵⁶). Sie sollen im Kontext dieser Arbeit als **Systembaukästen** bezeichnet werden. Ein Systembaukasten kann kompatibel zu mehreren Fahrzeugbaukästen sein. So können beispielsweise Motoren des modularen Dieselbaukastens sowohl in MQB- als auch in MLB-Fahrzeugen eingebaut werden. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit sind mit Baukästen stets die Systembaukästen gemeint.

2.3.2 Aktivitäten, Herausforderungen, Methoden

Im Folgenden werden unterschiedliche Phasen der Baukastenentwicklung in der Automobilindustrie vorgestellt und zugehörige Forschungsarbeiten diskutiert¹⁵⁷. Die **Frühe Phase**¹⁵⁸ definieren ALBERS ET AL. als eine „Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit der Bewertung einer Produktspezifikation endet“, in welcher u.a. Informationen zu verwendeten Technologien und Subsystemen sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile enthalten sind¹⁵⁹. Diese Produktspezifikation ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden Produkts (u. a. hinsichtlich Produzierbarkeit, erforderlicher Ressourcen), die sowohl physisch als auch virtuell stattfinden kann¹⁶⁰. In seinen Arbeiten entwickelt BURSAC Methoden für die Fahrzeugentwicklung im Kontext des MBSE-Ansatzes, die dabei helfen, konsistente Modelle von Fahrzeug- und Systembaukästen zu erstellen, die in der Frühen Phase verwendet werden können, um Fahrzeuge und ihre Subsysteme zu konfigurieren und abschließend zu

¹⁵⁵ Schuh, Arnoscht & Schiffer 2012

¹⁵⁶ Neußer, Kahrstedt, Dorenkamp & Jelden 2013; Scherer, Wagner, Naunheimer & Dick 2008; Kubalczyk & Kilian 2008

¹⁵⁷ Die Entwicklungsprozesse der Fahrzeughersteller sind sich prinzipiell ähnlich, sodass die nachfolgenden Ausführungen für die meisten Fahrzeughersteller gelten (Widmann 2011).

¹⁵⁸ Die Frühe Phase ist nicht zu verwechseln mit Frontloading, das alle Bemühungen zusammenfasst, Entwicklungsergebnisse frühzeitiger als zuvor hervorzubringen (z.B. durch neue Simulationsmethoden).

¹⁵⁹ Albers et al. 2016

¹⁶⁰ Bursac 2016. Die physische oder virtuelle Validierung kann z. B. mithilfe des IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatzes durchgeführt werden (Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016).

bewerten. Dabei kommt das Modellierungsframework nach ALBERS und BURSAC¹⁶¹ zum Einsatz, um Referenzmodelle zur Reduzierung des Modellierungsaufwands einzusetzen.

Die **Vorentwicklung** hat in der Fahrzeugentwicklung die Aufgabe, neue Technologien erstmalig auf ihre Umsetzbarkeit zu untersuchen und für die Serienentwicklung in einer kommenden Produktgeneration vorzubereiten¹⁶². Dazu werden erste Funktionsmuster und Prototypen entwickelt und validiert¹⁶³. In der Vorentwicklung können also noch grundlegende Eigenschaften von Gestalt und Lösungsprinzip der Produkte beeinflusst werden (z. B. die Triebstrangtopologie eines Hybridfahrzeugs¹⁶⁴), die in der späteren Serienentwicklung als fest vorgegeben gelten. Eine spezielle Aktivität der Vorentwicklung für Baukästen ist die sog. **Modularisierung**. Darunter wird die Erzeugung einer modularen Produktarchitektur¹⁶⁵ eines Produkts oder eines ganzen Produktportfolios verstanden (meist auf der Basis einer Vorgängergeneration, die noch nicht modular aufgebaut ist). Im Zuge der Modularisierung wird das Baukasten-Regelwerk entwickelt, das u. a. geeignete Schnittstellen zwischen den Modulen sowie die benötigte Anzahl an Modulausprägungen festlegt¹⁶⁶. Zur Modularisierung technischer Systeme im Rahmen von Vorentwicklungs-Aktivitäten existieren in der Literatur zahlreiche Ansätze, von denen nun einige exemplarisch vorgestellt werden¹⁶⁷.

Mit der Methode „Modular Engineering“ stellt KOPPENHAGEN einen Ansatz zur systematischen Ableitung modularer Produktarchitekturen vor¹⁶⁸. Kern der Methode ist die funktionale Dekomposition der bestehenden Produkte und die darauffolgende Neukonfiguration in Modulen mithilfe von Strukturmatrizen des Quality Function Deployment¹⁶⁹. BLEES setzt auf diesem Ansatz auf und erweitert ihn durch die besondere Berücksichtigung der räumlichen Lage von Modulen sowie die Einbeziehung sämtlicher Produktlebensphasen (u. a. Beschaffung, Produktion, Recycling) in die Modularisierung¹⁷⁰. SEDCHAICHARN hat eine rechnergestützte Methode zur Festlegung einer modularen Produktarchitektur entwickelt, die sich u. a.

¹⁶¹ Siehe Kapitel 2.2.5

¹⁶² Lohmeyer 2013; Widmann 2011

¹⁶³ Muschik 2011

¹⁶⁴ Siehe Kapitel 2.1

¹⁶⁵ Siehe Kapitel 2.5.1

¹⁶⁶ Bursac 2016

¹⁶⁷ Für einen Überblick über Methoden zur systematischen Bildung von modularen Produktfamilien sei verwiesen auf: Koppenhagen 2004, Bles 2011.

¹⁶⁸ Koppenhagen 2004

¹⁶⁹ Akao 2009

¹⁷⁰ Bles 2011; vgl. auch Kipp, Bles & Krause 2010

des C&C²-Ansatzes nach ALBERS¹⁷¹ bedient, um Funktion und Gestalt der Module zu berücksichtigen¹⁷². Die Methode von RENNER wurde im Kontext der Automobilindustrie entwickelt und erlaubt die systematische Konzeption von Baukästen, wobei die Kundensicht einen Schwerpunkt bildet¹⁷³. PFLIEGER hat einen Ansatz zur Modularisierung von Hybrid-Triebstrangsystemen entwickelt¹⁷⁴. Hier werden die Auswirkungen geometrischer und elektrischer Auslegungsparameter auf Energieeffizienz und Kosten analysiert, um mit dem entstehenden Baukasten möglichst viele Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugklassen hybridisieren zu können.

Da sich die vorliegende Arbeit mit Methoden zur Unterstützung der **Serienentwicklung** von Baukästen befasst, werden nun die Aktivitäten aufgeführt, die in einer solchen Serienentwicklung häufig vorkommen. Nachdem die Struktur von Baukästen und Modulen beispielsweise in Vorentwicklungs-Projekten größtenteils festgelegt wurde, kann diese in der Serienentwicklung als weitgehend unveränderbar aufgefasst werden, denn der Spielraum zur Änderung der Produktarchitektur und der Einteilung der Module ist nun weitaus geringer. Vielmehr wacht die Serienentwicklung über die Wahrung des modularen Ansatzes bis zur Serienproduktion des zu entwickelnden Systems.

Das zentrale übergeordnete Ziel der Serienentwicklung ist das **Erteilen der Freigabe** für das zu entwickelnde System (gilt für Gesamtfahrzeug und seine Systeme gleichermaßen). Diese Freigabe fungiert als Controlling-Organ zur Zielerreichung¹⁷⁵ und bescheinigt, dass ein System die relevanten Ziele, Anforderungen und Randbedingungen hinsichtlich Funktion, Lebensdauer sowie der Herstellbarkeit in verketteten Serienproduktionsprozessen erfüllt, also kundentauglich ist¹⁷⁶. Die Serienentwicklung erstreckt sich in der Regel, je nach Neuentwicklungs- und Übernahmeanteil des Systems, über einen Zeitraum zwischen 36 und 48 Monaten. Zur Untergliederung dieses Zeitraums wurden vom VDA¹⁷⁷ vier Reifegrade für Prototypen (sog. Muster) definiert, die iterativ aufeinander aufbauen

¹⁷¹ Siehe Kapitel 2.5.2

¹⁷² Sedchaicharn 2010

¹⁷³ Renner 2007

¹⁷⁴ Pflieger 2015

¹⁷⁵ Pflieger 2015

¹⁷⁶ Darstellung des Entwicklungsprozesses für Triebstrang-Systeme siehe z. B.: Schneider 2012; Düser 2010; Kirchner 2007.

¹⁷⁷ Verband der Automobilindustrie

und die jeweils unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen¹⁷⁸. Diese Musterteile können sowohl physisch als auch virtuell vorliegen.

Zum Erreichen der Freigabe liegt ein Schwerpunkt der Serienentwicklung auf der **Synthese einer seriengerechten Gestalt**. So wird von der Ausgangsbasis eines stark prototypischen Funktionsmusters (A-Muster, kann das Ergebnis eines Vorentwicklungsprojekts sein) zunächst ein Entwicklungsstand für Lebensdauertests (B-Muster) abgeleitet. Die Herstellbarkeit in verketteten Serienproduktionsprozessen (auch Industrialisierung genannt), die das finale Seriendesign maßgeblich mitbestimmt, wird im engen Zusammenhang mit der Produktionssystem-Entwicklung in weiteren Iterationen (C- und D-Muster) festgelegt. Beispielsweise wird das Gehäuse des Hybridmoduls, das im A-Muster ein Frästeil ist, durch Gestaltvariation auf die Serienherstellung im Druckgussverfahren umgestellt, indem u. a. Gussradien und Entformschrägen hinzugefügt werden. Bei dieser Serien-Gestaltsynthese müssen weitaus mehr Ziele, Anforderungen und Randbedingungen einfließen (z. B. Gesetzeserfüllung in Zielmärkten, Wartung, Recycling und Abbau), als üblicherweise in Vorentwicklungs-Projekten berücksichtigt werden. Weiterhin ist die Integration des zu entwickelnden Systems (z. B. ein Hybridmodul) in mehrere Supersysteme (z. B. in mehrere Hybridfahrzeuge) eine Quelle zahlreicher konstruktiver Modifikationen. Das zentrale Produktmodell für diese stark iterative Gestaltsynthese liefert das CAD-System, aus welchem oftmals weitere Produktmodelle (z. B. zur Simulation und Berechnung) abgeleitet werden¹⁷⁹. Somit betreffen die einzelnen Syntheseschritte der Serienentwicklung weniger – wie in der Vorentwicklung – das globale Konzept des Baukastens, sondern mehr die konstruktiven Details.

Der andere Schwerpunkt der Serienentwicklung liegt auf der **zentralen Aktivität der Validierung**, welche letztlich den für die Freigabe erforderlichen Nachweis erbringt, dass das entwickelte System den Kriterien des Zielsystems genügt. Die Erkenntnisse der Validierung fließen stets in die Gestaltsynthese zurück. Die Validierung erfolgt anhand physisch oder virtuell vorliegender Prototypen des zu entwickelnden Systems. Hierbei kann beispielsweise der IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz das systematische Vorgehen fördern und Validierungen bereits früh in der Produktentwicklung ermöglichen¹⁸⁰. Eine hohe Bedeutung kommt in der Serienentwicklung jenen Testfällen zu, die die Beanspruchung des technischen Systems im späteren Kundengebrauch wiedergeben. In der Baukastenentwicklung müssen darüber hinaus Lösungen zur schlanken und gleichzeitig umfassenden

¹⁷⁸ VDA 2006; VDA 2007

¹⁷⁹ Lindemann 2009; Motzer & Rudolph 2013

¹⁸⁰ Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

Validierung gefunden werden, ohne dass die Module in jedem Fahrzeug, in dem sie eingesetzt werden, erneut vollumfänglich abgeprüft werden müssen.

Die Serienentwicklung eines neuen Fahrzeugs und seiner Systeme findet in der Regel unter den folgenden Rahmenbedingungen statt: Fahrzeughersteller haben üblicherweise eine **matrixförmige Organisationsstruktur**, wobei sich die Organisationseinheiten (OE) für Projektbeauftragung und -organisation mit den OE mit Produktfunktions- und Bauteil-Verantwortungen überlappen¹⁸¹. Somit fungiert eine unternehmensinterne OE als Auftraggeber derjenigen Serienentwicklungs-OE, die ein System (z. B. ein Hybridmodul) bzw. einen Systembaukasten als Teilmenge des Supersystems Gesamtfahrzeug verantwortet. Außerdem ist die Serienentwicklung charakterisiert durch einen ausgeprägten **Simultaneous-Engineering-Prozess**, die Integration von Systemlieferanten sowie die Einbindung vieler Projektbeteiligter (u. a. Beschaffung, After Sales, zentrale Qualität)¹⁸². Überdies sind im Kontext der Baukastenentwicklung oftmals mehrere Fahrzeugmarken eines Konzerns oder mehrere Konzerne im Rahmen von Entwicklungs-Kooperationen an der Entwicklung beteiligt¹⁸³. Weiterhin spielen Netzwerke aus System- und Unter-Lieferanten eine wesentliche Rolle¹⁸⁴.

2.3.3 Komplexität in der Entwicklung von Baukästen

Nachdem Kapitel 2.3.2 einige allgemeine Gegebenheiten und Rahmenbedingungen der Fahrzeug-Serienentwicklung vorgestellt hat, geht das Teilkapitel speziell auf die **Komplexitätstreiber** in der Serienentwicklung von Baukästen ein. Diese Zusammenhänge werden durch die Abbildung 2.13 illustriert.

Sie zeigt die Produktgenerationsentwicklung von drei unterschiedlichen Fahrzeugen mit jeweils unterschiedlichen VKM und Getrieben, in denen verschiedene Varianten des Hybridmoduls verbaut sind¹⁸⁵. Diese Hybridmodulvarianten verbindet aufgrund des Gleichteileprinzips der Baukastenentwicklung ein hoher Übernahmevariations-

¹⁸¹ Mayer-Bachmann 2007

¹⁸² Pflieger 2015, dort nach Haberfellner & Daenzer 1999

¹⁸³ Für ausführliche Darstellungen verschiedener Kooperationsformen von Fahrzeugherstellern sowie der Rolle von (System-)Lieferanten, speziell im Kontext der Baukastenentwicklung, sei auf folgende Literatur verwiesen: Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009; Renner 2007; Eversheim, Schernikau & Goeman 1996; Neubauer 2012.

¹⁸⁴ Albers 1994

¹⁸⁵ Die Vorgänger- und Nachfolgenerationen der Fahrzeuge SUV, Limousine und Sportwagen sind zwecks Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Anteil¹⁸⁶. Sie entstammen dem Systembaukasten „Hybridmodul“, dessen Entwicklung ebenfalls als Zeitstrahl dargestellt ist. Die roten Verbindungslinien zwischen den Hybridmodulen veranschaulichen die **inhaltlichen Abhängigkeiten** in der Entwicklung von Baukästen: Aufgrund des Gleichteileprinzips sind die Hybridmodulgenerationen in den unterschiedlichen Fahrzeugen technisch eng miteinander verwandt und erfordern so eine starke Vernetzung der SUV-, Limousinen- und Sportwagen-Entwicklung¹⁸⁷.

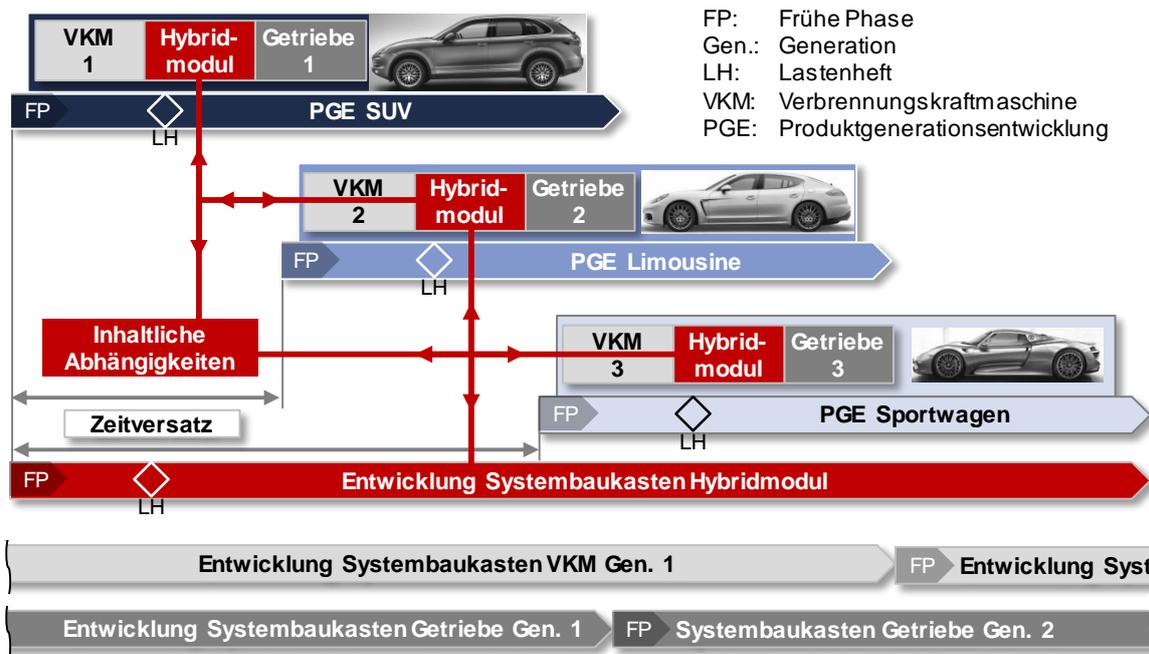


Abbildung 2.13: Inhaltliche Abhängigkeiten und Zeitversatz in der Baukastenentwicklung am Beispiel der Hybridfahrzeuge von Porsche¹⁸⁸

Die Auswirkungen dieser inhaltlichen Abhängigkeiten sind in allen Bereichen der Produktentwicklung zu spüren, was anhand des ZHO-Modells gezeigt werden kann: Das **Zielsystem** der Baukastenentwicklung setzt sich zusammen aus Zielen, Anforderungen und Randbedingungen der Baukasten-Nutzer (SUV, Limousine und Sportwagen). So wird das Baukasten-Zielsystem sehr umfangreich, weil zu einzelnen Anforderungen (z.B. die E-Maschinen-Leistung oder die maximal zulässige Wasserdurchfahrtshöhe) aufgrund der **Verschiedenartigkeit der Baukasten-Nutzer** mehrere Ausprägungen vorliegen, die alle im Baukasten-Zielsystem gebündelt

¹⁸⁶ An dieser Stelle ist erkennbar, dass sich die Entwicklung von Baukästen sehr gut mit der Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.2.2) beschreiben lässt: Die Baukasten-Entwicklung zeichnet sich nämlich aufgrund ihres Zwecks, die interne Teilevielfalt zu reduzieren, durch einen ausgeprägten Übernahmevariations-Anteil über das gesamte Produkt-Portfolio hinweg aus.

¹⁸⁷ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

¹⁸⁸ Nach Albers, Bursac & Scherer 2014

werden¹⁸⁹. In solchen Fällen enthält das Baukasten-Zielsystem nicht nur eine, sondern mehrere Ausprägungen pro Anforderung (und damit eine Wertespanne). In der Folge muss die Baukastenentwicklung sicherstellen, dass das zu entwickelnde Modul diese Wertespanne von Anforderungen abdecken kann¹⁹⁰.

Im **Objektsystem** sind aufgrund der Mehrfachverwendung eines Moduls viele **technische Wechselwirkungen** zu berücksichtigen, d.h. bevor das Hybridmodul (z.B. im Zuge der Limousinen-Entwicklung) geändert werden darf, muss diese Änderung gleichzeitig bei allen anderen Modul-Nutzern (also im Rahmen der Sportwagen- und SUV-Entwicklung) auf Umsetzbarkeit geprüft werden¹⁹¹. Hierbei spielt die Kompatibilität des Hybridmoduls mit den dargestellten Nachbarsystemen VKM und Getriebe, die ihrerseits einem eigenen Systembaukasten angehören, eine besondere Rolle.

Neben der produktseitig gestiegenen Komplexität in Ziel- und Objektsystem steigt durch die inhaltlichen Abhängigkeiten auch die prozessuale Komplexität im **Handlungssystem**¹⁹². Die Tragweite der vernetzten Entwicklung von Fahrzeugen und Systembaukästen bringen KRULL und MATTFELD zum Ausdruck. Sie stellen fest, dass Terminänderungen in der Modul-Entwicklung erhebliche Konsequenzen auf das gesamte Terminmanagement der betroffenen Fahrzeugentwicklungen bewirken können¹⁹³.

Die inhaltlichen Abhängigkeiten ließen sich freilich teilweise auflösen, indem beispielsweise das Hybridmodul in eine Plattform und mehrere fahrzeugspezifische Hüte zerlegt würde. In Fällen, in denen technische Zielkonflikte mit Gleichteilen nur mit hohem Aufwand überwindbar wären, sind solche Ansätze auch sinnvoll. Sie führen aber immer zu einer Verringerung des Übernahmevarianteanteils und damit zu einer Senkung der Skaleneffekte. Somit besteht bei der Bildung zu vieler Varianten die Gefahr, eines der zentralen Ziele der Baukastenentwicklung zu unterwandern und die interne Vielfalt nicht wirksam zu begrenzen¹⁹⁴.

Neben den inhaltlichen Abhängigkeiten ist der **Zeitversatz** der Fahrzeugentwicklungen der zweite Haupt-Komplexitätstreiber in der Baukasten-Serienentwicklung¹⁹⁵. Dieser Zeitversatz kann in der Praxis Werte von vier Jahren

¹⁸⁹ Siehe Kapitel 2.4.4

¹⁹⁰ Renner 2007

¹⁹¹ Albers, Bursac & Scherer 2014

¹⁹² Schneider 2012; Weber 2005

¹⁹³ Krull & Mattfeld 2012

¹⁹⁴ Seeger 2014

¹⁹⁵ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

und mehr annehmen, sodass die Entwicklung des ersten Modul-Nutzers (z. B. SUV, Beispiel aus Abbildung 2.13) bereits abgeschlossen ist, noch bevor das Lastenheft (und damit die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen) des letzten Modul-Nutzers (z. B. Sportwagen, Beispiel aus Abbildung 2.13) erstellt und verabschiedet wird. Über das Zielsystem des letzten Modul-Nutzers ist also zu Beginn der Baukastenentwicklung des Hybridmoduls relativ wenig bekannt; der Sportwagen-Anteil im Baukasten-Zielsystem ist also mit einer hohen Unsicherheit behaftet¹⁹⁶. Im Falle des oben aufgeführten Beispiels bedeutet das konkret: Die Änderung des Hybridmoduls, beispielsweise hervorgerufen in der Limousinen-Entwicklung, kann zwar in der SUV-Entwicklung auf Umsetzbarkeit geprüft werden, doch zur Sportwagen-Entwicklung kann zu diesem Zeitpunkt womöglich gar keine Aussage getroffen werden. Trotzdem muss der Hybridmodul-Baukasten unter Berücksichtigung aller Nutzer und deren Zielen rechtzeitig konkretisiert werden, damit der früh einsetzende SUV mit dem Hybridmodul ausgerüstet werden kann. Die Herausforderung besteht also darin, trotz unsicherheitsbehafteter, teils vager Baukasten-Ziele ein Hybridmodul zu entwickeln, das ohne wesentliche Änderungen bei allen vorgesehenen Baukasten-Nutzern verwendet werden kann¹⁹⁷. Folglich gilt es zu verhindern, dass die zu Beginn der Baukastenentwicklung zugrunde gelegten Annahmen in der Entwicklung des letzten Baukasten-Nutzers nicht umsetzbar sind und somit Module entstehen, die nur einen geringen Übernahmevariations-Anteil haben.

Es ist nur schwer möglich, den Zeitversatz im Rahmen von Entwicklungsmethoden oder anderen Ansätzen zu reduzieren, denn die Festlegung der Entwicklungszeiträume der verschiedenen Fahrzeuge folgt übergeordneten Unternehmenszielen (z. B. Unternehmensauslastung, Marktentwicklung mit Volumen, Wettbewerbern, Wirtschaftslage). Die Entwicklungszeiträume und damit der Zeitversatz zwischen einzelnen Systembaukästen (in Abbildung 2.13 unten angedeutet) richtet sich nach technologischen Gesichtspunkten (d. h. sobald die alte Baukastengeneration an ihre Grenzen stößt, muss sie durch die Nachfolgenergeneration abgelöst werden). Diese Faktoren sind ebenfalls auf nicht lenkbare äußere Einflüsse zurückzuführen (z. B. Gesetzeslage der Zielmärkte, gestiegene Kundenbedürfnisse). Wenn also Entwicklungsmethoden zur Unterstützung der Baukasten-Serienentwicklung praxistauglich sein sollen, müssen diese den Zeitversatz berücksichtigen¹⁹⁸.

¹⁹⁶ Kopenhagen 2004; dort nach Gonzalez-Zugasti, Otto & Baker 1999

¹⁹⁷ Renner 2007

¹⁹⁸ Albers, Bursac & Scherer 2014

Mehrere Autoren schlagen daher vor, sowohl Baukasten- als auch Fahrzeug-Entwicklungen sorgfältig zu planen und zukünftige Modulvarianten stets zu berücksichtigen¹⁹⁹. Diese Maßnahme allein kann die Komplexität aufgrund des Zeitversatzes in der Baukastenentwicklung jedoch nur bedingt beheben: Wegen der unsicherheitsbehafteten Entwicklungsziele des Baukastens kann dieser nicht vollumfänglich zeitgleich zum ersten Baukasten-Nutzer entwickelt werden. Vielmehr müssen im Zuge jeder Fahrzeugentwicklung – unter Beibehaltung eines möglichst hohen Gleichteileanteils – einige wenige Bestandteile des Moduls fahrzeugspezifisch angepasst werden (hauptsächlich durch Gestalt- und Übernahmevariation)²⁰⁰. Welche Änderungen dies sind, kann oft erst im Zuge der fortschreitenden Entwicklung – und damit einhergehend mit konkreter werdenden Entwicklungszielen – identifiziert werden²⁰¹. Somit ist eine Baukastenentwicklung nicht auf den Zeitraum einer herkömmlichen Produktentwicklung begrenzt, sondern kann erst abgeschlossen werden, wenn der letzte Baukasten-Nutzer in Serie geht²⁰². Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Feststellung, dass die Baukastenentwicklung – entgegen der Darstellung mehrerer Autoren²⁰³ – weniger eine unabhängige, vorgelagerte Phase des Produktentstehungsprozesses ist²⁰⁴. Sie ist vielmehr als eine fortwährende, begleitende Aktivität im Sinne des iPeM²⁰⁵ zu verstehen²⁰⁶.

Neben der Handhabung der Unsicherheit kommt durch die zeitliche Ausdehnung der Baukastenentwicklung eine weitere Herausforderung im Bereich des Wissensmanagements hinzu: Es ist keineswegs sichergestellt, dass während der gesamten Länge der Baukastenentwicklung (z. B. des Hybridmoduls) immer dieselben Projektbeteiligten zur Verfügung stehen (u. a. aufgrund von Personalfuktuation²⁰⁷). Somit erhöht sich – im Vergleich zu herkömmlichen Entwicklungen – das Risiko, dass wertvolle Informationen und speziell implizites (Erfahrungs-)Wissen der Entwickler abwandern und für die erfolgreiche Weiterführung der Baukastenentwicklung nicht mehr verwendbar sind. Solche

¹⁹⁹ Krull & Mattfeld 2012; Seeger 2014; Grässler 2001

²⁰⁰ Somit hat jedes neu zu entwickelnde Modul ein Referenz-Modul. Daher folgt auch die Entwicklung eines Baukastens in ihrem Inneren den Mechanismen der Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.2.2).

²⁰¹ Solch eine schrittweise Konkretisierung der Entwicklungsziele ist charakteristisch für jede Produktentwicklung (Albers, Lohmeyer & Ebel 2011), ist aber in der Baukastenentwicklung aufgrund ihrer zeitlich längeren Ausdehnung besonders ausgeprägt.

²⁰² Diese Phänomene konnten durch empirische Studien nicht nur für die Automobilindustrie, sondern auch in anderen Branchen nachgewiesen werden (Bursac 2016).

²⁰³ Vgl. z. B. Schuh 2015

²⁰⁴ Albers, Bursac & Scherer 2014

²⁰⁵ Siehe Kapitel 2.2.4

²⁰⁶ Bursac 2016

²⁰⁷ Schneider 2012

Informationen und solches Erfahrungswissen sind speziell in der Baukastenentwicklung wertvoll, weil in der Regel während der Entwicklung des ersten Baukasten-Nutzers besonders viele Erfahrungen gesammelt werden, die dann den Entwicklungen der nachfolgenden Baukasten-Nutzer zugutekommen können.

2.3.4 Zwischenfazit

Die **Entwicklung von Baukästen** sind ein zielführendes und etabliertes Mittel in der Automobilindustrie, um die **externe Vielfalt** bei gleichzeitiger Senkung der **internen Vielfalt** zu erhöhen. Die Literatur bietet bereits mehrere Methoden zur Modularisierung technischer Systeme, und auch für die Frühe Phase wurden erste Ansätze erarbeitet. In der **Serienentwicklung von Baukästen** treten andere Herausforderungen auf, wobei **zwei Haupt-Komplexitätstreiber** identifiziert werden können: Die **inhaltlichen Abhängigkeiten** sorgen für technische Wechselwirkungen im Objektsystem sowie für ein komplexes Baukasten-Zielsystem. Der **Zeitversatz** führt zu erhöhter Unsicherheit im Baukasten-Zielsystem sowie zu Herausforderungen im Wissensmanagement. Diese Haupt-Komplexitätstreiber lassen sich durch methodische Ansätze nur schwer beseitigen. Deswegen müssen **neue Methoden** entwickelt werden, die die inhaltlichen Abhängigkeiten und den Zeitversatz berücksichtigen und somit dabei helfen können, die **Komplexität** der Baukasten-Serienentwicklung **handhabbar** zu machen. Dabei scheinen die Themenschwerpunkte **Anforderungsmanagement** (Handhabung des Baukasten-Zielsystems) und **Wissensmanagement** (Handhabung von Informationen und Erfahrungswissen) erfolgversprechend zu sein.

2.4 Anforderungsmanagement

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Umgang mit Entwicklungszielen und Anforderungen als ein wesentlicher Stellhebel zur erfolgreichen Entwicklung von Baukästen identifiziert. Das vorliegende Kapitel widmet sich diesem Thema, das **Anforderungsmanagement** genannt wird und sich den **Inhalten des Zielsystems** zuwendet. Das Kapitel 2.4.1 verdeutlicht die **Relevanz** dieses Themenkomplexes und vermittelt wichtige **Grundlagen** und **Begriffsdefinitionen**. Darauf folgen in Kapitel 2.4.2 die **Aktivitäten** des Anforderungsmanagements, dabei auftretende **Herausforderungen** und unterstützende **Methoden**. Das Kapitel 2.4.3 stellt bestehende **modellbasierte Ansätze** fürs Anforderungsmanagement vor. Schließlich stellt Kapitel 2.4.4 einen inhaltlichen **Zusammenhang** zwischen den Inhalten des **Anforderungsmanagements** und der **Baukastenentwicklung** her.

2.4.1 Motivation, Grundlagen, Definitionen

Dieses Kapitel soll den thematischen Einstieg in das Anforderungsmanagement ermöglichen²⁰⁸. Dazu werden zunächst wichtige Begriffe definiert. Darauf folgen die Beschreibung wesentlicher Grundlagen und die Erörterung der Bedeutung des Anforderungsmanagements für eine erfolgreiche Produktentwicklung.

POHL und RUPP definieren Requirements Engineering (in der vorliegenden Arbeit gleichbedeutend verwendet mit dem Begriff Anforderungsmanagement) als einen systematischen Ansatz zur Spezifikation und zum Management von Anforderungen. Die Zielsetzungen des Ansatzes sind: Wünsche und Bedürfnisse aller Interessenvertreter zu **kennen**, Anforderungen unter Konsens zu **spezifizieren**, standardkonform zu **dokumentieren** und systematisch zu **managen**. Daraus ergeben sich die **vier Haupttätigkeiten** Ermitteln, Dokumentieren, Prüfen und Abstimmen (d. h. Validieren) sowie Verwalten von Zielsystem-Elementen.²⁰⁹ Die wichtigsten dieser Elemente sind die **Ziele, Anforderungen und Randbedingungen** (Abbildung 2.14). Diese Begriffe werden nun definiert, wobei zu alternativen Definitionen auf Literatur verwiesen wird²¹⁰.



Abbildung 2.14: Ziele, Anforderungen und Randbedingungen²¹¹

Ein **Ziel** ist die bewusste gedankliche Vorwegnahme eines zukünftigen Soll-Zustands, der gemeinsam vereinbart und durch aktives Handeln angestrebt oder vermieden wird²¹².

²⁰⁸ Standardwerke zum Requirements Engineering: Pohl & Rupp 2011; Ebert 2012. Darüber hinaus geben CHENG & ATLEE einen ausführlichen Überblick über existierende Methoden, Strategien, Techniken und Tools zur Unterstützung der Aktivitäten des Anforderungsmanagements (Cheng & Atlee 2007).

²⁰⁹ Pohl & Rupp 2011

²¹⁰ Ausführliche Ausführungen unterschiedlicher Begriffsdefinitionen finden sich bei EBEL und BRANDT (Ebel 2015; Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit).

²¹¹ Nach Ebel 2015

²¹² Lohmeyer 2013, dort nach Eiletz 1999

Eine **Anforderung** ist...

- eine Eigenschaft oder Bedingung, die ein System oder eine Person benötigt, um ein Problem zu lösen oder ein Ziel zu erreichen,
- eine Eigenschaft oder Bedingung, die ein System oder eine Systemkomponente aufweisen muss, um einen Vertrag, eine Norm, eine Spezifikation oder ein anderes formell vorgegebenes Dokument zu erfüllen,
- eine dokumentierte Repräsentation einer Eigenschaft oder Bedingung, wie in den ersten beiden Punkten beschrieben²¹³.

Eine **Randbedingung** ist ein aus dem Umfeld der Entwicklung resultierender äußerer Einfluss, der von anderen verantwortet wird und daher zwar ermittelt, aber nicht eigenständig definiert oder geändert werden kann²¹⁴.

Ziele stehen nach STECHERT auf einer höheren Abstraktionsstufe als Anforderungen²¹⁵. Umgekehrt beschreiben Anforderungen ein Ziel konkretisierend²¹⁶. Ziele bilden den Ausgangspunkt für das Erfassen von Anforderungen. Im Allgemeinen ist die Definition mehrerer Anforderungen erforderlich, um die Erreichung eines Ziels messbar zu machen. Durch die gemeinschaftliche Betrachtung von Zielen und Anforderungen einschließlich ihrer Relationen lässt sich ein **besseres Systemverständnis** erzielen, weswegen Ziele ein nicht wegzudenkender Bestandteil eines jeden Zielsystems sein sollten²¹⁷.

In der Literatur zum Anforderungsmanagement ist die Unterteilung von Anforderungen in funktionale Anforderungen (beschreiben Produkteigenschaften oder Services, die bereitgestellt werden sollen) und nicht-funktionale Anforderungen (beschreiben Ausprägung und Qualität der Produkteigenschaft, z. B. Sicherheit, Genauigkeit, Performance, Handling, Flexibilität, Anpassungsfähigkeit) sehr gebräuchlich²¹⁸. Diese Unterscheidung stammt aus der Softwareentwicklung und ist für die Entwicklung mechanischer und mechatronischer Systeme nur bedingt geeignet. Der Ausdruck „nicht-funktional“ kann missverständlich wirken, denn insbesondere solche Anforderungen (z. B. Drehmomentgenauigkeit einer Reibkupplung, geforderte Laufleistung und Betätigungshäufigkeit eines

²¹³ Ebel 2015, dort nach IEEE 610.12 1990

²¹⁴ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013

²¹⁵ Stechert 2010

²¹⁶ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012; Lohmeyer 2013

²¹⁷ Pohl 2011

²¹⁸ Siehe z. B. van Lamsweerde 2001, dort nach Keller, Kahn & Panara 1990

Fahrzeuggetriebes) haben einen starken Einfluss auf die Auswahl geeigneter Lösungsprinzipien und der Gestalt und bestimmen somit die Funktion eines überwiegend mechanischen Systems erheblich. POHL schlägt eine brauchbare Alternative vor und unterscheidet zwischen **funktionalen Anforderungen** und **Qualitäts-Anforderungen**²¹⁹. Diese Begriffe werden auch in der vorliegenden Arbeit verwendet²²⁰. Randbedingungen lassen sich nach ALBERS und MUSCHIK ebenfalls unterteilen in **exogene Randbedingungen** mit Ursprung außerhalb des Unternehmens (z. B. Gesetzgebung, ISO-Normen) und **endogene Randbedingungen** mit Ursprung innerhalb des Unternehmens (z. B. Kostenziele, Werknormen), die vom Projektteam nicht eigenverantwortlich geändert werden dürfen²²¹.

Die zunehmende Komplexität der zu entwickelnden Systeme schlägt sich unmittelbar in der **Komplexitätssteigerung** der zugehörigen **Ziele, Anforderungen und Randbedingungen** nieder²²². Diese Zielsystem-Elemente sind wegweisend für den Verlauf der gesamten Produktentwicklung, denn erst wenn Ziele richtig verstanden werden, kann die Planung, Durchführung und Prüfung zielgerichteter Aktivitäten erfolgen²²³. ROTH betont deswegen den Stellenwert eines guten Zielsystems aufgrund seines weitreichenden Einflusses auf die Produktqualität²²⁴, der jedoch in der Praxis häufig unterschätzt wird²²⁵. Umgekehrt steigern mangelhafte oder schlichtweg fehlende Anforderungen in erheblichem Maße das Risiko des Misserfolgs, wie GRIMM aus Erfahrungen eines Automobilherstellers berichtet: Mehr als 40 % der bei Softwarefunktionen beobachteten Fehler ließen sich auf unreife Spezifikationen zurückführen²²⁶. Zu einem ähnlichen Schluss kommt CARR, der beobachten konnte, dass nur 16 % der Produktentwicklungen das liefern, was zuvor versprochen wurde²²⁷.

Den langen Stellhebel, den das Anforderungsmanagement auf Erfolg oder Misserfolg einer Produktentwicklung hat, basiert auf mehreren Aspekten: So weist WIDMANN darauf hin, dass der Einfluss auf Entwicklungsergebnis und Prozessstabilität in frühen Phasen, in denen auch das Haupt-Arbeitspensum des

²¹⁹ Pohl 2011

²²⁰ Für weitere Einteilungsmöglichkeiten von Anforderungstypen (u. a. nach Bedeutung, Herkunft, Produktlebensphase) siehe: Ebel 2015.

²²¹ Albers & Muschik 2010; Muschik 2011

²²² Grimm 2003

²²³ Albers, Klingler & Ebel 2013; Ebel 2015

²²⁴ Feldhusen & Grote 2013, dort nach Roth 2000

²²⁵ Feldhusen & Grote 2013, dort nach Schroda 2000

²²⁶ Grimm 2003

²²⁷ Carr 2000

Anforderungsmanagements liegt, besonders hoch ist²²⁸. Soll das in Entwicklung befindliche System aufgrund zu spät erkannter Ziele nachträglich modifiziert werden (z. B. im Rahmen von Design-Reviews²²⁹), steigen finanzieller und organisatorischer Aufwand enorm an²³⁰. STECHERT schätzt die Steigerung der Änderungskosten mit dem Faktor 10 beim Übergang in die jeweils nächste Entwicklungsphase²³¹. Unter allen Autoren herrscht also die Meinung, dass das **Anforderungsmanagement** eine **Kernaktivität für eine erfolgreiche Produktentwicklung** ist. Die Rolle des Anforderungsmanagements als Erfolgsfaktor von Unternehmen wird noch weiter unterstrichen durch Forschungsergebnisse von SCHMIDT-KRETSCHMER ET AL., die festgestellt haben, dass Unternehmen mit einem stark ausgeprägten systematischen Anforderungsmanagement ein überdurchschnittliches Wachstum verzeichnen können²³².

2.4.2 Aktivitäten, Herausforderungen, Methoden

Nach der Aufführung allgemeiner Qualitätskriterien für Zielsysteme werden anhand der vier Haupttätigkeiten des Anforderungsmanagements nach POHL und RUPP die jeweils zugehörigen Herausforderungen und Methoden vorgestellt. (Eine ähnliche Einteilung der Haupttätigkeiten des Anforderungsmanagements findet sich bei EIGNER ET AL.²³³.) Danach wird näher auf die Unsicherheit von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen eingegangen. Hiernach wird der Anforderungsmanagement-Prozess in der Automobilindustrie knapp ausgeführt.

Dieser Abschnitt listet zunächst allgemeine **Qualitätskriterien für Zielsysteme** auf. Ein Zielsystem und seine Elemente sollten korrekt, eindeutig, vollständig, konsistent (d. h. frei von Zielkonflikten), nicht redundant, gewichtet nach Relevanz oder Härte, verifizierbar, modifizierbar und nachverfolgbar sein²³⁴. Zur Sicherstellung der Relevanz von Zielen gehört auch, unwichtige und bezugslose Zielsystem-Elemente wegzulassen, um sich von unnötigem „Ballast“ zu trennen und den Blick auf die wesentlichen Ziele nicht zu verlieren²³⁵. Zur Dokumentation solcher Zielsystem-Eigenschaften definiert MUSCHIK Attribute wie den Status (Konkretisierung und

²²⁸ Widmann 2011

²²⁹ Carr 2000

²³⁰ Ehrlenspiel 2009

²³¹ Stechert 2010

²³² Schmidt-Kretschmer, Gericke & Blessing 2007

²³³ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014

²³⁴ Larsson & Steen 2008, dort nach IEEE 830 1998; Stechert & Franke 2009, dort nach Roozenburg & Dorst 1991; van Lamsweerde 2001

²³⁵ van Lamsweerde 2001

Vollständigkeit) und die Qualität (Validität, Konsistenz und Vergleichbarkeit)²³⁶ eines Ziels²³⁷. Um Eigenschaften des Zielsystems wie Nachvollziehbarkeit, Verständlichkeit und Vollständigkeit erfüllen zu können, sollte dieses nicht ausschließlich Ziele, Anforderungen und Randbedingungen enthalten, sondern auch Anwendungsfälle des Produkts, Erklärungen, Hintergrundinformationen und Beschreibungen vorgesehener Validierungsmaßnahmen²³⁸. Wenn also im weiteren Verlauf der Arbeit von einem Zielsystem und seiner modellhaften Abbildung die Rede ist, sind diese Elemente stets miteingeschlossen.

Die folgenden Abschnitte stellen die Aktivitäten und Methoden des Anforderungsmanagements anhand der vier Haupttätigkeiten vor²³⁹. Zur ersten Haupttätigkeit, der **Ermittlung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen**, existiert ein großer Fundus an Methoden und Hilfsmitteln (zusammengefasst und bewertet z. B. von AHRENS²⁴⁰). Die drei häufigsten Quellen für die Ermittlung der Zielsystem-Elemente sind bestehende Dokumente, an der Entwicklung beteiligte Interessenvertreter (darunter auch der Kunde) sowie Referenzprodukte, die mit dem zu entwickelnden System vergleichbar sind (z. B. Vorgängergeneration, Wettbewerbsprodukte)²⁴¹. Die Analyse von Referenzprodukten ist eine gängige Praxis, denn sie bietet Vorteile wie Zeitersparnis sowie die Vergleichbarkeit, um gezielt Verbesserungen gegenüber der Vorgängergeneration oder einem Wettbewerbsprodukt zu definieren. Gleichwohl birgt dieses Vorgehen die Gefahr, bestehende Fehler zu übertragen oder neue Inkonsistenzen hinzuzufügen, wenn die Gültigkeit alter Zielsystem-Elemente beim Transfer nicht sorgfältig geprüft und hinterfragt wird²⁴².

Im Folgenden werden zwei methodische Hilfsmittel zur Anforderungsermittlung näher betrachtet²⁴³. Die **Hauptmerkmalliste** nach FELDHUSEN und GROTE (Anhang A) enthält eine Sammlung von Schlagworten zu verschiedenen technischen Themen (z. B. Abmessungen, Kühlung, Luft- und Kriechstrecken), zu den

²³⁶ Qualität enthält u. a. die Aussagekraft, Belastbarkeit und Realisierbarkeit eines Ziels; Vergleichbarkeit beschreibt, ob Ziele eines Zielsystems vergleichbar bzw. auf gleichem Stand sind; Konsistenz berücksichtigt, ob miteinander vernetzte Ziele eines Zielsystems kompatibel sind (Albers, Muschik & Ebel 2010).

²³⁷ Albers & Muschik 2010; Muschik 2011

²³⁸ Solche Elemente machen in der Praxis teils über die Hälfte eines Zielsystems aus (Weber & Weisbrod 2003).

²³⁹ Pohl & Rupp 2011. Eine ähnliche Einteilung findet sich in Gilz 2014.

²⁴⁰ Ahrens 2000

²⁴¹ Albers, Bursac & Wintergerst 2015

²⁴² Pohl & Rupp 2011; Domann, Juergens & Streit 2009

²⁴³ Ein ausführlicher Überblick über andere Ermittlungstechniken wurde von WÄSCHLE erstellt (Wäschle 2014, betreute Abschlussarbeit).

Produktlebensphasen (z. B. Fertigung und Montage, Transport und Logistik, Recycling und Verwertung) und zur Organisation der Entwicklung (z. B. Liefertermine, Verantwortlichkeiten) und fördert so die Berücksichtigung möglichst aller Themen und Einflussfaktoren, die Bestandteil eines vollständigen Zielsystems sein müssen²⁴⁴. In der **Anwendungsfallanalyse**²⁴⁵ werden die Wechselwirkungen zwischen Produkt, seiner Umgebung und seinen Anwendern in sog. Use Cases systematisch erfasst²⁴⁶. Sie hat das Ziel, den Brückenschlag zwischen der anschaulichen Darstellung der Produktnutzung und den daraus abgeleiteten Entwicklungszielen herzustellen²⁴⁷. Dabei werden alle Produktlebensphasen durchdacht, damit beispielsweise Anforderungen aus Herstellung und Montage, Gebrauch und Wartung sowie Recycling und Verwertung ebenfalls berücksichtigt werden²⁴⁸. Hier sollten auch außergewöhnliche Verhaltensweisen der Benutzer (z. B. vorhersehbarer Produkt-Fehlgebrauch) betrachtet werden, sodass Vorbeugemaßnahmen, beispielsweise mit Methoden der mittelbaren und unmittelbaren Sicherheitstechnik, getroffen werden können²⁴⁹. Aus den Use Cases lassen sich Ziele und Soll-Funktionen des Produkts ableiten²⁵⁰. Die Einbindung der Anwendungsfallanalyse in einen durchgängigen Ansatz zur kundenorientierten Produktentwicklung wird derzeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe von MATTHIESEN und SCHMIDT erforscht²⁵¹.

Eng verbunden mit der Erfassung ist die **Dokumentation von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen**. Hier finden zahlreiche Transformationsschritte statt, u. a. die Ableitung von Zielen aus Anwendungsfällen oder die Erzeugung technischer Anforderungen aus Kundenwünschen²⁵². Jede dieser Transformationen ist eine potenzielle Fehlerquelle, weil Informationen verfälscht oder verloren gehen können. Dieses Problem und das Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses bzgl. der Inhalte des Zielsystems wird durch die heutzutage übliche fachdisziplinübergreifende Zusammenarbeit der Projektbeteiligten

²⁴⁴ Feldhusen & Grote 2013

²⁴⁵ Die Anwendungsfallanalyse wird von FELDHUSEN und GROTE auch als Szenariotechnik bezeichnet (Feldhusen & Grote 2013). Dies ist nicht zu verwechseln mit der Bedeutung des Begriffs im Kontext der Profilfindung des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM. Dort beschreibt die Szenariotechnik Methoden der strategischen Produktplanung nach FINK und SIEBE (Fink & Siebe 2011).

²⁴⁶ Feldhusen & Grote 2013

²⁴⁷ Jarke 1999; Jarke, Bui & Carroll 1998

²⁴⁸ Stechert 2010

²⁴⁹ van Lamsweerde 2001

²⁵⁰ Zingel, Albers, Matthiesen & Maletz 2012

²⁵¹ Matthiesen, Schäfer & Schmidt 2015; Matthiesen, Schmidt & Hölz 2015; vgl. auch Holt, Perry & Brownsword 2012

²⁵² Albers, Lohmeyer & Ebel 2011; Lohmeyer 2013

noch verschärft²⁵³. Hier setzen RUPP ET AL. an und geben Regeln für gut formulierte Anforderungen vor mit dem Ziel, den Transformationsprozess zu erleichtern²⁵⁴. Darüber hinaus existieren zahlreiche Techniken und Richtlinien zur sprachlichen Ausarbeitung von Zielsystem-Elementen, beispielsweise im IEEE Standards Style Manual, ferner die **Formulierungsgrundsätze** von GRANDE und die **Satzschablone** von POHL und RUPP²⁵⁵. Letztere gibt die syntaktische Struktur von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen vor und soll negative sprachliche Effekte (z. B. doppelte Verneinungen) reduzieren. Vielerorts wird eine möglichst lösungsneutrale Formulierung von Anforderungen empfohlen, um nicht unnötig früh einen engen Lösungsraum vorzugeben²⁵⁶. Zudem fördern lösungsneutral und abstrakt formulierte Elemente deren Wiederverwendbarkeit²⁵⁷. Allerdings gibt es auch Situationen, in denen die konkrete Beschreibung einer Lösung zielführender ist, beispielsweise wenn bereits valide Entwicklungsergebnisse erarbeitet wurden, die in der neuen Produktgeneration zum Einsatz kommen sollen.

Neben der Formulierung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen an sich empfiehlt es sich, im Zuge ihrer Dokumentation auch deren **Relationen** zu erfassen und zu explizieren. So können Beziehungen transparent dargestellt werden, die u. a. im Zuge der Transformationsschritte entstehen (z. B. Ableitung von Detailzielen und Anforderungen an ein technisches System aus strategischen Unternehmenszielen) und die durch die inhaltlichen und hierarchischen Verbindungen ein Netzwerk an Relationen bilden²⁵⁸. Wie im obigen, eingeklammerten Beispiel bereits anklingt, sind die der Vollständigkeit halber darzustellenden Relationen nicht auf das Zielsystem des Entwicklungsprojekts begrenzt, sondern der Betrachtungsraum umfasst auch Unternehmensstrategien und externe Einflüsse, etwa Randbedingungen aus den Zielmärkten²⁵⁹.

Auf die Dokumentation erfolgt der Hauptschritt der **Validierung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen**. Mehrere Autoren betonen, dass die Validierung von Entwicklungszielen nicht als Zusatzaufwand anzusehen ist, sondern als eine sinnvolle Absicherung, solange die Ziele noch ohne hohe Folgekosten änderbar sind²⁶⁰. In der Literatur werden mehrere Prinzipien für die Validierung der

²⁵³ Albers, Ebel & Sauter 2010; Jung 2006

²⁵⁴ Rupp et al. 2013

²⁵⁵ IEEE 2005; Grande 2014; Pohl & Rupp 2011

²⁵⁶ Vgl. z.B. Hansen & Andreasen 2007

²⁵⁷ Albers, Ebel & Sauter 2010; Muschik 2011; Stechert 2010

²⁵⁸ Eiletz 1999; Gebauer 2001

²⁵⁹ Bader 2007

²⁶⁰ Vgl. u. a. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012; Ebert 2012

Zielsystem-Elemente aufgelistet, u. a. Beteiligung aller Interessenvertreter, Trennung von Fehlersuche und -korrektur, Prüfung aus unterschiedlichen Sichten²⁶¹.

Die Erfolgsfaktoren zur **Verwaltung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen** sind nach Meinung mehrerer Autoren (darunter EBERT und EIGNER ET AL.) u. a. die folgenden: Diszipliniertes Änderungsmanagement, Nachverfolgbarkeit (engl. Traceability) von Änderungen, Projektabsicherung durch Versionierung, um die Konsistenz des Zielsystems zu wahren²⁶². Andere Autoren betonen ergänzend die Wichtigkeit eines disziplinierten Änderungsmanagement-Prozesses²⁶³, der einsetzt, sobald eine Zielsystem-Version eingefroren und rechtskräftiger Vertragsgegenstand geworden ist, damit die technischen und finanziellen Auswirkungen von geänderten Entwicklungszielen kontrollierbar und nachvollziehbar bleiben²⁶⁴.

In Anlehnung an MUSCHIKS Definition von **Unsicherheit in der Produktentstehung**²⁶⁵ und auf Basis mehrerer Werke²⁶⁶ werden hier einige wesentliche Punkte zur Unsicherheit in der Produktentwicklung aufgeführt. Unsicherheit beschreibt einen Zustand, in dem sich mehrere mögliche Ergebnisse einstellen können, oder der Grad der Erreichung bereits definierter Ziele ist nicht einschätzbar²⁶⁷. Eine Produktentwicklung findet immer unter einem gewissen Grad an Unsicherheit statt²⁶⁸. Die Gründe dafür sind zum einen in **Wissens- und Definitionslücken**²⁶⁹ zu sehen, die erst durch den Erkenntnisgewinn im Zuge der fortschreitenden Entwicklung geschlossen werden können. Zum anderen ist jede Produktentwicklung Unwägbarkeiten ausgesetzt, weil sich **Einflüsse von außen** (endogen oder exogen) unvorhersehbar ändern können. Die Auswirkungen davon sind auch im Zielsystem zu spüren: Ziele und daraus abgeleitete Anforderungen können sich während der laufenden Entwicklung noch ändern. Ebenso können sich im Verlauf der Entwicklung maßgebliche Randbedingungen ändern. Beispielsweise wird in einem Zielmarkt ein neues Gesetz verabschiedet, ein Wettbewerber kündigt ein neues Konkurrenzprodukt an oder Absatzmärkte entwickeln sich anders als

²⁶¹ Pohl & Rupp 2011

²⁶² Ebert 2012; Eigner, Roubanov & Zafirov 2014; Gausemeier et al. 2013

²⁶³ Schmidt-Kretschmer, Gericke & Blessing 2007, dort nach Schmidt-Kretschmer & Blessing 2005

²⁶⁴ Ebert schlägt für das systematische Änderungsmanagement sieben Regeln vor (Ebert 2012).

²⁶⁵ Muschik 2011

²⁶⁶ Chalupnik, Wynn & Clarkson 2009; Earl, Johnson & Eckert 2005; McManus & Hastings 2005; de Neufville 2004

²⁶⁷ Muschik 2011

²⁶⁸ Eine ausführliche Darlegung unterschiedlicher Definitionen der Unsicherheit aus der Literatur erfolgt durch MUSCHIK und EBEL (Muschik 2011; Ebel 2015).

²⁶⁹ McManus & Hastings 2005

erwartet. Ein großer Stellhebel zur sukzessiven Verringerung der Unsicherheiten (in der Entwicklung allgemein und des Zielsystems im Speziellen) ist eine kontinuierliche Validierung und das Zulassen iterativer Entwicklungsaktivitäten²⁷⁰. Trotzdem lassen sich Änderungen des Zielsystems nie gänzlich vermeiden²⁷¹.

Die **vier Beurteilungsdimensionen von Zielsystem-Elementen** nach ALBERS, LOHMEYER und EBEL stehen im engen Zusammenhang mit der Explikation der Unsicherheit²⁷². Der **Reifegrad von Zielen** „beschreibt die Vollständigkeit, mit der die Wissens- und Definitionslücken eines Ziels geschlossen sind“²⁷³. Also hat die Erhöhung des Reifegrads eine Verringerung der Unsicherheit eines Ziels zur Folge. Sowohl unzureichendes Verständnis als auch unzureichende Dokumentation können für einen geringen Reifegrad sorgen. Der **Härtegrad von Zielen** „beschreibt die definierte Änderbarkeit eines Ziels“²⁷⁴. Ein hoher Härtegrad bedeutet also, dass sich das Ziel wahrscheinlich nicht mehr ändert. Umgekehrt kann ein geringer Härtegrad einen Entscheidungsbedarf zu diesem Ziel signalisieren. Diese Entscheidung soll die Festlegung auf eine Variante herbeiführen (insbesondere wenn noch mehrere Versionen des Ziels diskutiert werden) und so die Erhöhung des Härtegrads bewirken. Der Ausdruck „definierte Änderbarkeit“ signalisiert dabei, dass der Härtegrad von einem Akteur (z. B. einem Team- oder Projektleiter) als nicht mehr änderbar festgelegt werden kann. Diese Entscheidung kann aber jederzeit durch höhergelegene Instanzen (z. B. die Unternehmensleitung) oder aufgrund von Einflüssen von außerhalb des Unternehmens (z. B. überlegenes Wettbewerbsprodukt erscheint während der Entwicklung am Markt) revidiert werden.

Die **Auswirkung von Zielen** „beschreibt die Konsequenzen einer Zieldefinition oder -änderung hinsichtlich der erforderlichen Umsetzungsaufwände und der resultierenden Kundenzufriedenheit“²⁷⁵. Die Beurteilung der Auswirkungen ist nicht trivial, da dabei nicht nur unmittelbare, sondern auch mittelbare Auswirkungen geprüft werden müssen. Ein Beispiel aus der Entwicklung von Hybridantrieben soll das verdeutlichen: Die Leistung der E-Maschine soll steigen. Dazu ist u. U. auch ein größerer Kühlkanal im E-Maschinen-Gehäuse erforderlich (= unmittelbare Auswirkung im gleichen Fahrzeug-Subsystem). So steigt auch die ins Kühlwasser eingebrachte Wärme, was einen größeren Kühler an der Fahrzeugfront erfordert. Das wiederum kann zu Bauraumkonflikten im Vorderwagen aufgrund einzuhaltender

²⁷⁰ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

²⁷¹ Ebel 2015

²⁷² Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

²⁷³ Ebel 2015, S. 101

²⁷⁴ Ebel 2015, S. 103; Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

²⁷⁵ Ebel 2015, S. 104

Crashgesetze zum Fußgängerschutz führen (= mittelbare Auswirkungen in Nachbar-Subsystemen des Fahrzeugs). Als Fazit lässt sich festhalten: Die Bewertung der Auswirkung von Ziel-Definitionen und -Änderungen muss von kompetenten Entwicklern in jedem Einzelfall durchgeführt werden²⁷⁶. Sie können dabei durch modellierte Relationen und Verknüpfungen eines Zielsystem-Modells unterstützt werden. Die **Beeinflussbarkeit von Zielen** „beschreibt die Fähigkeit einzelner Akteure oder Organisationseinheiten, ein bestimmtes Ziel zu definieren bzw. zu ändern“²⁷⁷. Dabei kann zwischen formeller Beeinflussbarkeit (einfach explizierbar, z. B. mittels Zuständigkeitsmatrizen) und informeller Beeinflussbarkeit (sehr verbreitet, Objektivierung schwierig, dennoch erheblicher Einfluss auf Ziel-Definition und -Änderungen) unterschieden werden²⁷⁸. Die informelle Beeinflussbarkeit ist trotzdem durchaus positiv zu bewerten, da durch Abstimmungsarbeit innerhalb des Wirkungsbereichs eines Entwicklers viele technische und organisatorische Zielkonflikte, insbesondere an den Schnittstellen der Teilsysteme des Produkts, vermieden werden können.

HEUMESSER und HOUDEK stellen den Verlauf des **Anforderungsmanagement-Prozesses bei einem Automobilhersteller** vor (Abbildung 2.15)²⁷⁹. In vergleichbarer Form tritt er in der gesamten Branche auf²⁸⁰. Er wird im Folgenden erklärt.

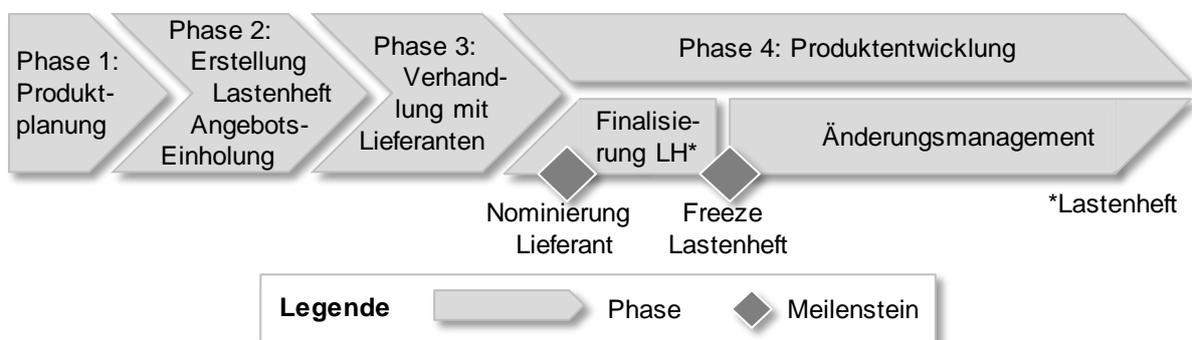


Abbildung 2.15: Allgemeiner Anforderungsmanagement-Prozess in der Automobilindustrie²⁸¹

Die erste Phase enthält die **Produktplanung**, in der Kernziele, Haupt-Anforderungen und die wichtigsten Randbedingungen des zu entwickelnden Systems festgelegt

²⁷⁶ Diese Sichtweise wird durch mehrere praxisnahe Werke im Bereich des Anforderungsmanagements gestützt, die empfehlen, Relationen, die Auswirkungen modellhaft darstellen, mit Bedacht anzuwenden (u. a. Weber & Weisbrod 2003).

²⁷⁷ Ebel 2015, S. 105

²⁷⁸ Jupp, Eckert & Clarkson 2009

²⁷⁹ Heumesser & Houdek 2004

²⁸⁰ Vgl. z.B. Muschik 2011

²⁸¹ Nach Heumesser & Houdek 2004

werden. In der zweiten Phase wird eine Version des Lastenhefts²⁸² erstellt zum **Einholen von Angeboten** verschiedener Lieferanten²⁸³, um in der dritten Phase **Verhandlungen** mit diesen Lieferanten zu führen. Diese Verhandlungen befassen sich nicht nur mit dem möglichen Erfüllungsgrad der gesetzten Entwicklungsziele, sondern auch mit finanziellen Aspekte der Entwicklung. Am Ende dieser Phase wird ein Lieferant nominiert. Nach einer Phase der gemeinsamen Ausdetaillierung und Ergänzung des Lastenhefts durch Fahrzeughersteller und Lieferant wird das Lastenheft **eingefroren** (auch gefreezt). Die gefreezte Lastenheft-Version wird dann Bestandteil des vertraglich vereinbarten Entwicklungsumfangs. Ab diesem Zeitpunkt setzt das sog. **Änderungsmanagement** ein, das die technische und finanzielle Tragweite jeder Änderung von Zielsystem-Inhalten bewertet und verursachergerecht aufteilt.

Die Vorgänge des Anforderungsmanagements lassen sich auch mit dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM)²⁸⁴ nach ALBERS darstellen. Die Tätigkeiten, insbesondere zur Erstellung eines Lastenhefts, können dabei mehrere Makroaktivitäten umfassen. Die Ergebnisse der *Profil-* und *Ideenfindung* ermöglichen die Ableitung erster Ziele und ihrer Wechselwirkungen. Außerdem gibt es Aktivitäten, mit denen weitere Ziele sowie konkretisierende Anforderungen und Randbedingungen ermittelt werden können: die *Nutzungsanalyse* (z. B. zur Festlegung von Wartungsintervallen), die *Abbauanalyse* (z. B. zu Recycling-Vorschriften und Anforderungen an umweltverträgliche Werkstoffauswahl) sowie das *Modellieren von Prinzip und Gestalt* mit anschließender *Validierung* (z.B. zur Konstruktion erster Funktionsmuster mit darauffolgenden Tests). Anhand der liegenden Acht²⁸⁵ wird zudem deutlich, dass die Detaillierung und Konkretisierung des Zielsystems auch die Weiterentwicklung des Objektsystems bedingt, um die erforderliche Wissensbasis zu erhalten²⁸⁶. Somit kann die Synthese des Zielsystems (und damit das Anforderungsmanagement) durch ein **kontinuierliches und iteratives Vorgehen** charakterisiert werden, das nur schwer einzelnen Phasen einer Entwicklung zugeordnet werden kann. Die Aktivitäten des Anforderungsmanagements erstrecken sich vielmehr über den gesamten Verlauf einer Produktgenerationsentwicklung. Gleichwohl fällt das Haupt-Arbeitspensum zu Beginn einer Entwicklung an.

²⁸² Diskussion zum Lastenheft im Kontext des modellbasierten Anforderungsmanagements siehe Ende Kapitel 2.4.3

²⁸³ Lieferanten können im weiteren Sinn auch Entwicklungsdienstleister oder Konsortien von mehreren Lieferanten für ein technisches System sein.

²⁸⁴ Siehe Kapitel 2.2.4

²⁸⁵ Siehe Kapitel 2.2.4

²⁸⁶ Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

In den nachstehenden Abschnitten werden **Herausforderungen im Anforderungsmanagement** diskutiert. So ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Entwicklung eines technischen Systems das Aufdecken von Zielkonflikten, was aber häufig erst mit den Erkenntnissen geschehen kann, die im Verlauf der Entwicklung erarbeitet werden²⁸⁷. Weiter bilden redundante Ziele, Anforderungen und Randbedingungen den Nährboden für Inkonsistenzen des Zielsystems²⁸⁸, was durch die Aufteilung der Entwicklung eines komplexen Gesamtsystems (z. B. ein Fahrzeug) in Simultaneous-Engineering-Teams weiter begünstigt wird. CARR führt überdies aus, dass Zielsysteme unvollständig, missverständlich und zu vage sein können, was das Risiko fehlerhafter Interpretation des Zielsystems durch den Betrachter erhöht²⁸⁹. Überdies beleuchten HEUMESSER und HOUDEK speziell charakteristische Rahmenbedingungen und Herausforderungen des **Anforderungsmanagements in der Automobilindustrie**²⁹⁰. Sie sind nachstehend aufgelistet und durch weitere Aspekte anderer Autoren in Klammern ergänzt worden:

- Entwicklungsprojekte mit **Auftraggeber-Lieferanten-Verhältnis**
- Entwickler sehen sich als **Produkt-Experten**, nicht als Anforderungsmanagement-Experten (d. h. nicht die Ermittlung des technischen Wissens birgt die Herausforderung, sondern dessen Darstellung und Strukturierung im Zielsystem²⁹¹)
- Viele an der Entwicklung beteiligte **Interessenvertreter**
- Dynamische, iterative **Weiterentwicklung des Zielsystems** während der Entwicklung (Aufgrund des iterativen Charakters der Produktentwicklung gibt es während ihres Verlaufs viele Ursachen für Änderungen²⁹²)
- **Späte Definitionen und Änderungen** von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen²⁹³
- **Wiederverwendbarkeit von Zielsystemen** und ihren Elementen (zur Minimierung des Aufwands zur Zielsystem-Erstellung²⁹⁴, auch zu sehen im Kontext der Produktgenerationsentwicklung)

²⁸⁷ Stechert & Franke 2009; Ebel 2015

²⁸⁸ Weber & Weisbrod 2003

²⁸⁹ Carr 2000; Gausemeier et al. 2013

²⁹⁰ Heumesser & Houdek 2004

²⁹¹ Weber & Weisbrod 2003

²⁹² Albers, Braun & Muschik 2010; Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 2012; Almfelt, Berglund, Nilsson & Malmqvist 2006

²⁹³ Es kommt erschwerend hinzu, dass manche durchaus etablierte Vorgehensmodelle zur Produktentwicklung solche Ergänzungen und Änderungen nicht explizit berücksichtigten, z. B. das V-Modell der VDI 2206 (Zingel 2013; VDI 2206; siehe auch: Albers, Braun & Muschik 2010).

²⁹⁴ Albers, Klingler & Ebel 2013; Broy, Fuhrmann, Huemer & Webers 2012

Den Herausforderungen im Anforderungsmanagement stehen **Arbeiten mit Lösungsansätzen und Handlungsempfehlungen** gegenüber, die im Folgenden jeweils knapp vorgestellt werden. Viele der hier dargestellten Werke entstammen dem Gebiet der **Softwareentwicklung**, in der die Methoden und Prozesse des Anforderungsmanagements stärker etabliert sind als in Produktentwicklungen mechanischer Systeme. Einige Autoren sehen die Ursache dafür in der **höheren Komplexität der Mechanik-Entwicklung**, deren Ursprung sie in zusätzlichen Freiheitsgraden der Entwicklung wie etwa die Auswahl der optimalen Gestalt und der Werkstoffe ausmachen²⁹⁵. ALMEFELT, BERLUND, NILSSON und MALMQVIST untersuchen die Aktivitäten des Anforderungsmanagements in der Automobilindustrie und sprechen zahlreiche Empfehlungen aus, u. a. Aufgeschlossenheit gegenüber der **dynamischen Weiterentwicklung** des Zielsystems und frühes Schaffen eines **gemeinsamen Verständnisses** bzgl. des Zielsystems²⁹⁶. CHENG und ATLEE haben eine ausführliche Übersicht über Forschungsansätze rund um das Anforderungsmanagement zusammengestellt²⁹⁷. Sie betonen, genau wie ALBERS ET AL., die Wichtigkeit der **Anwendbarkeit** entwickelter Anforderungsmanagement-Methoden durch unmittelbare Validierung in der industriellen Praxis sowie die **Wiederverwendbarkeit**²⁹⁸ von Zielsystem-Elementen. Weiterhin gibt es Arbeiten, die im Anforderungsmanagement den Menschen (sowohl den Kunden als auch den Entwickler) in den Mittelpunkt rücken²⁹⁹. Außerdem widmen sich Forschungsarbeiten den Prozessen des Anforderungsmanagements im Handlungssystem der Produktentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie³⁰⁰.

Zur Unterstützung der Aktivitäten des Anforderungsmanagements sind zahlreiche **Softwarewerkzeuge** (engl. Tools) am Markt erhältlich. Diese dienen hauptsächlich der Dokumentation der Zielsysteme sowie dem Nachvollziehen der Änderungshistorie. EBERT hat diese Tools zusammengetragen und kommt zum Schluss, dass *DOORS* des Herstellers IBM insbesondere in der Automobilindustrie als Marktführer gelten kann³⁰¹. Es eignet sich für große Projekte, es bietet Unterstützung für die Nachverfolgbarkeit von Änderungen, und es ist vernetzbar mit

²⁹⁵ Mayer-Bachmann 2007; Maier et al. 2007

²⁹⁶ Almfelt, Berglund, Nilsson & Malmqvist 2006. Weitere Arbeiten zum Anforderungsmanagement in der Automobilindustrie vgl. u. a. Broy, Fuhrmann, Huemer & Webers 2012; Kirchmayr et al. 2009

²⁹⁷ Cheng & Atlee 2007

²⁹⁸ Albers, Ebel & Sauter 2010. Weitere Werke zur Wiederverwendbarkeit von Zielsystem-Elementen: Mayer-Bachmann 2007; Bühne et al. 2004; Bühne, Lauenroth & Pohl 2004; Heumesser & Houdek 2003

²⁹⁹ Vgl. z. B. Renner 2007; Thomas & Schroder 2002

³⁰⁰ Vgl. z. B. Kerr, Roy & Sackett 2006; Gülke, Rumpe, Jansen & Axmann 2012

³⁰¹ Ebert 2012

diversen anderen Tools und Sprachen (u. a. UML, PLM-Tools, *MS Project*). Trotz der speziell fürs Anforderungsmanagement entwickelten Softwarewerkzeuge bleiben Programme von Microsoft Office häufig verwendete Tools zum Abbilden und Verwalten von Zielsystemen³⁰². Solche Rahmenbedingungen der angetroffenen Tool-Landschaft müssen bei der Implementierung einer (zunächst toolneutral entwickelten) Methode berücksichtigt werden. Unter Umständen hat das zur Folge, dass nicht immer alle Möglichkeiten der Methode voll nutzbar sind.

2.4.3 Modellbasierte Ansätze

Das vorige Kapitel hat die Arbeitsschritte und Herausforderungen des Anforderungsmanagements vorgestellt. Es wird deutlich, dass jede Produktentwicklung von Komplexität und Unsicherheit betroffen ist, welche nur in Grenzen reduziert werden können. Folglich sind Methoden erforderlich, die den **Umgang mit Komplexität und Unsicherheit** ermöglichen. Ein Weg dazu sind modellbasierte Ansätze. Ein Modell des Zielsystems bildet dabei nicht nur Ziele, Anforderungen und Randbedingungen ab, sondern insbesondere auch deren Wechselwirkungen und Relationen, durch die die so wichtige Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit des Zielsystems entsteht³⁰³. Eine Modellierungsmethode stellt dem Anwender zur Modellierung von Zielsystemen Elemente und Relationen zur Verfügung, darüber hinaus Modellierungsregeln und Leitlinien (z. B. zur sprachlichen Ausarbeitung von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen). Dazu sind nicht nur die klassischen Bestandteile eines Zielsystems (Ziele, Anforderungen, Randbedingungen) erforderlich, sondern auch Elemente des Handlungs- und des Objektsystems. Deswegen schlagen ALBERS, EBEL und SAUTER eine Modellierung gemäß dem ZHO-Modell vor³⁰⁴. Dabei ist ein besonderer Schwerpunkt auf die Anwendbarkeit und eine **schlanke Methode** zu legen, um die **Akzeptanz** der späteren Anwender zu erhöhen³⁰⁵. Nachstehend werden einige relevante modellbasierte Ansätze zur Zielsystem-Modellierung vorgestellt.

ALBERS, KLINGLER und EBEL³⁰⁶ haben im Kontext der Karlsruher Schule eine **ganzheitliche Methode zur Modellierung von Zielsystemen** in der interdisziplinären Produktentstehung entwickelt, die auf dem ZHO-Modell basiert und den Menschen in den Mittelpunkt stellt. Die Methode stellt dem Anwender ein konsistentes Set an u. a. 9 Partialmodellen, 14 Element- und 13 Relations-Typen zur

³⁰² Albers, Klingler & Ebel 2013, dort nach Hood, Mühlbauer, Rupp & Versteegen 2007

³⁰³ Albers, Klingler & Ebel 2013; Eiletz 1999; Ramesh & Jarke 2001; Ebel 2015

³⁰⁴ Albers, Ebel & Sauter 2010

³⁰⁵ Albers, Klingler & Ebel 2013; Ebel 2015

³⁰⁶ Albers, Klingler & Ebel 2013; Ebel 2015

Verfügung, mit dem Ziele, Anforderungen und Randbedingungen einschließlich ihrer Wechselwirkungen und Hintergrundinformationen modelliert werden können. Außerdem hat wurden 25 Regeln und Empfehlungen zur Zielsystemmodellierung zusammengestellt.

STECHERT hat ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe komplexe Anforderungen zu einem frühen Zeitpunkt in der Entwicklung mechatronischer Produkte systematisch erfasst, aufbereitet und bereitgestellt werden können, wobei er die Aspekte der Baukastenentwicklung in Kooperationsnetzwerken einfließen lässt³⁰⁷. ALBERS und MUSCHIK untersuchen die Bildung von Zielsystemen eines Automobilherstellers und gehen dabei näher auf die Prozesse zur Entscheidungsfindung ein bei der Bildung von Zielsystemen über verschiedene Hierarchieebenen hinweg; zusätzlich beleuchten sie die unsicherheitsbedingte dynamische Veränderung von Zielen als eine zentrale Schwierigkeit in der Produktentwicklung³⁰⁸. VICENTE-CHICOTE, MOROS und TOVAL stellen ein Metamodell zur Modellierung von Zielsystemen mit Elementen und Relationen vor, einschließlich des Tools *REMM-Studio*, das die Modellierung und Validierung des Modells sowie die Ableitung eines navigierbaren Software-Spezifikations-Dokuments ermöglicht³⁰⁹. MAIER ET AL. vergleichen ausführlich unterschiedliche Modellierungsansätze und Softwarewerkzeuge fürs Anforderungsmanagement und entwickeln eine matrixbasierte hierarchische Modellierungsmethode für Anforderungen am Beispiel von Fahrzeug-Subsystemen³¹⁰.

Der letzte Teil dieses Kapitels diskutiert die **Rolle des Lasten- und Pflichtenhefts** im Kontext des modellbasierten Anforderungsmanagements. Ziel dabei ist es, sowohl den Forderungen nach Aufgeben der dokumentenbasierten Arbeitsweise als auch den gängigen Praktiken und Restriktionen der Produktgenerationsentwicklung im industriellen Umfeld Rechnung zu tragen. Zunächst die Klärung der Begrifflichkeiten: Das Lastenheft wird vom Auftraggeber erstellt und enthält das *Was* und *Wofür* der anstehenden Entwicklung. Das Pflichtenheft hingegen wird nach Auftragserteilung vom Auftragnehmer verfasst und klärt das *Wie* und *Womit*³¹¹. Anschließend wird es vom Auftraggeber genehmigt³¹². Ein solches Pflichtenheft, das als verbindliche

³⁰⁷ Stechert 2010; vgl. auch Frank 2006

³⁰⁸ Albers & Muschik 2010; Muschik 2011

³⁰⁹ Vicente-Chicote, Moros & Toval 2007

³¹⁰ Maier et al. 2007

³¹¹ FELDHUSEN ET AL. nennen als drittes Dokument des Anforderungsmanagements die Anforderungsliste als Ergebnis einer Präzisierungsphase, in der nach Beauftragung der Entwicklungsabteilung lösungs- und gestaltbeeinflussende Anforderungen des zu entwickelnden Systems erkannt, quantifiziert und dokumentiert werden (Feldhusen & Grote 2013).

³¹² VDI 2519

Vereinbarung ein juristisch relevanter Bestandteil der Entwicklungsbeauftragung ist, gilt als ein **Erfolgsfaktor im Anforderungsmanagement**³¹³. Speziell in der Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber (z. B. ein Fahrzeughersteller) und Auftragnehmer (z. B. ein Lieferant) bilden solche textbasierten Dokumente, die die Entwicklungsziele enthalten, den gängigen Kommunikationsweg; sie sind im deutschsprachigen Raum etabliert³¹⁴.

Hierdurch ergeben sich jedoch mehrere **Herausforderungen**. So bemängeln ALBERS ET AL.³¹⁵, dass die Komplexität des Anforderungsmanagements heutiger Produktentwicklungen durch Lasten- und Pflichtenheft nicht mehr zufriedenstellend handhabbar ist. Folgende Gründe werden aufgeführt: Wechselwirkungen zwischen und Hintergrundwissen zu Anforderungen sind nicht erkennbar; die Darstellungsweise von Zielsystem-Inhalten ist linear und zu starr; die Bewältigung von rein textbasierten Informationen zum Zielsystem reicht für eine umfassende Behandlung des Anforderungsmanagements nicht mehr aus, und Gewichtungen sind schwer implementierbar³¹⁶. So kommt es, dass zwar der Ruf nach modellbasierten Ansätzen zur Handhabung der Komplexität laut ist, jedoch ein klassisches Zielsystem-Dokument für die Zusammenarbeit zwischen Entwicklungspartnern nach wie vor benötigt wird.

Eine **Lösung** liegt in der **Kombination beider Ansätze**: Die Erzeugung, Dokumentation und Verwaltung von Zielsystemen kann für mehr Nachvollziehbarkeit und Systemverständnis (u. a. durch bessere Darstellbarkeit von Relationen) modellbasiert erfolgen. Auf Basis einer Momentaufnahme dieses Zielsystemmodells kann dann das Ableiten eines Dokuments als rechtskräftige Unterlage zur Spezifikation der vereinbarten Entwicklungsleistungen gelingen. Die meisten Anforderungsmanagement-Tools bieten die dafür erforderlichen Funktionen und unterstützen damit die Überführung des klassischen – historisch bedingt dokumentenbasierten – Anforderungsmanagements in die Welt der Modellbasierten Systementwicklung.

2.4.4 Anforderungsmanagement in der Entwicklung von Baukästen

Anhand der in Kapitel 2.3.3 erörterten Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung werden im Folgenden die Besonderheiten des Anforderungsmanagements bei der Entwicklung von Systembaukästen dargelegt. Als Resultat der **inhaltlichen**

³¹³ Schmidt-Kretschmer & Blessing 2005

³¹⁴ Weber & Weisbrod 2003; Pohl & Rupp 2011

³¹⁵ Albers, Klingler & Ebel 2013

³¹⁶ Ebel 2015; Weber & Weisbrod 2003; Krusche 2000

Abhängigkeit der Baukastenentwicklung kommen zur bereits dargelegten Zielsystemkomplexität zusätzliche Interdependenzen zwischen verschiedenen Entwicklungsprojekten in Form der Baukasten-Nutzer hinzu³¹⁷, denn nun müssen sämtliche aus dem Baukasten konfigurierbaren Produktvarianten berücksichtigt werden³¹⁸. Zwar hat eine Baukastenentwicklung zum Ziel, die interne Vielfalt zu senken, sodass in der Summe weniger Zielsysteme für weniger Subsysteme erstellt und vernetzt werden müssen. Indessen sorgt die gleichzeitig steigende externe Vielfalt dafür, dass ein Baustein in mehr Produkten eingesetzt wird als ein konventionelles Subsystem, wodurch mit einer Vergrößerung seines Zielsystems zu rechnen ist. Neben der gestiegenen inhaltlichen Abhängigkeit der Projektlandschaft sorgt auch der **Zeitversatz** der Baukasten-Nutzer³¹⁹ für zusätzliche Unwägbarkeiten: Durch diesen Zeitversatz der Fahrzeugentwicklungen variiert die Unsicherheit der Zielsystemelemente sehr stark, messbar in Reife- und Härtegrad. Somit ist nicht nur die Anzahl an Elementen und Relationen des Baukasten-Zielsystems weitaus umfangreicher als das Zielsystem eines konventionell entwickelten Subsystems, sondern die Unsicherheit und Dynamik der Ziele stellt sich deutlich facettenreicher dar³²⁰.

Die **Zunahme an Zielsystem-Inhalten**, die **gestiegene Vernetzung** und die **stark variierende Unsicherheit** führen dazu, dass sich die **Komplexität des Anforderungsmanagements** in der Entwicklung von Baukästen **vervielfacht**³²¹. Anforderungen an einen Baustein, die aufgrund der Verwendung des Bausteins in unterschiedlichen Produkten mehrere Ausprägungen aufweisen, müssen miteinander in Einklang gebracht werden, was von RENNER Anforderungsharmonisierung genannt wird³²². Neben allen Herausforderungen im Anforderungsmanagement der Baukastenentwicklung gibt es aber auch **Chancen**. So ergeben sich neue Perspektiven bei der vielfach geforderten **Wiederverwendbarkeit** von Teilen eines Zielsystems im Sinne der Produktgenerationsentwicklung: Das angestrebte Gleichteileprinzip kann für eine Übertragbarkeit großer Zielsystem-Teile von einer abgeschlossenen auf eine neue Modulentwicklung sorgen³²³.

³¹⁷ Cromberg 2007

³¹⁸ Renner 2007

³¹⁹ Siehe Kapitel 2.3.3

³²⁰ Bullinger & Warschat 1996

³²¹ Schneider 2012

³²² Renner 2007

³²³ Bühne, Lauenroth & Pohl 2004

2.4.5 Zwischenfazit

Das **Anforderungsmanagement** ist eine **Kernaktivität** für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Die Haupttätigkeiten sind Ermittlung, Dokumentation, Validierung und Verwaltung von Zielsystem-Inhalten. Jede dieser Tätigkeiten birgt ihre eigenen Herausforderungen in der industriellen Praxis, von denen in der Automobilindustrie u. a. die permanente Weiterentwicklung des Zielsystems, die hohe Anzahl an Projektbeteiligten und die späte Änderung des Zielsystems stark ausgeprägt sind. **Modellbasierte Ansätze** sind in der Lage, die **Zielsystemkomplexität** besser **handhabbar** zu machen. Diese können mithilfe des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM in realen Fahrzeugentwicklungen zum Einsatz kommen. Viele bereits bestehende Ansätze aus der Automobilindustrie entspringen der Entwicklung von Softwaresystemen in Fahrzeugen. Neben den Vorteilen des modellbasierten Anforderungsmanagements müssen Lösungen gefunden werden, um die vertraglich und juristisch relevante Rolle des Lastenhefts aufzugreifen und zu integrieren. Die **inhaltliche Abhängigkeit** und der **Zeitversatz** in der Entwicklung von Systembaukästen steigern die **Komplexität der Baukasten-Zielsysteme**. Gleichzeitig ergeben sich durch die Baukastenentwicklung große **Potenziale bei der Wiederverwendbarkeit** der Zielsystem-Inhalte, die es durch eine geeignete Methode zu erschließen gilt.

2.5 Funktions-Gestalt-Zusammenhang

Dieses Kapitel stellt den Stand der Forschung zur Darstellung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs technischer Systeme vor. Es handelt somit von der Verknüpfung von Bauteilen mit ihren Funktionen. Das Kapitel 2.5.1 umreißt die **Motivation** zur Explikation des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs und vermittelt anschließend wichtige **Grundlagen** und **Begriffsdefinitionen**. Darauf folgen in Kapitel 2.5.2 die **Aktivitäten, Herausforderungen** und unterstützenden **Methoden** beim Arbeiten mit Darstellungen des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs in der Produktentwicklung. In diesem Teil wird auch der **C&C²-Ansatz** nach ALBERS vorgestellt. Das Kapitel 2.5.3 legt bestehende **modellbasierte Ansätze** zur Abbildung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs dar, von denen die **Systems Modeling Language** sowie die zugehörigen Methoden in Kapitel 2.5.4 gesondert behandelt werden.

2.5.1 Motivation, Grundlagen, Definitionen

In der Entwicklung mechatronischer Systeme sind **Funktion** und **Gestalt** des Produkts **untrennbar miteinander verbunden**³²⁴. Die Gestalt und Formgebung

³²⁴ Albers & Wintergerst 2014

eines Produkts, die vom Entwickler unmittelbar vorgegeben wird, beeinflusst mittelbar die Art und Weise, wie eine Funktion erfüllt wird (Bsp.: Vergrößerung des Drahtdurchmessers einer Schraubenfeder erhöht deren Federrate³²⁵). Umgekehrt zieht die Auswahl eines Lösungsprinzips direkte Konsequenzen für die physische Gestaltung nach sich (Bsp.: Lösungsprinzip „Energie elektrisch übertragen“ hat die Gestaltung von Stromleitern mit ausreichendem Querschnitt zur Folge). Die Determinierung der groben Gestalt durch das ausgewählte Lösungsprinzip nimmt umso mehr zu, je weiter fortgeschritten die Entwicklung ist: In der Frühen Phase ist eine Änderung des Lösungsprinzips noch eher möglich als in der fortschreitenden Serienentwicklung, in der überwiegend Gestalt- und Übernahmevariation auftreten. Die Tätigkeiten des Entwicklers liegen dann folglich schwerpunktmäßig auf der Modellierung der Feingestalt, die nicht minder kreativ und innovativ ist wie die Prinzipvariation³²⁶.

Das Wissen³²⁷ um den **Zusammenhang von Funktion und Gestalt** ermöglicht es dem Entwickler, die Gestalt eines Systems so zu optimieren, dass die gewünschte Funktion bestmöglich erfüllt wird³²⁸. Der kontinuierliche **Erwerb dieses Wissens**, verbunden mit einer ausführlichen Analysetätigkeit vor der eigentlichen Erarbeitung der konstruktiven Lösung, wird in empirischen Studien immer wieder als **Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung** hervorgehoben³²⁹. Modelle, die den Funktions-Gestalt-Zusammenhang enthalten, können den Entwickler bei Analyse und Synthese der Produktgestaltung unterstützen und so zur erfolgreichen Entwicklung komplexer Produkte beitragen³³⁰.

Zu den wesentlichen Begriffen im Themenfeld des **Funktions-Gestalt-Zusammenhangs**, die im Folgenden definiert werden, befinden sich in der Literatur viele unterschiedliche Definitionen und Sichtweisen. Speziell bei der Unterscheidung von Funktion und Verhalten eines technischen Systems bedarf es besonderer Aufmerksamkeit. So sehen GERO ET AL. die Funktion eines technischen Systems in enger Verwandtschaft mit dessen Zweck (wofür ein System da ist)³³¹. Ähnlich

³²⁵ Albers 2012

³²⁶ Albers, Bursac & Wintergerst 2015

³²⁷ Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. (Turki 2014, dort nach Probst & Romhardt 2010)

³²⁸ Albers & Wintergerst 2014

³²⁹ Hacker 2002

³³⁰ Wintergerst 2015

³³¹ Gero & Kannengiesser 2007

bezeichnen EIGNER ET AL. die Funktion als „Absicht oder Zweck der Entwicklung eines Produktes³³²“. Dagegen definieren sowohl GERO ET AL. als auch EIGNER ET AL. in ähnlicher Form das Verhalten als die Art und Weise, „wie das Konstruktionsobjekt die Funktion erreicht oder umsetzt³³³“. Im Begriff des Verhaltens kommen also erste Wechselwirkungen zwischen Funktion und dem gewählten Lösungsprinzip zum Vorschein.

Im Verlauf dieser Arbeit haben sich die Definitionen bewährt, die von ALBERS am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe verwendet werden. Sie werden im Folgenden vorgestellt.

Eine **Funktion**³³⁴ im Sinne des...

- **beabsichtigten Zwecks** eines technischen Systems beschreibt dessen auszuübende Wirkung³³⁵.
- **beabsichtigten Verhaltens** beschreibt die gewünschten Reaktionen eines Produkts oder seiner Teilsysteme auf Einflüsse, die durch Interaktionen mit Umgebungssystemen induziert werden³³⁶.
- **tatsächlichen Verhaltens** beschreibt die in der Erprobung oder Anwendung festgestellten erwünschten oder unerwünschten Wirkungen³³⁷.

Zusammengefasst beschreibt eine Funktion den Zusammenhang zwischen **Inputs** (d. h. den Ursachen) und **Outputs** (d. h. den Wirkungen), der auch gleichzeitig bidirektional in Form von Wechselwirkungen bestehen kann³³⁸. Die **Wirkungen** sind an der Systemgrenze messbar. Funktionen können erfüllt werden, indem die Flussgrößen **Energie**, **Stoff** oder **Information** gewandelt und ausgetauscht werden³³⁹. Diesen gängigen Flussgrößen fügt KOPPENHAGEN den **Kraftfluss** hinzu³⁴⁰. Neben den Flussgrößen, die von außen auf das System einwirken, wird die Wirkung durch das in der Konstruktion gewählte **Wirkprinzip** bestimmt. Dieses Wirkprinzip bezeichnet die Art der Wandlung von Energie, Stoff und Information³⁴¹, die beim Konstruieren als Lösungsmöglichkeit für eine Teilfunktion eines Produkts

³³² Eigner, Roubanov & Zafirov 2014, S. 47

³³³ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014, ebenda

³³⁴ Umfassende Übersichten und alternative Definitionen siehe: Albers, Alink, Matthiesen & Thau 2008; Wintergerst 2015; Alink 2010; Vermaas 2010

³³⁵ Alink 2010

³³⁶ Wintergerst 2015

³³⁷ Alink 2010

³³⁸ Zingel 2013

³³⁹ Feldhusen & Grote 2013

³⁴⁰ Koppenhagen 2004

³⁴¹ Zingel 2013

genutzt werden kann³⁴². Ein Wirkprinzip ergibt sich aus der Kombination von physikalischen Effekten (z. B. Reibung, magnetische oder elektrostatische Anziehung/Abstoßung), den von den Interaktionspartnern durchgeführten Relativbewegungen sowie der Anordnung und den Eigenschaften der beteiligten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen³⁴³. Das **Verhalten** beschreibt die tatsächlichen Reaktionen eines Produkts oder seiner Teilsysteme auf Einflüsse³⁴⁴, die durch Interaktionen mit Umgebungssystemen induziert werden (s. o.). An dieser Stelle sei noch einmal betont, dass somit zum Verhalten auch unerwünschte Wirkungen (z. B. Verschleiß, Korrosion, Verlustwärme) gehören, die bei der Modellierung eines technischen Systems berücksichtigt werden müssen.

Zur Strukturierung aller Funktionen eines Systems – das Ergebnis ist die **Funktionsstruktur** – existieren verschiedene Ordnungskriterien: Gemäß der Systemtechnik kann eine Funktion jeweils in ihre Unter- und Elementarfunktionen zerlegt werden. Möchte man die Wertigkeit der Funktionen aus Kundensicht einbringen, kann die Funktionsstruktur mithilfe der Wertanalyse³⁴⁵ oder des Kano-Modells³⁴⁶ gegliedert werden.

Die **Gestalt** ist die quantitative Beschreibung der Summe aller Merkmale und Struktureigenschaften der physischen Struktur eines technischen Systems³⁴⁷.

ZINGEL definiert dazu **Merkmale** als diejenigen Attribute eines technischen Systems, die der Entwickler direkt festlegen kann (z. B. Werkstoff, Abmessungen), und **Eigenschaften** als diejenigen Attribute, die der Entwickler lediglich indirekt beeinflusst (z. B. Gewicht, Reibeigenschaften, Wirkungsgrad)³⁴⁸. Die Gestalt beschreibt also die Beschaffenheit eines technischen Systems und letztlich die Baugruppen und Bauteile. Ordnet man diese Bauteile systematisch, entsteht – als Pendant zur Funktionsstruktur – die **Baustruktur**³⁴⁹ (bei anderen Autoren auch physische Struktur³⁵⁰). Das Ordnungskriterium der Baustruktur kann nach funktionalen Gesichtspunkten (v. a. üblich in der Entwicklung) oder nach fertigungstechnischen Gesichtspunkten (v. a. üblich in Fertigung und Montage)

³⁴² Ponn & Lindemann 2008

³⁴³ Feldhusen & Grote 2013

³⁴⁴ Zingel 2013

³⁴⁵ Matthiesen 2002

³⁴⁶ Kano, Seraku, Takahashi & Tsuji 1984

³⁴⁷ Zingel 2013

³⁴⁸ Zingel 2013

³⁴⁹ Feldhusen & Grote 2013

³⁵⁰ Vgl. z. B. Zingel 2013

gewählt werden. Je nach gefordertem Detaillierungsgrad endet die Baustruktur nicht immer auf Bauteilebene. So können insbesondere komplexe Bauteile weiter in ihre Gestaltelemente zerlegt werden (z. B. ein Gussgehäuse, das sich aus einer Vielzahl an Wirkflächen zusammensetzt, u. a. zur Abdichtung, Fixierung, Positionierung und Kraftleitung).

Der **Zusammenschluss von Funktionsstruktur und Baustruktur**, in dessen Rahmen auch der Funktions-Gestalt-Zusammenhang entsteht, wird in der Literatur gemeinhin als **Produktarchitektur** bezeichnet³⁵¹. Die Produktarchitektur enthält die Verknüpfungen zwischen Elementen der Funktions- und der Baustruktur und stellt so die Verbindung zwischen Funktionen und der zugehörigen Bauteile her und umgekehrt³⁵².

2.5.2 Aktivitäten, Herausforderungen, Methoden

Die Produktentwicklung und insbesondere die Konstruktion ist geprägt von einer ständigen **Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten**. Dabei kommt die technische Funktion eines Systems durch die Auswahl und Kombination von Wirkprinzipien und den gestaltgebenden Parametern zustande³⁵³. Auch bei einer reinen Gestaltvariation (und somit unverändertem Lösungsprinzip) im Sinne der Produktgenerationsentwicklung steht die **Optimierung der Produktfunktion** im Vordergrund, denn von dieser hängt die Produktqualität, die der Kunde wahrnimmt, maßgeblich ab³⁵⁴.

In der Entwicklung überwiegend mechanischer Systeme werden die Produktfunktionen trotz ihrer gewichtigen Rolle – im Gegensatz zur Baustruktur – **nur selten in Form von Produktmodellen** abgebildet³⁵⁵. Mit Ausnahme einiger Hauptfunktionen beschäftigen sich die Entwickler ausschließlich gedanklich mit den Funktionen des zu entwickelnden Systems³⁵⁶. So kommt es, dass das Wissen über die Produktfunktionen und über den Funktions-Gestalt-Zusammenhang häufig mithilfe existierender Modelle der Baustruktur (z. B. CAD-Modell, Fertigungszeichnung) erschlossen und interpretiert wird, ohne diese Informationen explizit zu dokumentieren³⁵⁷. Ein Grund für dieses Phänomen ist die **weite Verbreitung von CAD-Modellen** in der Entwicklung gestaltbehaffeter Systeme,

³⁵¹ Albers et al. 2011; Cornet 2002; Ulrich 1995

³⁵² Feldhusen & Grote, dort nach Ulrich 1995

³⁵³ Albers & Wintergerst 2014

³⁵⁴ Albers & Wintergerst 2014

³⁵⁵ Albers & Wintergerst 2014

³⁵⁶ Matthiesen 2011

³⁵⁷ Weber 2012

insbesondere in der Serienentwicklung³⁵⁸. MOTZER und RUDOLPH zeigen auf, dass selbst viele Berechnungsmodelle (z. B. MKS, CFD, FEM³⁵⁹) ihre Daten aus dem CAD-Modell eines Produkts ableiten, also stark geometrieorientiert sind³⁶⁰.

Die mangelnde Dokumentation von Produktfunktionen führt zu mehreren Problemen in der Produktentwicklung: So steigt die Gefahr von Missverständnissen immer dann, wenn zwei oder mehrere Entwickler die Funktionen eines Systems optimieren möchten und dabei in ihren mentalen Modellen unterschiedliche Vorstellungen zu dieser Funktion haben³⁶¹. In solchen Fällen ist ein **gemeinsames Systemverständnis** nicht vorhanden. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass die Optimierung der einen Funktion Auswirkungen auf eine andere Funktion haben kann, die eine Verschlechterung mit sich bringen kann. Aufgrund der Komplexität heutiger Systeme sind solche Wechselwirkungen auch für Experten nicht immer sofort erkennbar³⁶². Es fehlt also an **Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen**.

Weiterhin kommt es zu Problemen bei der **Weitergabe von Gestaltungswissen**, beispielsweise vom Entwicklerteam einer fertig entwickelten Produktgeneration zum Team für eine neue Produktgeneration. Dieses Gestaltungswissen liegt nämlich häufig nur in Form der fertigen Lösung (also der auskonstruierten Gestalt) und in Form von Erfahrungswissen der beteiligten Entwickler vor; die Aneignung jenes Wissens kostet folglich, speziell für einen neuen Entwickler, viel Zeit³⁶³. ALBERS und TURKI unterstreichen die Defizite, die bei der Weitergabe von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung vorherrschen: Obwohl nahezu alle Entwickler die Weitergabe von Wissen als essentiell für Produkt- und Unternehmenserfolg einstufen, wird der Zeitmangel dabei als größte Hürde empfunden³⁶⁴. Der Bedarf an einer **personenungebundenen Sicherung von Wissen** zu Produktfunktionen liegt auf der Hand.

Um die Probleme der Produktentwicklung im Hinblick auf den Funktions-Gestalt-Zusammenhang zu überwinden, bestehen Ansätze wie das Characteristics-Properties Modelling nach WEBER, das Networked Product Modelling auf Basis von Design-Struktur-Matrizen nach DEUBZER und LINDEMANN sowie der **Contact- und**

³⁵⁸ Lindemann 2009

³⁵⁹ Mehrkörpersimulation, Continuous Fluid Dynamics (numerische Strömungsmechanik), Finite-Elemente-Methode

³⁶⁰ Motzer & Rudolph 2013

³⁶¹ Alt 2012

³⁶² Albers & Wintergerst 2014

³⁶³ Schmalenbach 2013

³⁶⁴ Albers & Turki 2014

Channel-Ansatz (kurz C&C²-A) nach ALBERS ET AL.³⁶⁵. In der vorliegenden Arbeit kommt der C&C²-Ansatz zum Einsatz, denn er ermöglicht die gleichzeitige Darstellung von Funktion und Gestalt eines technischen Systems, indem die Elemente des C&C²-Ansatzes über eine (teilweise abstrahierte) Abbildung der Gestalt gelegt werden. Damit ist der C&C²-Ansatz in der Lage, ein **gemeinsames Systemverständnis** sowie mehr **Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen** zu schaffen³⁶⁶. Zusätzlich kann er durch die Dokumentation und Bereitstellung funktionsrelevanter Informationen die **personenungebundene Weitergabe von Wissen** fördern³⁶⁷. Mithilfe des C&C²-Ansatzes können durchaus komplexe technische Systeme modelliert werden, wie ALBERS ET AL. dargelegt haben³⁶⁸. WIEDNER und THAU haben in ihren Untersuchungen in der Ingenieurspraxis gezeigt, dass die Darstellungsform des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs mittels C&C²-Ansatzes den Denk- und Handlungsmustern von Entwicklern (und besonders von Konstrukteuren) entgegenkommt³⁶⁹. Die Elemente des C&C²-Ansatzes werden im Folgenden vorgestellt.

Ein **Wirknetz** des C&C²-Ansatzes (vgl. die Abbildung 2.16 eines kämmenden Zahnradpaars mit dem Wirknetz *Zahnnormalkraft übertragen*) setzt sich nach ALBERS ET AL. stets aus den folgenden Elementen zusammen³⁷⁰:

- **Leitstützstrukturen** (LSS), die physische Strukturen (Festkörper, Fluide, Felder) darstellen, die permanent oder zeitweise miteinander interagieren. Durch die LSS können die Flussgrößen Energie, Kraft, Stoff und Information geleitet werden.
- **Wirkflächenpaare** (WFP), die die Schnittstellen zwischen den physischen Strukturen darstellen. Sie können an freien Oberflächen (z. B. Zahnflanke, umströmte Außenhülle eines Fahrzeugs), aber auch ganz allgemein an Grenzschichten eingesetzt werden (z. B. Unterteilung eines gehärteten und eines ungehärteten Abschnitts einer Getriebewelle, Trennung von laminarer Grenzschicht und turbulenter Strömung).
- **Connectoren** (C), die zum einen aus einer Wirkfläche an der Grenze des Gestaltungsraums bestehen und zum anderen (Partial-)Modelle der angrenzenden Strukturen enthalten, welche die funktionsrelevanten Merkmale und Eigenschaften von außerhalb des Gestaltungsraums abbilden.

³⁶⁵ Weber 2008; Deubzer & Lindemann 2009; Albers & Wintergerst 2014

³⁶⁶ Albers & Wintergerst 2014

³⁶⁷ Zingel 2013

³⁶⁸ Albers & Wintergerst 2014

³⁶⁹ Wiedner 2013; Thau 2013

³⁷⁰ Albers & Wintergerst 2014

Die Summe aller Wirknetze ergibt die **Wirkstruktur** eines technischen Systems³⁷¹. Über das Wirknetz hinaus werden Merkmale und Eigenschaften der LSS, WFP und C benötigt, um relevante Attribute eines Funktions-Gestalt-Zusammenhangs darstellen zu können.

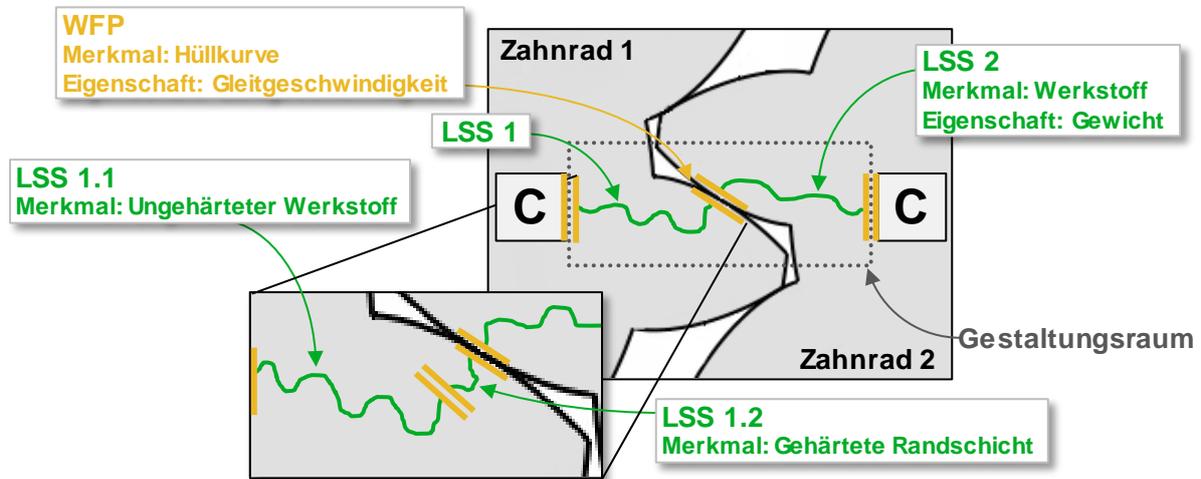


Abbildung 2.16: Wirknetz, Merkmale und Eigenschaften eines kämmenden Zahnradpaars

Der **fraktale Charakter** des C&C²-Ansatzes erlaubt es, den Funktions-Gestalt-Zusammenhang auf verschiedenen Systemebenen darzustellen³⁷². So kann die LSS 1 in Abbildung 2.16 auf einer tieferen Systemebene in den ungehärteten Werkstoff (LSS 1.1) und eine gehärtete Randschicht (LSS 1.2) des Zahnrads 1 zerlegt werden. Dieses Wirknetz des kämmenden Zahnradpaars könnte wiederum eingebettet sein im C&C²-Modell eines Hybridtriebstrangs (Abbildung 2.17), beispielsweise im Achsgetriebe. Anstelle der dargestellten Connectoren in Abbildung 2.17 können die hier nicht ausdetaillierten Systeme *HV-Speicher* und *Tank* eingefügt werden. In rechnerbasierten Modellen können die Connectoren auch als Hyperlinks eingesetzt werden, die zu den ausführlichen Darstellungen derjenigen Teilmodelle führen, die sie in dieser Ansicht repräsentieren.

Der C&C²-Ansatz kann sowohl zur **Analyse** eines technischen Systems durch Identifikation und Beschreibung von Wirknetzen und Wirkstrukturen als auch zur **Synthese** durch Variation, Hinzufügen und Entfernen von WFP und LSS verwendet werden³⁷³. Der C&C²-Ansatz wurde in zahlreichen Arbeiten des IPEK – Institut für

³⁷¹ Albers & Wintergerst 2014

³⁷² Albers & Wintergerst 2014

³⁷³ Wintergerst 2015

Produktentwicklung Karlsruhe zur Unterstützung von Analyse- und Synthesetätigkeiten im industriellen Umfeld eingesetzt und weiterentwickelt³⁷⁴.

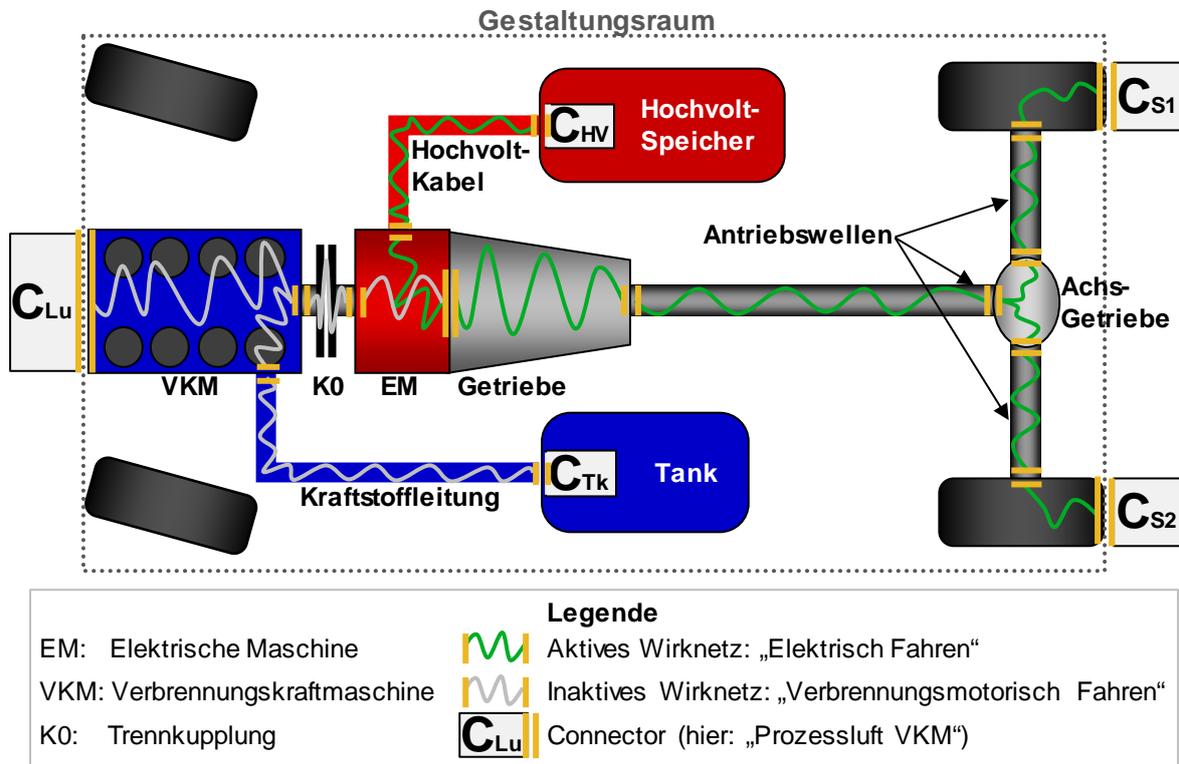


Abbildung 2.17: Wirkstruktur eines Hybridtriebstrangs³⁷⁵

Jüngere Forschungsarbeiten von WINTERGERST nutzen den C&C²-Ansatz, um die wahrgenommene Produktperformance durch gezielte Gestaltvariation zu verbessern³⁷⁶. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Produktfunktion und den konstruktiv beeinflussbaren, funktionsrelevanten Merkmalen der Gestalt eingehend untersucht, wobei die Quantifizierung der Wirkzusammenhänge eine wesentliche Rolle spielt.

2.5.3 Modellbasierte Ansätze

Dieses Kapitel geht auf modellbasierte (d. h. rechnerbasierte) Ansätze zur **Darstellung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs** ein, darunter auch Arbeiten zum C&C²-Ansatz. ALBERS ET AL. heben hervor, dass explizite Modelle die Entwickler speziell in Analysephasen unterstützen, sodass sie anschließend die folgerichtigen Schlüsse für die Entwicklung eines technischen Systems ziehen können³⁷⁷.

³⁷⁴ Ohmer 2008; Matthiesen 2011; Thau 2013; Wiedner 2013

³⁷⁵ Nach Albers & Wintergerst 2014

³⁷⁶ Wintergerst 2015

³⁷⁷ Albers & Wintergerst 2015, dort nach Hannah, Joshi & Summers 2012

Gleichwohl betonen die Autoren, dass bei Tools für integrierte Produktmodelle Nachholbedarf besteht. Es erfordert also **rechnerbasierte Lösungen**, um den Funktions-Gestalt-Zusammenhang (z. B. mithilfe des C&C²-Ansatzes) auf komplexe Produkte anwenden zu können, ohne dabei eine zahllose Menge an Dokumenten, Abbildungen o. Ä. anzusammeln. Nur ein rechnerbasierter Ansatz wird den Anforderungen einer stark vernetzten, komplexen Produktentwicklung und ihren Informationsflüssen gerecht³⁷⁸.

ALBERS ET AL. und ENKLER haben mit dem *ConChaCoach* einen Softwareprototyp geschaffen, der es ermöglicht, Wirkstrukturen des C&C²-Ansatzes mit ihren WFP, LSS und C zu modellieren, sodass Funktion, Gestalt und Prozess miteinander verknüpft werden können³⁷⁹. Außerdem wurde der C&C²-Ansatz von ALBERS ET AL. in das Prozessmodellierungswerkzeug *Cambridge Advanced Modeler* prototypisch umgesetzt³⁸⁰. Hier hat der Entwickler auch Zugriff auf eine Bibliothek mit häufig vorkommenden Standard-Flussgrößen und -Funktionen, um die Modellierungstätigkeit möglichst effizient zu gestalten.

Eine Möglichkeit, den Funktions-Gestalt-Zusammenhang rechnergestützt zu modellieren, bietet auch der **RFLP-Ansatz**. Die Abkürzung setzt sich aus den vier Bestandteilen Requirements, Functional, Logical und Physical (Anforderungen, Funktionen, dynamische Verhaltensbeschreibung und Gestalt) des Ansatzes zusammen. Der RFLP-Ansatz ist im CAD-Tool *CATIA V6 Systems* in Verbindung mit dem PLM-Tool *ENOVIA V6*³⁸¹ (beide vom Hersteller Dassault Systems) umgesetzt worden. KLEINER und KRAMER weisen jedoch darauf hin, dass ein Tool allein noch nicht ausreicht. Die Entwicklung einer geeigneten Modellierungsmethode, insbesondere für die bislang wenig etablierten Funktionsstrukturen mechanischer Systeme, muss noch hinzukommen³⁸².

Ein weiterer vielversprechender Ansatz für die Systementwicklung ist die Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs mit der **Systems Modeling Language (SysML)**. Aufgrund ihrer Bedeutung in der vorliegenden Arbeit wird die SysML im darauffolgenden Kapitel separat erläutert.

³⁷⁸ Albers et al. 2011

³⁷⁹ Albers et al. 2009; Enkler 2010; Albers, Enkler & Ottnad 2011

³⁸⁰ Albers et al. 2009; Albers et al. 2010; Albers et al. 2011

³⁸¹ Product Lifecycle Management

³⁸² Kleiner & Kramer 2013

2.5.4 Systems Modeling Language

Die Systems Modeling Language (SysML) ist eine deskriptive, grafisch aufbereitete **Modellierungssprache**, mit der rechnerbasierte Produktmodelle erstellt werden können. Diese können die Anforderungen, Anwendungsfälle sowie Funktions- und Baustruktur des technischen Systems enthalten³⁸³. Basierend auf der Unified Modeling Language (UML)³⁸⁴, die hauptsächlich für die Modellierung von Softwaresystemen bestimmt ist, wurde die SysML gezielt um **Aspekte der Gestaltmodellierung** mechanischer und mechatronischer Systeme erweitert³⁸⁵. Sie bietet dem Anwender also ein weites Anwendungsspektrum. Eingeordnet in das Modellierungsframework von ALBERS und BURSAC³⁸⁶ kann sie als Generisches Metamodell bezeichnet werden. LOHMEYER stellt fest, dass die SysML als bloße Sprache noch keinen hohen Nutzen erzielen, jedoch in **Kombination mit geeigneten Modellierungsmethoden** zielführend eingesetzt werden kann³⁸⁷. Insbesondere in der Entwicklung von hochintegrierten und eingebetteten Systemen mit hohem Elektronik- und Software-Anteil eignet sich SysML beispielsweise zur Darstellung von Verhalten und logischer Systemarchitektur mittels eines Systemmodells³⁸⁸.

Neben den gängigen Zielsetzungen der Modellbasierten Systementwicklung (Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses in interdisziplinären Entwicklerteams, personenungebundene Sicherung und Bereitstellung von Erfahrungswissen, Erzeugung nutzerspezifischer Sichten³⁸⁹) wenden sich ALBERS und ZINGEL im Speziellen der Modellierung von Funktionen zu³⁹⁰. Als Ergebnis von Befragungen stellen sie fest, dass die Entwickler die Modellierbarkeit von Funktionen, möglich gemacht durch die Einführung von SysML, als größten Vorteil empfinden. Diese Aussage lässt bereits das Potenzial erahnen, das die **SysML zur rechnerbasierten Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs** bietet, um die es auch in der vorliegenden Arbeit geht. Die dafür geeigneten, bereits existierenden SysML-Modellierungsmethoden (u. a. jene von ALBERS und ZINGEL³⁹¹) werden weiter unten vorgestellt.

³⁸³ Zingel 2013

³⁸⁴ OMG UML 2011

³⁸⁵ Alt 2012

³⁸⁶ Siehe Kapitel 2.2.5

³⁸⁷ Lohmeyer 2013

³⁸⁸ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014

³⁸⁹ Stechert 2010; Albers, Munker, Zingel & Behrendt 2013; Alt 2012

³⁹⁰ Albers & Zingel 2013a

³⁹¹ Albers & Zingel 2013; Zingel 2013

Der vorliegende Abschnitt geht auf die wichtigsten Alternativen zur SysML, also Tools und Sprachen ähnlicher Zielsetzung, ein³⁹². Als Erstes sei hier *Modelica* genannt, eine objektorientierte Modellierungssprache, mit der heterogene technische Systeme mit Mechanik, Elektrik, Hydraulik und Regelungstechnik sowohl auf Komponenten- als auch auf Gleichungs-Ebene modelliert werden können³⁹³. In ModelicaML, einem UML-Profil für *Modelica* nach SCHAMAI, wird die Erzeugung von ausführbarem *Modelica*-Code aus einer grafischen Darstellung des technischen Systems ermöglicht³⁹⁴. IWANEK ET AL. kombinieren die SysML mit der fachdisziplinübergreifenden Spezifikationstechnik *CONSENS*, deren Ursprung in der Konstruktionslehre liegt³⁹⁵. Ein weiteres, weit verbreitetes Tool ist *MATLAB*, das allerdings – im Unterschied zur SysML – weniger zur gesamthaften, deskriptiven Darstellung der Systemkomponenten eingesetzt wird, sondern seine Stärken in der numerischen Berechnung und Simulation besitzt³⁹⁶. ZINGEL³⁹⁷ weist der SysML deswegen, in Anlehnung an das Drei-Ebenen-Konzept nach EIGNER³⁹⁸, die Ebene der qualitativ beschreibenden Modelle zu, wogegen *MATLAB* auf der Ebene der qualitativen (Simulations-)Modelle zu finden ist. Überdies listet ALT einige Microsoft-Programme auf (z. B. *Visio*, *Sharepoint*), die als Alternativen zu SysML genutzt werden können³⁹⁹.

Die Bestandteile der SysML werden nun knapp vorgestellt⁴⁰⁰. Sämtliche Daten eines SysML-Produktmodells können mithilfe der SysML-Softwaretools modelliert und analysiert werden. Dazu können die Modellelemente in der Diagramm-Oberfläche angeordnet und vernetzt werden. Sie sind hiernach im Containment-Baum abgelegt (Abbildung 2.18).

³⁹² REICHWEIN und PAREDIS geben einen weitreichenden Überblick über bestehende MBSE-Sprachen und -Standards (Reichwein & Paredis 2011).

³⁹³ Birkhold 2013; Zingel 2013

³⁹⁴ Schamai 2009

³⁹⁵ Iwanek, Kaiser, Dumitrescu & Nyßen 2013

³⁹⁶ Angermann, Beuschel, Rau & Wohlfarth 2009; Alt 2012; Zingel 2013

³⁹⁷ Zingel 2013

³⁹⁸ Eigner, Gilz & Zafirov 2012

³⁹⁹ Alt 2012

⁴⁰⁰ Ausführliche Werke zur SysML: Weilkens 2014; Alt 2012; Zingel 2013

allgemein Systemelemente repräsentieren und ist sehr vielseitig einsetzbar. Durch die Bildung von **Stereotypen** des allgemeinen SysML-Blocks kann die Modellbildung weiter verfeinert werden: Mithilfe der Stereotypen kann nun unterschieden werden, ob ein Block beispielsweise ein Gestaltelement, ein C&C²-Element oder eine Funktion darstellen soll.

Durch die in der SysML definierten **Relationen**⁴⁰⁴ können die Blöcke miteinander vernetzt werden. Außerdem kommen durch diese Verknüpfungen die Vorteile des rechner- und modellbasierten Ansatzes zum Tragen, da sie das Navigieren und Springen zwischen unterschiedlichen Systemebenen, Wirkstrukturen und den zugehörigen Ansichten ermöglichen. Die **Komposition** verknüpft die Blöcke durch eine **hierarchische, existenzabhängige Beziehung**. Beispielsweise ist der Antriebsstrang eine Untermenge des Gesamtfahrzeugs. Entfällt das Gesamtfahrzeug aus dem Modell, so entfällt auch der Antriebsstrang. Die **Vererbung** erlaubt es, **Attribute** von einem Block auf mehrere andere Blöcke **zu vererben**, sodass eine Eltern-Kind-Beziehung entsteht⁴⁰⁵ (z. B. kann jeder der Vorwärtsgänge eines Doppelkupplungsgetriebes vom Eltern-Block „Gang“ das allgemeingültige Merkmal erben, dass er durch ein Stirnradpaar gebildet wird). Die **Assoziation** ist eine Relation zwischen zwei Blöcken, die ganz allgemein ausdrücken soll, dass diese Blöcke zueinander in Beziehung stehen.

Nachdem die Elemente der SysML erläutert wurden, wenden sich die folgenden Abschnitte den **Modellierungsmethoden** zu. Es werden nur solche Methoden aufgeführt, die zur Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs von technischen Systemen geeignet sind. Eine dieser Methoden heißt **SysMOD** und wurde von WEILKIENS entwickelt⁴⁰⁶. Neben der Beschreibung eines globalen Vorgehens zur Modellierung des technischen Systems ist es möglich, den Projektbeteiligten mit SysMOD unterschiedliche Rollen zuzuweisen. Die **FAS-Methode** leitet sich aus der SysMOD ab und zielt ebenfalls auf die Modellierung von Funktionen und zusätzlich auf deren Vernetzung mit der Baustruktur eines technischen Systems⁴⁰⁷. Im aktuellen Forschungsprojekt FAS4M, an dem auch das IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe beteiligt ist, werden Ansätze entwickelt, mit denen die Verknüpfung von Funktionsmodellen in SysML mit gestaltbeschreibenden CAD-Modellen zur durchgängigen Modellbasierten

⁴⁰⁴ An dieser Stelle werden – analog zu den Diagrammen – nur die in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Relationen vorgestellt. Eine umfassende Darstellung enthält z. B. WEILKIENS (Weilkiens 2014).

⁴⁰⁵ Zingel 2013

⁴⁰⁶ Weilkiens 2014; Korff & Weilkiens 2010

⁴⁰⁷ Lamm & Weilkiens 2010; Korff, Lamm & Weilkiens 2011; Dänzer et al. 2014

Systementwicklung hergestellt werden kann⁴⁰⁸. Der SE-VPE-Ansatz nach EIGNER ET AL.⁴⁰⁹ kann in der Frühen Phase der Entwicklung⁴¹⁰ Anforderungen in funktionale und logische Beschreibungsformen des Produkts umwandeln. Eine Besonderheit des Ansatzes ist die Übertragbarkeit des entstandenen Systemmodells in ein System Lifecycle Management-System (SysLM). Als weitere Methoden sind in diesem Zusammenhang zu nennen: Systems-Engineering-Prozess HarmonySE nach HOFFMANN, SE-Ansatz nach HOLT und PERRY, Methode zur integrativen Systemmodellierung von Hardware- und Softwarekomponenten nach ALBERS ET AL. sowie die Featuremodellierung nach ALT⁴¹¹.

EIGNER ET AL.⁴¹² und das Forschungsprojekt mecPro² verfolgen das Ziel, eine interdisziplinäre modellbasierte Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen mit einem ganzheitlichen Ansatz zu ermöglichen (Abbildung 2.20).

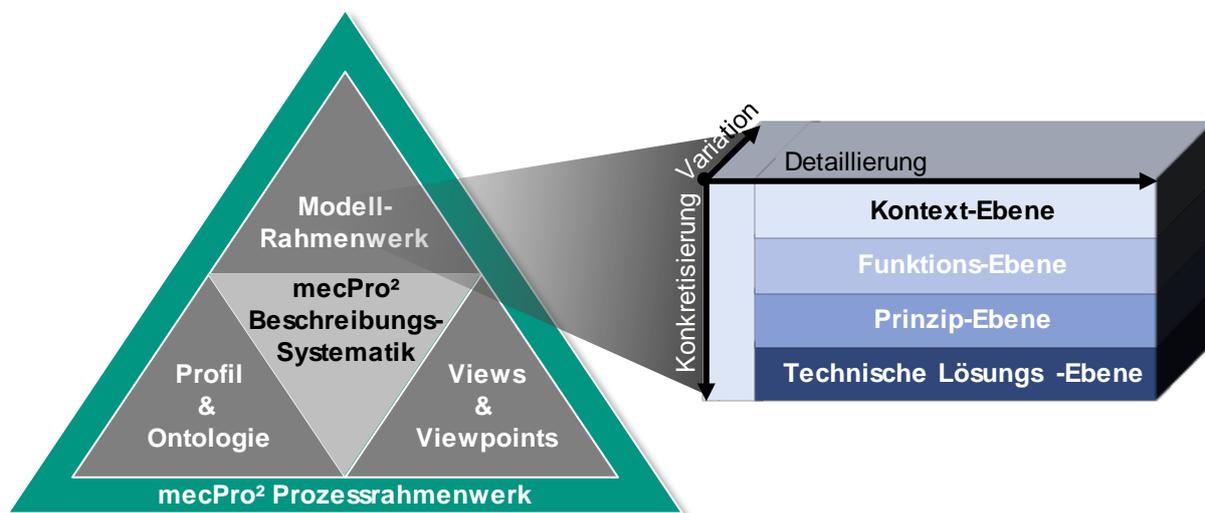


Abbildung 2.20: Beschreibungssystematik und Modellrahmenwerk nach EIGNER ET AL.⁴¹³

Dazu wurde eine Beschreibungssystematik durch Kombination der Vorzüge bestehender Ansätze (u. a. erweitertes V-Modell nach EIGNER⁴¹⁴) entwickelt. Mit dieser Beschreibungssystematik können sogenannte Systemmodelle erzeugt werden, die im interdisziplinären Produktentstehungsprozess zum Einsatz kommen

⁴⁰⁸ Grundel et al. 2014

⁴⁰⁹ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014; Gilz 2014

⁴¹⁰ Die Frühe Phase wird in der vorliegenden Arbeit gemäß der Produktgenerationsentwicklung definiert, siehe Kapitel 2.3.2.

⁴¹¹ Hoffmann 2011; Holt & Perry 2013; Albers, Munker, Zingel & Behrendt 2013; Alt 2012

⁴¹² Eigner, Dickopf, Schulte & Schneider 2015

⁴¹³ Nach Eigner, Dickopf, Schulte & Schneider 2015

⁴¹⁴ Eigner, Gilz & Zafirov 2012

können. Insbesondere dort kann die SysML zielführend eingesetzt werden, wie mehrere Berichte aus industrienaher Forschung belegen⁴¹⁵.

Eine Sonderrolle kommt der Modellierungsmethode von ALBERS und ZINGEL zu, denn sie nutzt die Elemente des C&C²-Ansatzes zur Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs in SysML. Die Methode bildet einen **ganzheitlichen Ansatz**, mit dem auch Anwendungsfälle, Anforderungen, Testfälle und Systemzustände modelliert werden können. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird lediglich derjenige Teil näher betrachtet, der den **Funktions-Gestalt-Zusammenhang eines technischen Systems** beschreibt. Er setzt sich aus der Funktions- und der Baustruktur zusammen. Erstere enthält die Wirkstrukturen im Sinne des C&C²-Ansatzes. ALBERS und ZINGEL nutzen stereotypisierte Blocks, um beispielsweise Bauteile und Leitstützstrukturen darzustellen. Die Methode wurde nach ihrer Erstellung hauptsächlich zur Entwicklung von Konzepten (z. B. bei der Zielsystemerstellung) eingesetzt. Dabei betonen die Autoren, dass der Aufwand zur Modellerstellung in einem angemessenen Verhältnis zum entstehenden Nutzen der SysML-Modelle stehen muss. Die Validierungen dieses Ansatzes enthalten jedoch keine Gegenüberstellung dieser beiden Größen in Form von Zahlenwerten. Trotz der überwiegend positiven Rückmeldungen der Entwickler, die nach Anwendung der Methode befragt wurden, kommen ALBERS und ZINGEL zum Schluss, dass die **Einführung von SysML-Modellen im industriellen Umfeld** durch viele Faktoren (darunter die verbesserungswürdige Anwenderfreundlichkeit der SysML-Tools, erforderliche Mitarbeiterschulungen) behindert werden kann. Auch sehen sie Weiterentwicklungspotenzial der Methode, u. a. im Bereich des Wissensmanagements.⁴¹⁶

Dies führt zum letzten Abschnitt des SysML-Kapitels, der die **Etablierung der SysML im industriellen Umfeld** kurz umreißt. Obwohl der SysML im Kontext der Modellbasierten Systementwicklung ein großes Potenzial bescheinigt wird, ist sie in Unternehmen – abgesehen von forschungsnahen Anwendungen und in Pilotprojekten – noch nicht weit verbreitet⁴¹⁷. Als Gründe nennen mehrere Autoren Unzulänglichkeiten in der Bedienerfreundlichkeit der SysML-Tools, aber auch die fehlenden Schnittstellen zu anderen Produktmodellen (z. B. im CAD-System) werden bemängelt⁴¹⁸. Die meisten dieser Studien stützen ihre Aussagen auf Umfragen in

⁴¹⁵ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014; Bursac 2016

⁴¹⁶ Albers & Zingel 2013; Albers & Zingel 2013a; Zingel 2013

⁴¹⁷ Zingel 2013

⁴¹⁸ Albers & Zingel 2013a; Albers & Lohmeyer 2012; Cloutier & Bone 2010; Broy et al. 2010; Zingel 2013

Unternehmen und unter Benutzern der SysML. So kann zwar ein Stimmungsbild eingeholt, der tatsächliche Modellierungsaufwand jedoch nicht quantifiziert werden.

2.5.5 Zwischenfazit

Das Wissen der Entwickler zum **Funktions-Gestalt-Zusammenhang** ist ein **Erfolgsfaktor** in der Entwicklung mechanischer Systeme. Die **Weitergabe der Informationen** zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang fördert also die Entwicklung technischer Systeme von hoher Qualität. Der C&C²-Ansatz ist dazu geeignet, diese Wirkstrukturen komplexer Systeme auf einfache Weise transparent darzustellen. Weiterhin existieren **modellbasierte Ansätze**, um den Funktions-Gestalt-Zusammenhang rechnergestützt nutzen zu können. Die Modellierungssprache **SysML** hat ihre Tauglichkeit durch die bestehenden Methoden und speziell in der Entwicklung mechatronischer Systeme mit hohem Elektronik- und Software-Anteil unter Beweis stellen können. Diese Methoden sollten u. a. noch um Aspekte des Wissensmanagements erweitert werden. Weiterhin sollte versucht werden, **Aufwand und Nutzen von SysML-Modellen** zu quantifizieren und einander **gegenüberzustellen**. Insbesondere im Gebiet der Serienentwicklung ist der Einsatz der SysML noch unerforscht. Bestehende Arbeiten haben hauptsächlich in der Frühen Phase und im Kontext von konzeptionellen Arbeiten stattgefunden.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die Motivation zur Forschung an neuen Methoden für die vorliegende Arbeit dargelegt. Dazu werden die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung zusammengefasst und es wird der **Forschungsbedarf** abgeleitet. Darauf aufbauend wird die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit in Form von **Forschungshypothesen** und **Forschungsfragen** formuliert (Kapitel 3.1). Weiterhin werden die **Rahmenbedingungen** der Forschungsumgebung vorgestellt (Kapitel 3.2). Abschließend wird das Forschungsdesign, also das **systematische Vorgehen** bei der Entwicklung der neuen Methoden, erörtert (Kapitel 3.3).

3.1 Forschungsbedarf, Hypothesen, Forschungsfragen

Zur Herleitung des Forschungsbedarfs werden zunächst die Aspekte aus den Zwischenfazits des Kapitels 2 ausgewertet. Sobald für Herausforderungen, die in der Entwicklung von Baukästen auftreten, noch keine Antworten in Form adäquater methodischer Hilfestellungen und Lösungsansätze bekannt sind, kann von einer **Forschungslücke** gesprochen werden. Treten diese Herausforderungen an Stellen der Baukastenentwicklung auf, die als Schlüsselfaktoren gelten, so besteht gleichzeitig der **Forschungsbedarf**, sprich die Nachfrage, diese Forschungslücke mithilfe neuer Entwicklungsmethoden zu schließen. Um die Basis für eine zielgerichtete Vorgehensweise bei der Entwicklung neuer Methoden zu schaffen, werden **Forschungshypothesen** aufgestellt und darauffolgend überprüft. Dazu wird jede Forschungshypothese durch mehrere **Forschungsfragen** konkretisiert, welche es zu beantworten gilt.

Die **Entwicklung von Baukästen** ist eine zielführende und etablierte Maßnahme in der Automobilindustrie, um die externe Vielfalt bei gleichzeitiger Senkung der internen Vielfalt zu erhöhen. Allerdings steigt im Vergleich zu herkömmlichen Entwicklungen die **Komplexität** durch die gestiegenen **inhaltlichen Abhängigkeiten** und den **Zeitversatz**, welcher zu erhöhter Unsicherheit führt⁴¹⁹. Für die Modularisierung von Produkten existieren bereits mehrere Methoden. Fasst man die Baukastenentwicklung als zeitlich ausgedehnte begleitende Aktivität im integrierten Produktentstehungsmodell iPeM⁴²⁰ auf, so stellt man fest, dass die

⁴¹⁹ Siehe Kapitel 2.3.3

⁴²⁰ Siehe Kapitel 2.2.4

Serienentwicklung von Baukästen – mit Ausnahme der Frühen Phase⁴²¹ – noch weitgehend unerforscht ist: Es existieren kaum methodische Lösungsansätze für die Baukastenentwicklung, die die Handhabung ihrer Komplexität bei gleichzeitiger Nutzung ihrer Chancen (z. B. Wiederverwendbarkeit von Zielsystem-Elementen und von Lösungswissen) ermöglichen.

Diesem Forschungsbedarf stehen einige methodische Ansätze gegenüber, die bereits vorgestellt wurden⁴²²: Mithilfe der **Modellbasierten Systementwicklung** werden die Erhöhung der Transparenz und die ganzheitliche Problemlösung in der Entwicklung komplexer technischer Systeme gefördert. Somit kann der MBSE-Ansatz in der Produktentwicklung zur **Handhabung der Komplexität** und zur **Qualitätssteigerung** des entwickelten Produkts verhelfen. Aufgrund ihrer zeitlichen Ausdehnung verläuft die Baukastenentwicklung gemäß den Prinzipien der Produktgenerationsentwicklung. Letztere können also auch in der Baukastenentwicklung (z. B. unter Zuhilfenahme des Modellierungsframeworks) für die Wiederverwendung von Zielsystem-Elementen und von Lösungswissen (z. B. zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang) eingesetzt werden. Da ein solcher Lösungsansatz aus der Literatur bislang nicht bekannt ist, muss er erst entwickelt werden.

Obwohl in der Automobilindustrie ein hoher Bedarf an modellbasierten Ansätzen herrscht, sind diese in der industriellen Praxis noch nicht weit verbreitet. Daher soll die **Evaluierung der Akzeptanz und des Praxisnutzens** ein fester Bestandteil der Methodenentwicklung und -einführung in der vorliegenden Arbeit sein. Dabei stehen mit dem erweiterten ZHO-Modell und dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) Lösungsansätze zur Verfügung, die die Erforschung neuer, menschenzentrierter Entwicklungsmethoden ermöglichen. Im Folgenden soll die Entwicklung modellbasierter Ansätze für die beiden Schwerpunkte **Baukasten-Zielsysteme** (Anforderungsmanagement) und **Funktions-Gestalt-Zusammenhang** (Weitergabe von Lösungswissen) weiter vertieft werden.

Das **Anforderungsmanagement** ist eine Kernaktivität für eine erfolgreiche Produktentwicklung⁴²³. Allerdings sieht sich die Serienentwicklung von Baukästen aufgrund der inhaltlichen Abhängigkeiten und des Zeitversatzes mit einer **gestiegenen Komplexität des Zielsystems** konfrontiert. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diese Komplexitätstreiber mithilfe einer Modellierungsmethode für Baukasten-Zielsysteme besser handhabbar zu machen. Zudem gilt es, die Wiederverwendbarkeit der Elemente des Baukasten-Zielsystems im Kontext der

⁴²¹ Bursac 2016

⁴²² Siehe Kapitel 2.2

⁴²³ Siehe Kapitel 2.4

Produktgenerationsentwicklung gezielt auszunutzen. Basierend auf diesem Forschungsbedarf wird die erste Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit aufgestellt:

Forschungshypothese 1: Eine Methode zur Modellierung des Baukasten-Zielsystems kann die Serienentwicklung von Baukästen unterstützen.

Aus dieser Forschungshypothese werden die folgenden drei Forschungsfragen abgeleitet:

Forschungsfrage 1.1: Wie muss ein geeignetes Metamodell zur Modellierung von Zielsystemen beschaffen sein?

Das in Forschungsfrage 1.1 angesprochene Metamodell enthält die Modellierungsmethode für Zielsysteme, mit der Referenz- und Systemmodelle eines Zielsystems erstellt werden können⁴²⁴.

Forschungsfrage 1.2: Wie können in diesem Metamodell die Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung berücksichtigt werden?

Die Antwort auf Forschungsfrage 1.2 soll zutage fördern, wie die inhaltlichen Abhängigkeiten und der Zeitversatz in der Modellierung von Baukasten-Zielsystemen handhabbar gemacht werden können.

Forschungsfrage 1.3: Wie kann die Wiederverwendung der Zielsystem-Elemente im Kontext der Produktgenerationsentwicklung ermöglicht werden?

Mit der Antwort auf die Forschungsfrage 1.3 sollen die Potenziale der Baukasten-Entwicklung bei der Wiederverwendbarkeit von Zielsystem-Elementen mithilfe der Modellierungsmethode erschlossen werden. Die Ergebnisse zur Behandlung der Forschungsfragen 1.1, 1.2 und 1.3 werden in Kapitel 4 der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

Das **Wissen über den Funktions-Gestalt-Zusammenhang** der Entwickler und dessen Weitergabe ist ein Erfolgsfaktor in der Entwicklung mechanischer Systeme⁴²⁵. Die Explikation des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs in Form von Modellen kann für mehr Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen und für die personenungebundene Sicherung und Weitergabe von Erfahrungswissen sorgen. Gerade in der **Baukastenentwicklung** sind Ansätze zur Weiterreichung von

⁴²⁴ Siehe Kapitel 2.2.5

⁴²⁵ Siehe Kapitel 2.5.5

Erfahrungswissen von besonderem Interesse, denn aufgrund ihrer Länge über mehrere Modulgenerationen hinweg steigt das Risiko, dass Wissen verloren geht. Die modellhafte Abbildung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs ist jedoch bislang in der Serienentwicklung mechanischer Systeme nicht weit verbreitet. Es stellt sich also die Frage, ob Modelle des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs die Serienentwicklung von Baukästen unterstützen können. Zur Bildung dieser Modelle mit der Sprache SysML sind bereits erste Methoden vorgestellt worden (u. a. unter der Verwendung des C&C²-Ansatzes). Bis jetzt sind jedoch noch keine Forschungsaktivitäten zum Einsatz von **SysML-Modellen in der Serienentwicklung** bekannt. Weiterhin existieren nur wenige **Gegenüberstellungen von Aufwand und Nutzen** von SysML-Modellen in der Serienentwicklung allgemein und der Baukasten-Serienentwicklung im Speziellen. Hieraus leitet sich die zweite Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit ab:

Forschungshypothese 2: SysML-Modelle des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs können die Serienentwicklung von Baukästen unterstützen.

Zur weiteren Ausgestaltung des Forschungsvorhabens werden die folgenden drei Forschungsfragen gestellt:

Forschungsfrage 2.1: Wie muss ein geeignetes Metamodell zur Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs beschaffen sein?

Anhand der bekannten Arbeiten auf diesem Gebiet ist davon auszugehen, dass ein Metamodell entwickelt werden kann, das die Modellierungsmethode enthält und somit die Bildung von Referenz- und Systemmodellen ermöglicht.

Forschungsfrage 2.2: Kann dieses Metamodell dazu eingesetzt werden, ein Referenzmodell zu erstellen, das die Erfahrungen aus der Entwicklung von Vorgänger-Produktgenerationen erfasst und dokumentiert?

Diese Forschungsfrage deutet bereits an, dass das Metamodell u. a. Aspekte des Wissensmanagements aufgreifen soll, um die Weitergabe von Erfahrungswissen mithilfe des SysML-Modells zu ermöglichen.

Forschungsfrage 2.3: Wie hoch sind Aufwand und Nutzen des SysML-Modells in der Baukasten-Serienentwicklung im Sinne eines menschenzentrierten Ansatzes?

Die Antwort auf diese Forschungsfrage soll mithilfe der Messung der Akzeptanz und der Praxistauglichkeit der Methode ermittelt werden. Die Ergebnisse zur Behandlung der Forschungsfragen 2.1, 2.2 und 2.3 werden in Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

3.2 Forschungsumgebung

Die Forschungsaktivitäten der vorliegenden Arbeit fanden im Rahmen einer dreijährigen begleitenden Forschung in der Entwicklungsabteilung für Hybrid-Triebstrangsysteme eines Automobilherstellers statt. In diesem Kapitel werden einige Rahmenbedingungen (z. B. verfügbare Softwaretools), unter denen die Erarbeitung der Entwicklungsmethoden stattgefunden hat, knapp aufgeführt.

Diese Arbeit befasst sich mit der Unterstützung der Entwicklung von Systembaukästen⁴²⁶. In diesem Kontext wird unter einem technischen System stets ein Modul verstanden, das in ein Supersystem, das Gesamtfahrzeug, integriert wird. Aufgrund ihrer Komplexität bieten Hybrid-Triebstrangsysteme eine anspruchsvolle Entwicklungsumgebung⁴²⁷. Diese eignet sich somit gut zur Entwicklung und Validierung neuer Methoden, die auf den Umgang mit Komplexität abzielen. Es ist davon auszugehen, dass die Erkenntnisse zu den erarbeiteten Methoden der vorliegenden Arbeit auch auf die Entwicklung anderer Systembaukästen der Fahrzeugtechnik übertragbar sind.

Wie in der Serienentwicklung üblich, ist das CAD-Modell eines der wichtigsten Produktmodelle für die Funktions- und Gestaltsynthese⁴²⁸. Modelle, die die Funktionsstruktur und den Funktions-Gestalt-Zusammenhang enthalten, sind dagegen in der Entwicklung überwiegend mechanischer Systeme wenig verbreitet. So erklärt sich auch, dass SysML-Modelle in der Serienentwicklung des untersuchten Unternehmens zuvor noch nicht zur Anwendung gekommen sind.

Zur Modellierung der SysML-Modelle kam das Tool *Cameo Systems Modeler* des Herstellers No Magic zum Einsatz⁴²⁹. Für das Anforderungsmanagement stand das Tool *Rational DOORS* des Herstellers IBM zur Verfügung⁴³⁰. Die Methoden, die in der vorliegenden Arbeit entwickelt werden, sind zunächst toolneutral ausgeführt und werden zwecks Anwendung erst in einem zweiten Schritt in die Softwarewerkzeuge implementiert.

3.3 Forschungsdesign

Nach der Formulierung der Aufgabenstellung in Form der beiden Hypothesen und der zugehörigen Forschungsfragen beschreibt dieses Kapitel die **methodische Vorgehensweise**. In der vorliegenden Arbeit kam dazu das ZHO-Modell zum

⁴²⁶ Siehe Kapitel 2.3.1

⁴²⁷ Siehe Kapitel 2.1

⁴²⁸ Siehe Kapitel 2.5.2

⁴²⁹ No Magic 2015

⁴³⁰ IBM 2015

Einsatz⁴³¹. Die Modellierungsmethoden, die in der vorliegenden Arbeit entwickelt werden, nehmen die Rolle des zu entwickelnden Produkts ein. Als Kunde kann der Entwickler aufgefasst werden⁴³², der die Methoden nach ihrer Fertigstellung im Handlungssystem der Baukasten-Serienentwicklung anwenden soll (Abbildung 3.1). Auf diese Weise steht der Mensch als Anwender der Methoden im Mittelpunkt. Gemäß dem erweiterten ZHO-Modell erfolgt die Methodenentwicklung – analog zur Produktentwicklung – aus iterativen Schleifen von Analyse- und Syntheseschritten.

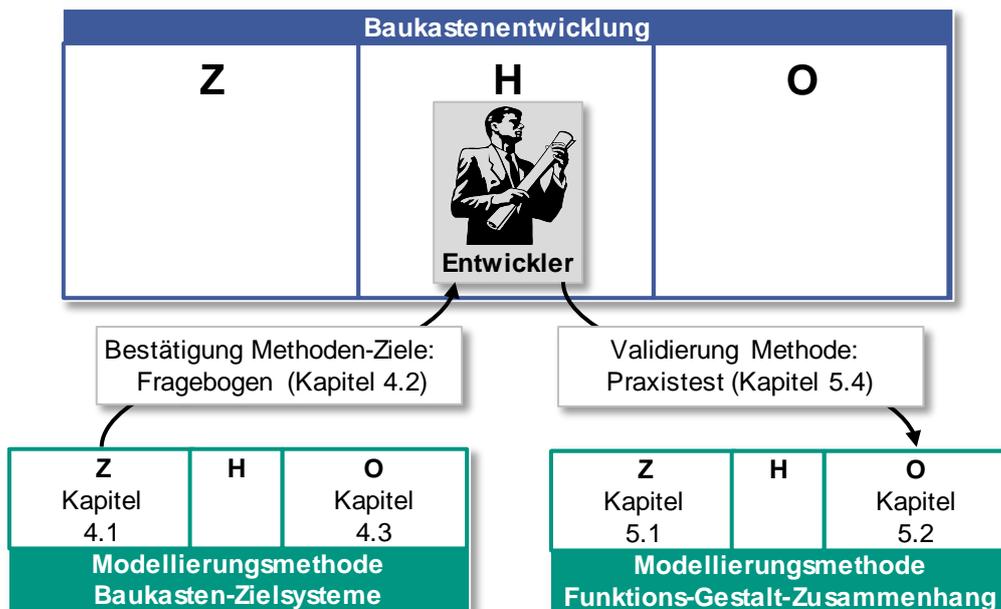


Abbildung 3.1: ZHO-Modell als Forschungsmethodik⁴³³

Das Forschungsergebnis der vorliegenden Arbeit sind zwei Modellierungsmethoden: Die eine ist eine Methode zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen (korrespondierend zur Forschungshypothese 1), die andere ist eine Methode zur Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs von Modulen (korrespondierend zur Forschungshypothese 2). Analog zum Zielsystem der Produktentwicklung weisen die Zielsysteme der Entwicklungsmethoden die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen der Modellierungsmethoden auf. Das fertige Resultat der Methodenentwicklung ist jeweils im Objektsystem der Modellierungsmethoden zu finden.

Als wesentliches Hilfsmittel zur Erforschung der neuen Modellierungsmethoden kommt das Modellierungsframework⁴³⁴ zum Einsatz (Abbildung 3.2). Mit seiner Hilfe

⁴³¹ ALBERS und MARXEN haben mit dem Integrated Design Support Development Model (iDSDM), das vom iPeM abgeleitet wurde, gezeigt, wie neue Entwicklungsmethoden mithilfe des ZHO-Modells entwickelt werden können (Albers & Marxen 2012).

⁴³² Marxen 2014

⁴³³ Die korrespondierenden Kapitel in der vorliegenden Arbeit sind in Klammern aufgeführt.

können die unterschiedlichen Abstraktionsgrade der eingesetzten Modelltypen anschaulich dargestellt werden.

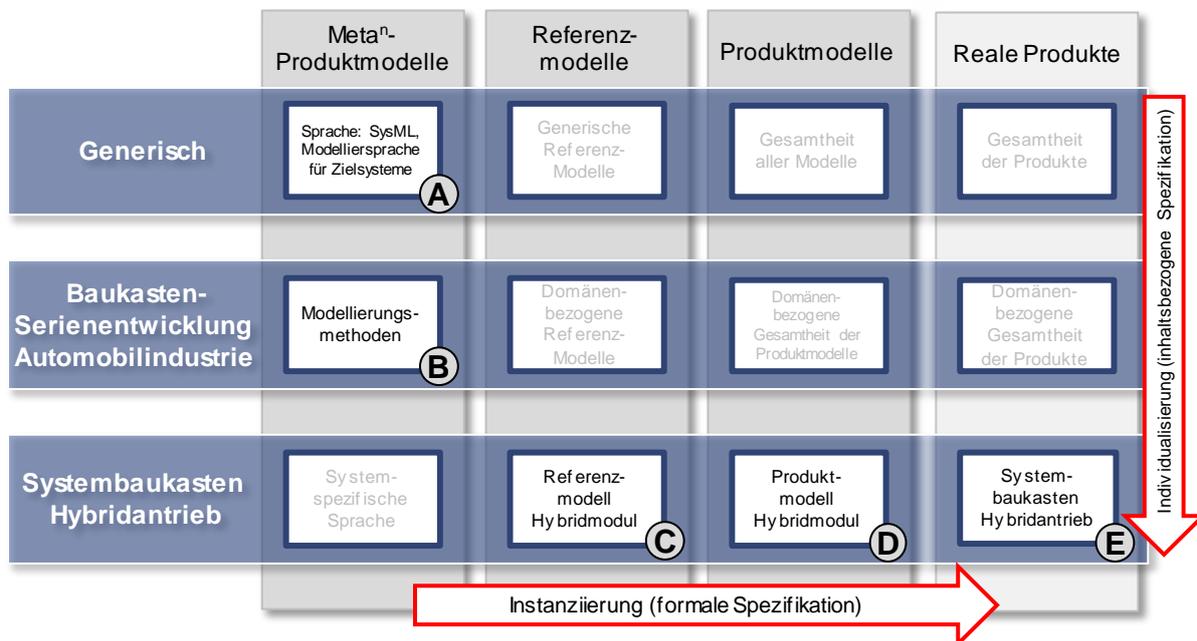


Abbildung 3.2: Modellierungsframework mit Modelltypen der vorliegenden Arbeit

Das methodische Vorgehen zur Entwicklung der beiden Modellierungsmethoden ist bei den folgenden Arbeitsschritten gleich: Aufstellen des Methoden-Zielsystems, Entwicklung der Methode, Anwendung und Verifikation der Methode. Diese Arbeitsschritte werden nachfolgend anhand des Modellierungsframeworks (Abbildung 3.2) beschrieben. Bei der Validierung der beiden Modellierungsmethoden ist die Vorgehensweise unterschiedlich. Diese Schritte werden weiter unten beschrieben.

Zur Verwendung des Modellierungsframeworks in der vorliegenden Arbeit wird unter der **Domäne** fortan die **Baukasten-Serienentwicklung** im Kontext der Automobilindustrie verstanden. Die zu entwickelnden **Systeme** sind **Systembaukästen für Hybridtriebstränge**. Zunächst können die aus der Literatur bekannten *generischen Metamodelle* (Feld A, z. B. Sprachen wie SysML⁴³⁵, Modellierungssprache für Zielsysteme nach EBEL⁴³⁶) einsortiert werden. Außerdem sind bereits *domänenspezifische Modellierungsmethoden* (Feld B, z. B. die Methode zur Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs mittels C&C²-Ansatz in

⁴³⁴ Siehe Kapitel 2.2.5

⁴³⁵ Siehe Kapitel 2.5.4

⁴³⁶ Siehe Kapitel 2.4.3

SysML nach ALBERS und ZINGEL⁴³⁷) bekannt. Von dieser Ausgangslage werden in der vorliegenden Arbeit die zwei Modellierungsmethoden aus Abbildung 3.1 entwickelt. Deren ZHO-Modelle sind im Framework als *domänenspezifisches Metamodell* (Feld B) wiederzufinden. Mithilfe dieser Modellierungsmethoden können nun Referenzmodelle (Feld C) und Systemmodelle (Feld D) von den Hybrid-Systembaukästen (Feld E) erstellt werden. Im Zuge der Modellerstellung können die Elemente, Relationen und Modellierungsregeln der Methode auf ihre Tauglichkeit überprüft werden, weswegen dieser Arbeitsschritt einer Verifikation der entwickelten Methoden gleichkommt.

Bei der **Validierung** der beiden Entwicklungsmethoden werden unterschiedliche Vorgehensweisen angewandt: Bei der Modellierungsmethode für Baukasten-Zielsysteme wird das Zielsystem des Metamodells durch Entwickler mit einem Fragebogen validiert. Der Grund für dieses Vorgehen sind die langen Projektlaufzeiten einer Baukastenentwicklung, die es nicht möglich machen, das Ergebnis der Baukastenentwicklung in Form von fertig entwickelten Modulen für die Validierung der Methode einzusetzen. Zur Validierung der Modellierungsmethode für den Funktions-Gestalt-Zusammenhang der Module werden die erzeugten Referenz- und Produktmodelle einem Praxistest unterzogen: Während der Modellerstellung und -nutzung werden von Forschern und Entwicklern Daten erhoben, die Aufschlüsse über die Praxistauglichkeit und Akzeptanz der besagten Modelle liefern sollen.

Die Forschungsergebnisse der vorliegenden Arbeit werden in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellt. Das Kapitel 4 befasst sich mit der Entwicklung einer Methode zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen und ihrem darauffolgenden Einsatz in der Serienentwicklung von Hybridantrieben. Das Kapitel 4.1 zu den **Zielen der Methode** beschreibt die vorgefundenen Herausforderungen im Anforderungsmanagement von Baukasten-Zielsystemen, denen die Lösungsansätze der Methode entgegentreten sollen. Um die Existenz und Relevanz der gefundenen Herausforderungen zu bestätigen, wird eine **Validierung der Methoden-Ziele** mithilfe eines Fragebogens (Kapitel 4.2) durchgeführt. Es folgt die Vorstellung der **Modellierungsmethode** (Kapitel 4.3), die die gefundenen Herausforderungen mithilfe ihrer Lösungsansätze adressieren soll. Daraufhin wird die **Implementierung** der Methode **ins Tool** beschrieben, einschließlich der dafür erforderlichen Anpassungen der Methode. Abschließend erfolgt die **Implementierung** sowie die **Anwendung** der Methode **im Unternehmen** (Kapitel 4.4): In einem ersten Schritt wird ein Zielsystem-Referenzmodell für Baukästen erstellt. In einem zweiten Schritt werden aus diesem

⁴³⁷ Siehe Kapitel 2.5.4

Referenzmodell projektspezifische Baukasten-Zielsysteme in der Serienentwicklung von Hybridtriebstrang-Baukästen abgeleitet. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion und einem Zwischenfazit (Kapitel 4.5).

Das Kapitel 5 beschreibt die Entwicklung einer Modellierungsmethode, mit deren Hilfe SysML-Modelle des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs technischer Systeme erzeugt und angewendet werden können, um die Serienentwicklung von Baukästen zu unterstützen. Zunächst werden aus den Erkenntnissen des Stands der Forschung die **Ziele der Modellierungsmethode** entwickelt (Kapitel 5.1). Danach wird diese **Modellierungsmethode** vorgestellt (Kapitel 5.2). Um die Methode zu evaluieren, wird ein zweistufiges Vorgehen eingesetzt (Abbildung 3.3).

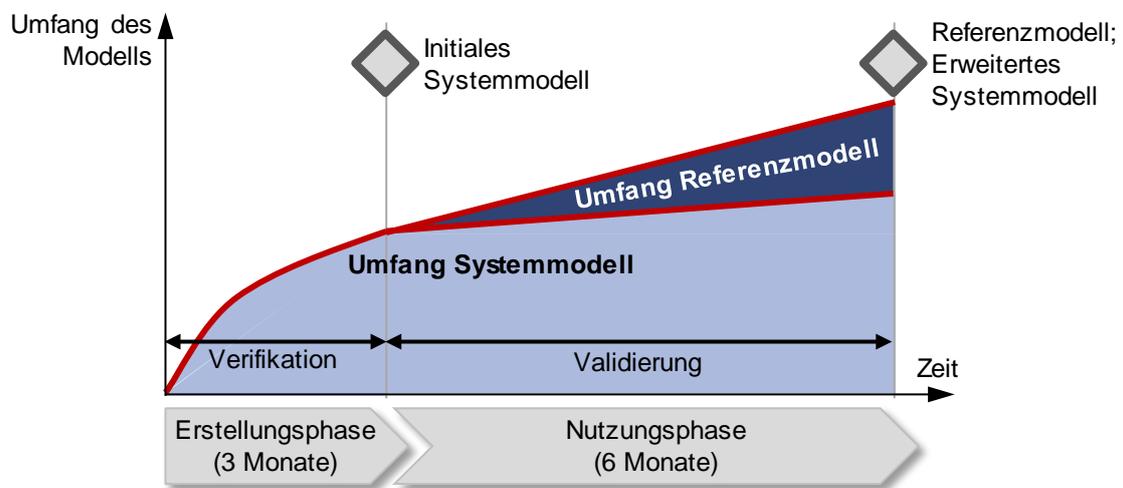


Abbildung 3.3: Evaluierung der Methode in Erstellungs- und Nutzungsphase

In der **Erstellungsphase** wird die SysML-Modellierungsmethode erstmalig zur Erzeugung eines Produktmodells, das den Funktions-Gestalt-Zusammenhang eines Hybridmoduls⁴³⁸ enthält, angewendet und **verifiziert** (Kapitel 5.3). Die Untersuchung der Nützlichkeit für die Serienentwicklung von Baukästen – und damit die **Validierung** – schließt sich im zweiten Schritt, der **Nutzungsphase** des SysML-Modells, an (Kapitel 5.4). Im Zuge dieser Nutzungsphase wird das Modell sowohl um Aspekte sowohl des Systemmodells (Funktions-Gestalt-Zusammenhang des in Entwicklung befindlichen Hybridmoduls) als auch des Referenz-Systemmodells (Lessons Learned zu Vorgängergenerationen des Hybridmoduls bei Teilsystemen mit Übernahmevariation) erweitert. Die Validierung der Methode durch die Modellnutzung besteht aus drei aufeinander aufbauenden Untersuchungen: einem

⁴³⁸ Siehe Kapitel 2.1

Impact Model⁴³⁹, das die relevanten Einflussgrößen der Untersuchungsumgebung abbildet, einem **Experteninterview** zur Potenzialeinschätzung der SysML-Modelle und schließlich einem umfangreichen **Praxistest**. Unter Einbindung der Entwickler im Unternehmen soll geprüft werden, ob die Ziele der Methode erreicht werden. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion und einem Zwischenfazit (Kapitel 5.5).

⁴³⁹ Das Impact Model ist ein Baustein aus der Forschungsmethodik Design Research Methodology (DRM) von BLESSING und CHAKRABARTI. Es dient dazu, die Einflussgrößen und Wechselwirkungen einer Forschungsumgebung in einem Modell darzustellen. Zusätzlich können diejenigen Einflussgrößen im Impact Model bestimmt werden, bei denen durch die zu entwickelnde Methode Verbesserungen eintreten sollen. (Blessing & Chakrabarti 2009)

4 Modellierung von Baukasten-Zielsystemen

Dieser Teil der Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Methode zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen und ihrem darauffolgenden Einsatz in der Serienentwicklung von Hybridantrieben. Der Kern der Methode ist die Erstellung eines Referenzmodells von Baukasten-Zielsystemen, aus dem projektspezifische Baukasten-Zielsysteme für verschiedene Serienentwicklungsprojekte abgeleitet werden können.

4.1 Ziele der Methode

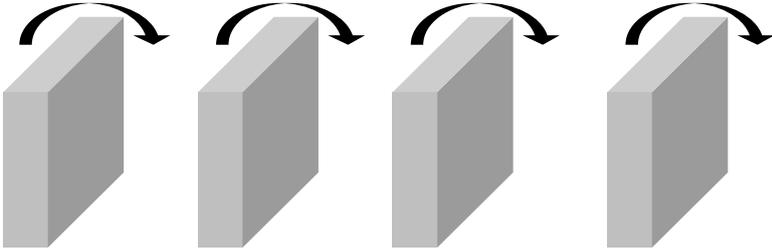
Im Rahmen der Zielbildung der Modellierungsmethode werden in diesem Kapitel **Herausforderungen und Probleme** herausgearbeitet, die im Kontext von Baukasten-Zielsystemen auftreten können. Die Modellierungsmethode setzt sich aus mehreren Lösungsansätzen zusammen, die jeweils einer oder mehreren Herausforderungen entgegentreten sollen. Die Methode ist also als ein Maßnahmenbündel zu verstehen. Die Herausforderungen bei der Arbeit mit Baukasten-Zielsystemen lassen sich in zwei Bereiche einteilen. Zum einen gehören die bereits vorgestellten **Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung**⁴⁴⁰ dazu, denn sie prägen das Anforderungsmanagement für Baukästen erheblich⁴⁴¹: So resultiert aus der **inhaltlichen Abhängigkeit** der Fahrzeugentwicklungen, dass nicht nur die Relationen des Zielsystems einer konventionellen Entwicklung erfasst werden müssen, sondern auch alle Verknüpfungen, die aufgrund der Baukastenentwicklung auftreten. Der **Zeitversatz** der Fahrzeugentwicklungen erfordert zusätzlich eine differenzierte Darstellung der Unsicherheiten, die maßgeblich aus dem großen zeitlichen Abstand zwischen dem Beginn der Baukastenentwicklung und dem Einsatz des letzten Baukasten-Nutzers resultieren. Weil die hier entwickelte Methode diese Termine nicht beeinflussen kann, ist die Beseitigung der Unsicherheit kaum möglich. Vielmehr gilt es, die Explikation, also das Sichtbarwerden, der vorhandenen Unsicherheit zu ermöglichen, um damit den Entwickler beim Ergreifen von Maßnahmen zur Verringerung der Unsicherheit zu unterstützen.

Zum anderen bestehen vier als wesentlich identifizierte **Kern-Herausforderungen des Anforderungsmanagements**, für die geeignete Lösungsansätze gefunden werden sollen (Abbildung 4.1). Diese Kern-Herausforderungen wurden im Rahmen

⁴⁴⁰ Siehe Kapitel 2.3.3

⁴⁴¹ Siehe Kapitel 2.4.4

einer **teilnehmenden Studie** ermittelt sowie durch die Ergebnisse einer begleitenden **Literaturrecherche**⁴⁴² untermauert⁴⁴³. Sie werden im Folgenden erläutert.



Herausforderung Z, A & R*...	Zielsystem unvollständig	Zielsystem manchen unbekannt	Mangelnde TA+ des Zielsystems	Zielsystem unsicherheitsbehaftet
vollständig	Nein	Ja	Ja	Ja
allen bekannt	Nein	Nein	Ja	Ja
richtig verstanden	Nein	Nein	Nein	Ja
gilt als sicher	Nein	Nein	Nein	Nein

*Ziele, Anforderungen & Randbedingungen; +Tragweitenanalyse

Abbildung 4.1: Kern-Herausforderungen im Anforderungsmanagement

Zielsystem ist unvollständig: Das Zielsystem ist lückenhaft, d. h. wesentliche Ziele, Anforderungen und Randbedingungen fehlen. Je komplexer das zu entwickelnde System ist, desto schwieriger wird es selbst in interdisziplinären Entwicklungsteams, sämtliche relevanten Themen zu erkennen und im Zielsystem zu verankern.

Zielsystem ist manchen Projektbeteiligten unbekannt: Aufgrund der zunehmend interdisziplinären Systementwicklung, Netzwerken aus Fahrzeugherstellern und Lieferanten sowie der Produktentwicklung an weltweit verteilten Standorten besteht die Herausforderung, alle Projektbeteiligten stets über die aktuell geltenden Ziele, Anforderungen und Randbedingungen zu informieren.

Mangelnde Tragweitenanalyse des Zielsystems: Durch die hohe Komplexität der zu entwickelnden Produkte wird es zunehmend schwierig, die Wechselwirkungen zwischen Zielen, Anforderungen und Randbedingungen so weit nachzuvollziehen und zu bewerten, dass deren Auswirkungen sicher erkannt werden.

Zielsystem ist unsicherheitsbehaftet: Das dynamische Umfeld der Produktentwicklung ist stets geprägt von Wissens- und Definitionslücken sowie von

⁴⁴² Siehe Kapitel 2.4

⁴⁴³ Die teilnehmende Studie eignet sich als Untersuchungsform besonders, um ungefilterte Einblicke und Erfahrungen aus der industriellen Praxis zu sammeln, da der Forscher zugleich auch Mitglied des Entwicklerteams ist (Marxen 2015).

sich ändernden Rahmenbedingungen, was die Unsicherheit von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen zur Folge hat.

Die Herausforderungen sind in Abbildung 4.1 als Barrieren oder Hürden dargestellt, um auszudrücken, dass jede dieser Herausforderungen überwunden werden muss, damit aus Zielen, Anforderungen und Randbedingungen die richtigen Entwicklungsaktivitäten für ein erfolgreiches Produkt abgeleitet werden können. Die Tabelle darunter soll die **kaskadenartige Struktur** zum Ausdruck bringen: In der Regel müssen zunächst die Herausforderungen auf der linken Seite gemeistert werden, bevor die Herausforderungen weiter rechts angegangen werden können. Erst wenn beispielsweise eine Anforderung im Zielsystem vorhanden ist, kann sie dem Entwickler bekannt sein, und erst hiernach kann er eine Tragweitenanalyse durchführen. Gleichwohl sei an dieser Stelle betont, dass die Erstellung eines Zielsystems ein **iterativer Prozess** ist. Die Barrieren in Abbildung 4.1 sollen also keineswegs bedeuten, dass das Zielsystem beispielsweise erst allen Projektbeteiligten bekanntgegeben wird, wenn es komplett vollständig ist.

Die vier genannten Herausforderungen können nicht nur im Anforderungsmanagement der Baukastenentwicklung, sondern auch in allen anderen Produktentwicklungen auftreten. Allerdings sind sie in der Baukastenentwicklung **besonders stark ausgeprägt**:

- Durch die **erhöhte Anzahl an Produkten**, in denen dasselbe technische System zum Einsatz kommt, steigt das Risiko, dass Ziele, Anforderungen und Randbedingungen übersehen werden.
- Durch die **erhöhte Anzahl an Beteiligten** in der Baukastenentwicklung steigt das Risiko, dass nicht immer alle Entwickler über das aktuell gültige Zielsystem im Bilde sind.
- Durch die **Komplexität der Baukastenentwicklung** steigt das Risiko, dass nicht immer die Tragweite sämtlicher Wechselwirkungen im Baukasten-Zielsystem sicher erkannt werden.
- Durch den **Zeitversatz der Nutzer des Baukastens** wird die Unsicherheit im Baukasten-Zielsystem vergrößert.

Die Methode mit ihren Lösungsansätzen soll also für bessere Vollständigkeit, Bekanntheit und Verständlichkeit des Baukasten-Zielsystems sorgen. Zudem soll die Unsicherheit der Ziele expliziert werden können. Überdies soll der Entwickler in der Lage sein, ein **Referenzmodell** des Baukasten-Zielsystems zu erstellen. Dieses Referenzmodell kann im Anschluss eingesetzt werden, um projektspezifische Baukasten-Zielsystemmodelle abzuleiten. Dabei soll zur Arbeitserleichterung ein möglichst großer Anteil der Zielsystem-Elemente **wiederverwendbar** sein.

Neben der Steigerung der Entwicklungsqualität soll die Methode dem Entwickler auch eine Arbeitserleichterung verschaffen. Deswegen soll ein **menschzentrierter MBSE-Ansatz** eingesetzt werden, der einerseits in der Lage ist, die Komplexität des Baukasten-Zielsystems besser handhabbar zu machen, und andererseits gut anwendbar bleibt, um eine hohe Praxistauglichkeit und Akzeptanz beim Entwickler zu erzielen. Als Hauptanwendungsgebiet ist die interdisziplinäre **Serienentwicklung von Systembaukästen in der Automobilindustrie** vorgesehen. Eine Übertragbarkeit der Anwendung in anderen Branchen soll jedoch nicht ausgeschlossen sein.

4.2 Validierung der Methoden-Ziele

Um das Vorhandensein der soeben vorgestellten Kern-Herausforderungen im Baukasten-Anforderungsmanagement (Abbildung 4.1) zu validieren, wurde eine **Befragung von Entwicklern** durchgeführt⁴⁴⁴. Der Fragebogen wurde von 30 Entwicklern eines deutschen Automobilherstellers ausgefüllt, die vornehmlich in der Serienentwicklung von Hybridfahrzeugen tätig sind. Auch Entwickler der Vorentwicklung und der Getriebeentwicklung wurden befragt. Alle hatten bereits Erfahrungen in der Baukastenentwicklung. Sie setzten sich aus Systementwicklern, Konstrukteuren, Validierungsingenieuren, Teamleitern und Projektmanagern zusammen. In Gruppen zu je drei bis fünf Personen wurden sie zu einem Termin zum Ausfüllen des Fragebogens eingeladen. Dabei wurde besonderer Wert auf die Klärung aller Fachbegriffe und Verständnisfragen gelegt⁴⁴⁵. Im Anschluss konnten die Entwickler in einer Diskussion von eigenen Erfahrungen und Verbesserungsvorschlägen zum Anforderungsmanagement berichten. Sie wurden als Anregungen für die Methodenentwicklung aufgenommen. Der Fragebogen wurde anonym ausgewertet und durch eine Pilotbefragung abgesichert⁴⁴⁶.

Der Inhalt des Fragebogens⁴⁴⁷ gliedert sich in zwei Teile: Der **erste Teil stellt Fragen zu Komplexitätstreibern** im Entwicklungsumfeld von Hybridtriebsträngen und Baukästen. Neben Fragen zum Vorhandensein der Komplexität in der Entwicklung von Hybridtriebsträngen und Baukästen werden die Ursachen hierfür abgefragt. Die Entwicklung von **Hybridtriebsträngen** und **Baukästen** als **Komplexitätstreiber**

⁴⁴⁴ Die Durchführung und Auswertung der Umfrage erfolgte im Rahmen der Abschlussarbeit von BRANDT (Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit).

⁴⁴⁵ Mit diesem Vorgehen konnte ein Nachteil des Fragebogens als Methode zur Erhebung empirischer Daten, nämlich das Auftreten von Missverständnissen, abgemildert werden (Marxen 2014).

⁴⁴⁶ Die Pilotbefragung und -auswertung kann verhindern, dass wichtige Fragestellungen erst nach Durchführung der Studie entdeckt werden (Marxen 2014).

⁴⁴⁷ Siehe Anhang B

kann bestätigt werden, denn von über 96 % bzw. 76 % der Befragten wird sie als sehr komplex bis sehr stark komplex eingestuft (Abbildung 4.2).

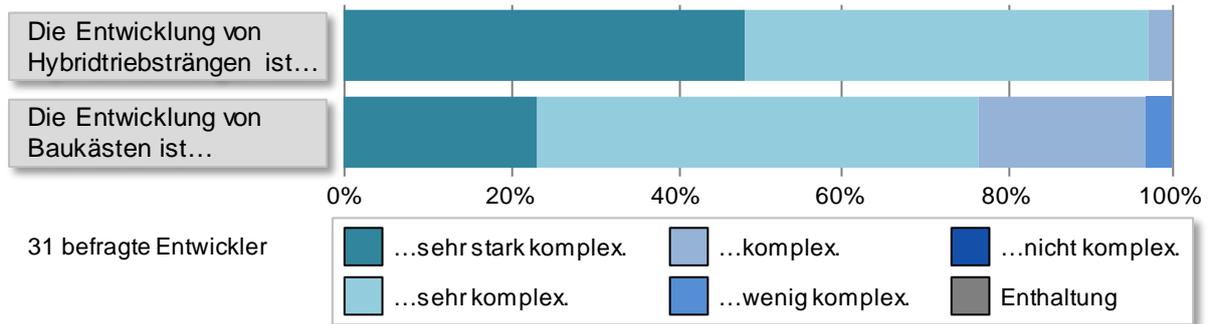


Abbildung 4.2: Komplexität der Entwicklung von Hybridtriebsträngen und Baukästen

Als Hauptursachen dafür werden im Fall der Hybridtriebstränge die erhöhte Anzahl an Funktionen, Teilsystemen und Schnittstellen gesehen, aber auch die angespannte Bauraumsituation und die Beteiligung vieler verschiedener Fachdisziplinen führt nach Ansicht der Befragten zu Komplexität (Anhang B, Abbildung 8.2). In der Baukastenentwicklung werden u. a. die **inhaltliche Abhängigkeit** und der **Zeitversatz** der Entwicklungsprojekte sowie die hohe Anzahl an Beteiligten als Hauptgründe für die Komplexität bestätigt (Anhang B, Abbildung 8.3). Weiterhin wird auch die Varianz der Module innerhalb eines Baukastens als Ursache gesehen.

Der **zweite Teil** des Fragebogens enthält Fragen rund um die vorgestellten **Herausforderungen im Anforderungsmanagement**. Dazu werden zu jedem der vier Herausforderungen die folgenden Aussagen bewertet:

1. „Die Herausforderung **ist** nach Meinung der Entwickler **relevant** für eine erfolgreiche Baukastenentwicklung.“ (Abfrage, ob die Herausforderung nach Einschätzung der Entwickler vorhanden ist)
2. „Die Entwickler sind in ihrer Arbeit **häufig mit der Herausforderung beschäftigt**.“ (Abfrage, ob die Entwickler von der Herausforderung persönlich betroffen sind)
3. „**Eine Methode** die dabei hilft, die Herausforderung zu meistern, **verbessert die Baukastenentwicklung**.“
4. „**Eine Methode** die hilft, die Herausforderung zu meistern, **erleichtert meine Arbeit in der Baukastenentwicklung**.“

Aus diesen vier Aussagen zu jeder der vier Kern-Herausforderungen im Anforderungsmanagement ergeben sich 16 Fragen, die zum einen die Existenz der Herausforderungen und zum anderen die Meinung der Entwickler zur methodischen

Adressierung dieser Herausforderungen hervortreten lassen. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Fragen vorgestellt⁴⁴⁸.

Die **Relevanz** der vier Herausforderungen im Anforderungsmanagement für die Baukastenentwicklung (Frage 1) wird von durchschnittlich 90 % der Befragten als zutreffend oder voll und ganz zutreffend bestätigt (Anhang B, Abbildung 8.4). Zusätzlich geben durchschnittlich ca. 60 % der Entwickler an, dass sie in ihrer Arbeit von den vier Kern-Herausforderungen im Anforderungsmanagement **betroffen** sind (Frage 2, Abbildung 4.3).

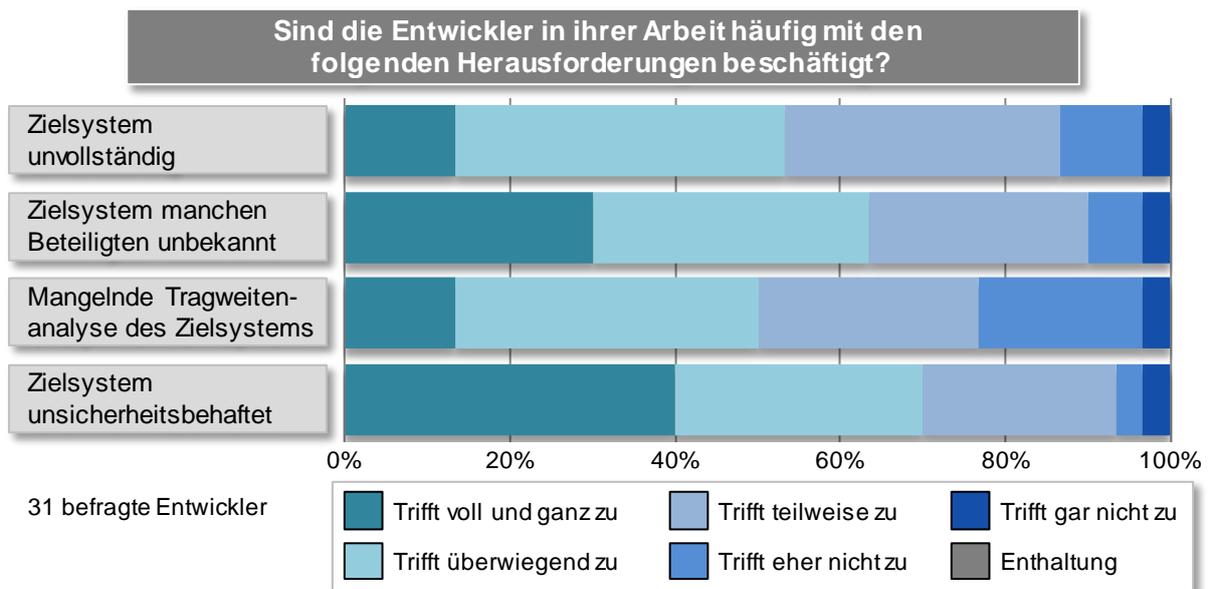


Abbildung 4.3: Relevanz der Kern-Herausforderungen in der Arbeit der Entwickler⁴⁴⁹

Von den befragten Entwicklern geben durchschnittlich ca. 86 % an, dass die Baukastenentwicklung **durch methodische Unterstützung** des Anforderungsmanagements **verbessert** werden könnte (Frage 3, Anhang B, Abbildung 8.6). Noch deutlicher wird der Bedarf an Methoden im Anforderungsmanagement anhand der Umfrageergebnisse von Frage 4: In durchschnittlich 70 % der Fälle geben die Entwickler an, **dass Methoden** zum Umgang mit Zielen, Anforderungen und Randbedingungen **ihre Arbeit** in der Baukastenentwicklung **erleichtern könnten** (Abbildung 4.4).

⁴⁴⁸ Aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit und aus Platzgründen werden nur für die Fragen 2 und 4 die zugehörigen Abbildungen gezeigt. Alle übrigen Auswertungen des Fragebogens befinden sich im Anhang B.

⁴⁴⁹ Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit

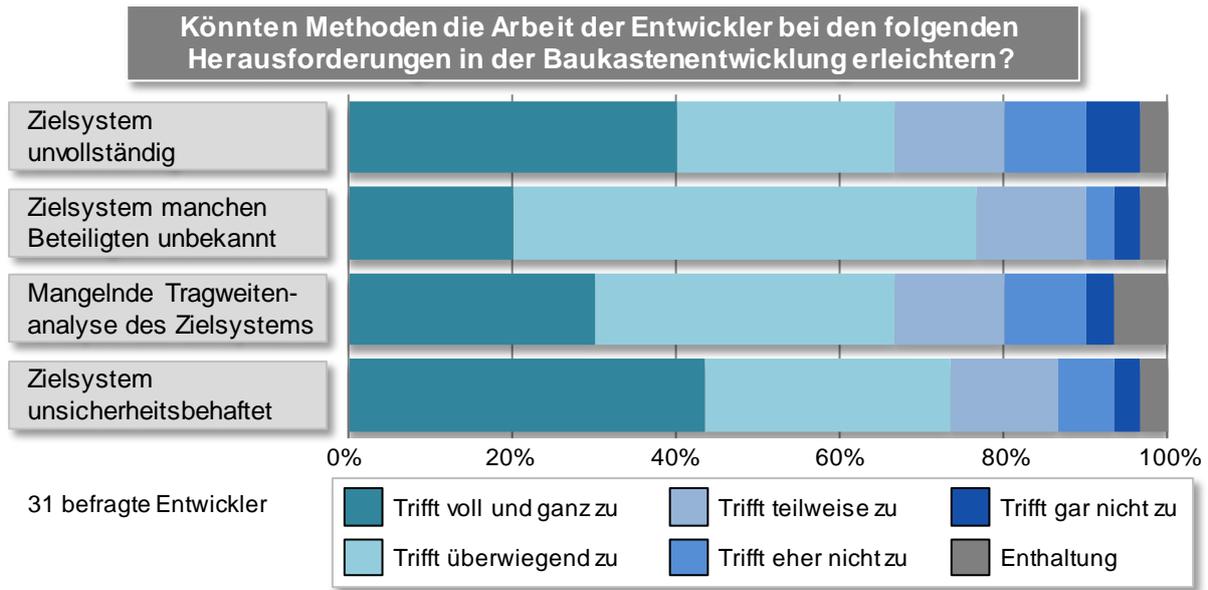


Abbildung 4.4: Wunsch nach methodischer Unterstützung⁴⁵⁰

Es handelt sich bei den Befragten um ein interdisziplinäres Entwicklerteam (siehe oben) und nicht ausschließlich um Entwickler, die täglich mit dem Verfassen und Verwalten von Anforderungen, Zielen und Randbedingungen beschäftigt sind. Trotzdem geht aus den Ergebnissen hervor, dass die Auswirkungen des Anforderungsmanagements für den größten Teil der Befragten spürbar ist (vgl. Abbildung 4.3). Damit wird **der große Einfluss**, den das Anforderungsmanagement auf die gesamte Entwicklung hat, nochmals **unterstrichen**.

Als Zusammenfassung der Umfrage lässt sich festhalten, dass die **Baukasten- und Hybridfahrzeug-Entwicklung** als **komplex** wahrgenommen wird. Außerdem konnte die Relevanz der vier Herausforderungen sowie der **Wunsch nach methodischer Unterstützung** im Anforderungsmanagement der Baukastenentwicklung bestätigt werden. Somit sind die Kernziele der Methode zur Modellierung von Zielsystemen in der Baukastenentwicklung bestätigt worden. Das nächste Kapitel beschreibt die Erarbeitung dieser Modellierungsmethode.

4.3 Modellierungsmethode

Als Antwort auf die Forschungsfrage 1.1 werden in diesem Kapitel die Lösungsansätze zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen vorgestellt, die die Kern-Herausforderungen im Anforderungsmanagement⁴⁵¹ sowie die

⁴⁵⁰ Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit

⁴⁵¹ Siehe Kapitel 4.1

Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung⁴⁵² adressieren sollen. Die Methode setzt sich also aus einem **Bündel an Maßnahmen** zusammen. Dabei ist sie zunächst tool- und unternehmensneutral. Ihre Implementierung und Anwendung für die Serienentwicklung von Hybridantriebs-Baukästen erfolgt in Kapitel 4.4.

In Abbildung 4.5 sind die eingesetzten Lösungsansätze aufgelistet und den Herausforderungen des Anforderungsmanagements zugeordnet. Wie zu sehen ist, werden sämtliche Herausforderungen von mehreren Lösungsansätzen adressiert. Die folgenden Unterkapitel stellen die Lösungsansätze im Einzelnen vor.

Lösungsansatz \ Herausforderung	Zielsystem unvollständig	Zielsystem manchen unbekannt	Mangelnde TA* des Zielsystems	Zielsystem unsicherheits-behaftet
Baukastengerechte Struktur	X	X	X	X
Modellierung Zielsystem	X	X	X	
Referenzmodell	X			
Explikation Unsicherheit				X
Anwendungsfallanalyse mit SPALTEN	X		X	
Checklisten & Vorlagen	X			
(Formulierungs)-Leitfäden			X	

*Tragweitenanalyse

Abbildung 4.5: Lösungsansätze zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen

4.3.1 Baukastengerechte Struktur

Die Untersuchungsergebnisse von EBEL haben gezeigt, dass eine **hierarchische Struktur** des Zielsystems und seiner Partialmodelle eine hohe Akzeptanz bewirkt⁴⁵³. Außerdem ist eine hierarchische Struktur die Grundlage für die Ableitung des in der Industrie immer noch verbreiteten Lastenhefts (auf Basis einer Momentaufnahme des Zielsystem-Modells)⁴⁵⁴. Eine solche Struktur ist zudem eingängig und ist der Struktur des dokumentenbasierten Anforderungsmanagements sehr ähnlich, was dem Entwickler die Umstellung auf den MBSE-Ansatz erleichtern kann. Deswegen wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls eine hierarchische Struktur des Baukasten-Zielsystemmodells verwendet. Als Ordnungskriterium für die Struktur kann u. a. eine Einteilung gemäß der Themengebiete (z. B. mechanische Festigkeit, Kühlung, Schmierung, Werkstoffe, Recycling) oder eine Einteilung gemäß den Subsystemen

⁴⁵² Siehe Kapitel 2.3.3

⁴⁵³ Ebel 2015

⁴⁵⁴ Siehe Kapitel 2.4.3

des technischen Systems (z. B. E-Maschine, Gehäuse, Trennkupplungssystem) gewählt werden. Eine Festlegung auf ein Ordnungskriterium soll im Rahmen der hier entwickelten Methode nicht erfolgen, um die Auswahl erst im Zuge der Anwendung bei der Entwicklung eines spezifischen Baukastens zu ermöglichen. Die einzige Festlegung an dieser Stelle sieht vor, dass Anforderungen und alle anderen Elementtypen stets demjenigen Ziel hierarchisch untergeordnet sind, aus dem sie konkretisierend abgeleitet werden⁴⁵⁵.

Im Folgenden werden aus den Charakteristika der Baukastenentwicklung die erforderlichen Eigenschaften für die Modellierung eines Baukasten-Zielsystems abgeleitet. Dazu werden (korrespondierend zu Forschungsfrage 1.2) die beiden Komplexitätstreiber **inhaltliche Abhängigkeit** und **Zeitversatz** zwischen den Entwicklungen der Baukasten-Nutzer⁴⁵⁶ aufgegriffen. Zunächst werden alle Zielsysteme, die in der Baukastenentwicklung eine Rolle spielen, mitsamt ihren Relationen analysiert, um in einem zweiten Schritt Aufbau und Eigenschaften des Baukasten-Zielsystemmodells festzulegen. Die Abbildung 4.6 zeigt dazu sämtliche Verbindungen von Zielsystemen, die auftreten können⁴⁵⁷. Grundlage für die folgenden Betrachtungen ist die oben vorgestellte Systematik der Systembaukästen (hier exemplarisch Hybridantriebs- und Getriebekonstruktionen), die die Module und Bausteine zur Konfiguration der unterschiedlichen Fahrzeuge (hier exemplarisch Sportwagen und SUV) bereitstellen.

Bereits die konventionelle Entwicklung eines einzelnen Fahrzeugs gilt aufgrund der hohen Anzahl an funktionalen und baulichen Beziehungen als komplex⁴⁵⁸. Diese Beziehungen spiegeln sich auch in der Vernetzung der Zielsysteme der benachbarten Module innerhalb eines Fahrzeugs wider (Verbindungen A & B). Jedes Modul-Zielsystem ist außerdem mit dem hierarchisch übergeordneten Zielsystem des Gesamtfahrzeugs verknüpft (Verbindungen C & D) und ist so mit den Zielen und Anforderungen verbunden, die das Gesamtfahrzeug erfüllen muss (z. B. Höchstgeschwindigkeit oder Steigfähigkeit).

⁴⁵⁵ Hängt ein Zielsystem-Element von mehreren Zielen ab, so kann dies mit einer Querbeziehung abgebildet werden. So resultiert z. B. die Leistung der E-Maschine zum einen aus dem Ziel der Kraftstoffersparnis und zum anderen aus dem Ziel eines möglichst ausgeprägten elektrischen Fahrerlebnisses.

⁴⁵⁶ Siehe Kapitel 2.3.3

⁴⁵⁷ In Abbildung 4.6 sind die zahlreichen Verknüpfungen der jeweiligen Handlungs- und Objektsysteme zwecks besserer Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

⁴⁵⁸ Mayer-Bachmann 2007

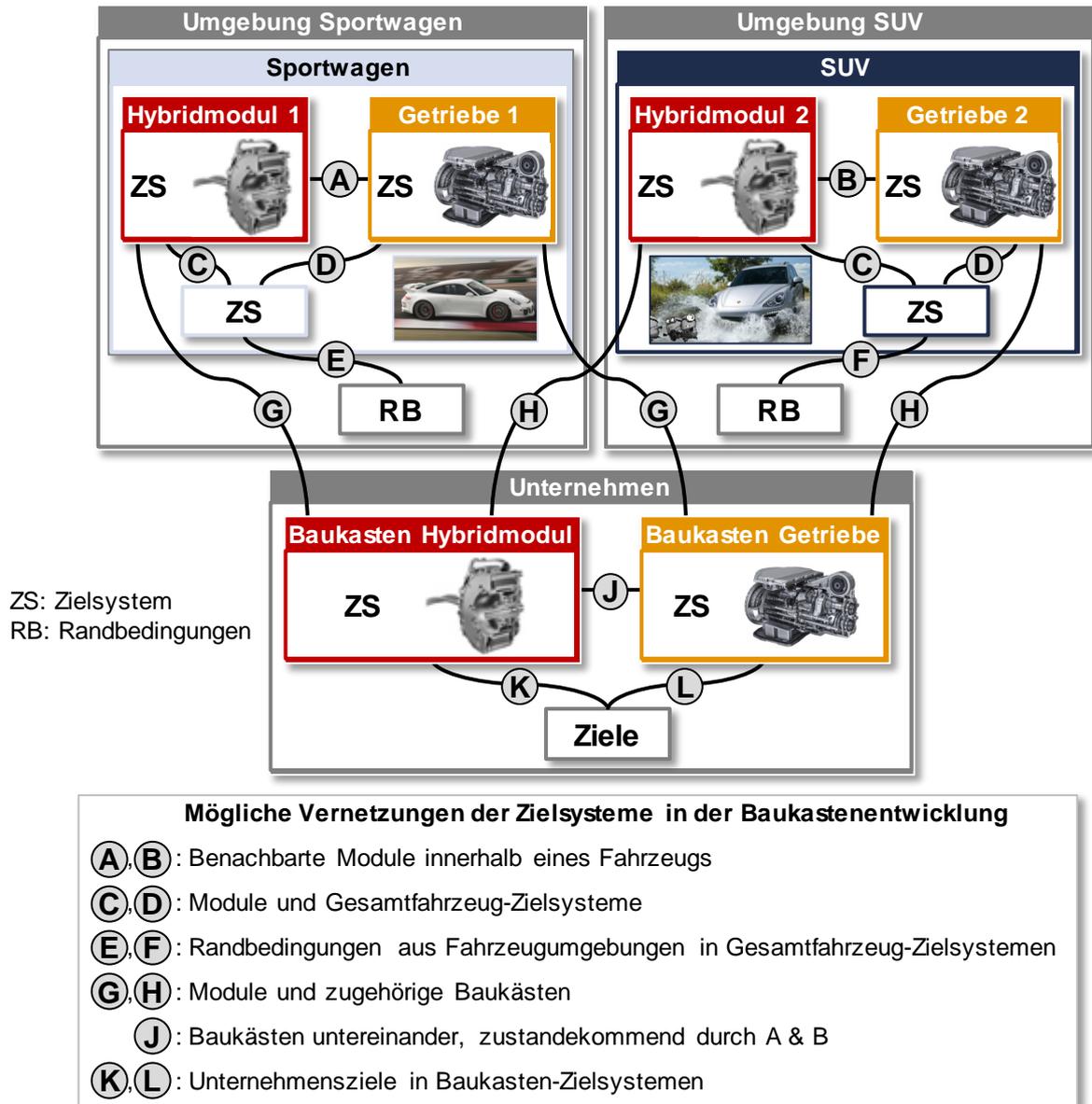


Abbildung 4.6: Vernetzungen der Zielsysteme in der Baukastenentwicklung

Jedes Fahrzeug ist gemäß der Systemtechnik wiederum eingebettet in seine Umgebung⁴⁵⁹ (Verbindung E & F), aus der insbesondere Randbedingungen entspringen (z. B. klimatische Bedingungen, Fahrgewohnheiten, Verkehrsverhältnisse in den Zielmärkten). Die Umgebungen der Fahrzeuge weisen teils Gemeinsamkeiten auf (z. B. Randbedingungen wie Abgas- und Crashgesetzgebungen), sind aber an anderen Stellen sehr unterschiedlich (z. B. Rennstrecken beim Sportwagen, Offroad-Strecken beim SUV). Diese Unterschiede

⁴⁵⁹ Die Systemebenen Fahrer & Fahrzeug, Verkehr & Infrastruktur und Umwelt & Gesellschaft (vgl. Abbildung 2.5) wurden vereinfachend zur Produktumgebung zusammengefasst.

schlagen sich natürlich auf die Fahrzeug- und letztlich auf die Modul-Zielsysteme nieder.

Werden die unterschiedlichen Fahrzeuge nun durch die Kombination von Modulen und Bausteinen aus mehreren Systembaukästen konfiguriert, stoßen die baukastenspezifischen Relationen zu den bereits bestehenden hinzu: Jedes Modul gibt seine Ziele, Anforderungen und Randbedingungen an das Zielsystem seines Baukastens (Verbindungen G & H) weiter. Das Baukasten-Zielsystem setzt sich also zusammen aus den Zielsystemen seiner Module. Hierbei gibt es sowohl Ziele, Anforderungen und Randbedingungen, die für alle Module eines Baukastens gleich sind, als auch solche Fälle, in denen Elemente des Baukasten-Zielsystems aufgrund der Verschiedenartigkeit seiner Module unterschiedliche Ausprägungen annehmen können (z. B. E-Maschinen-Leistung des Sportwagen-Hybridmoduls = 100 kW, die des SUV-Hybridmoduls = 80 kW). Solche mehrfachen Ausprägungen, die gemeinsam eine Wertespanne für die betroffene Baukasten-Anforderung bilden, sind typisch für die Baukastenentwicklung. Dieser Sachverhalt soll im weiteren Verlauf als **Varianz der Baukasten-Ziele** bezeichnet werden (vgl. Abbildung 4.7).

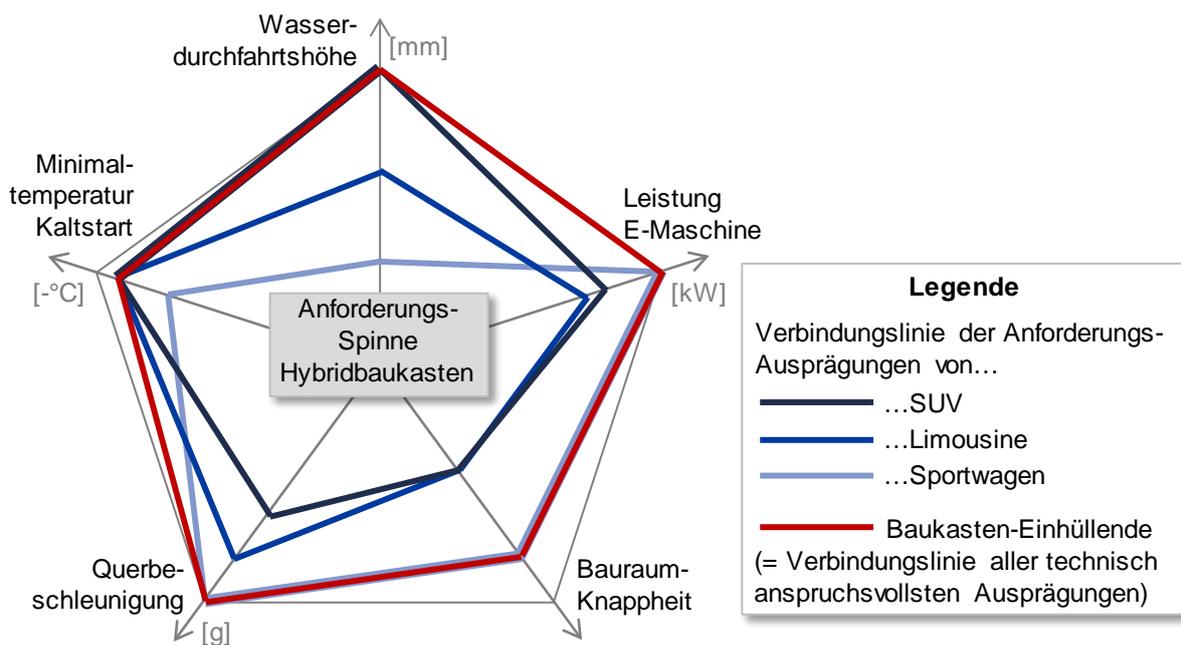


Abbildung 4.7: Varianz und Einhüllende des Baukasten-Zielsystems⁴⁶⁰

Die restlichen baukastenspezifischen Verknüpfungen der Zielsysteme sind erstens die Vernetzung der Systembaukästen (Verknüpfung J, zustandekommend durch

⁴⁶⁰ Die aufgeführten Maximalanforderungen werden zwar alle an den Hybridbaukasten gestellt und somit im Zielsystem aufgeführt, müssen aber im späteren Fahrzeuggebrauch nicht immer gleichzeitig auftreten. Beispielsweise ist der Rundstreckenbetrieb bei gleichzeitiger Wasserdurchfahrt eher unwahrscheinlich.

Schnittstellen A & B der Module im Fahrzeug) und zweitens die Unternehmensziele, die im Baukasten-Zielsystem verankert werden (Verknüpfungen K & L, z. B. geplante Baukasten-Nutzer, Kosten- & Terminziele).

Für die Methode lässt sich also folgern, dass sie alle in Abbildung 4.6 gezeigten Verknüpfungen und Relationen zwischen den Zielsystemen modellierbar machen muss, um Zielsysteme von Baukästen abbilden zu können. Ferner muss sie ermöglichen, jedem Ziel, jeder Anforderung und Randbedingung ihre unterschiedlichen Ausprägungen zuzuordnen (Abbildung 4.8). Dabei muss der Bezug zwischen dem Baukasten-Nutzer und den Anforderungen, die er zum Baukasten-Zielsystem beisteuert, stets erhalten bleiben, damit keine Zusammenhänge verloren gehen, die das Verständnis bzgl. des Zielsystems fördern.

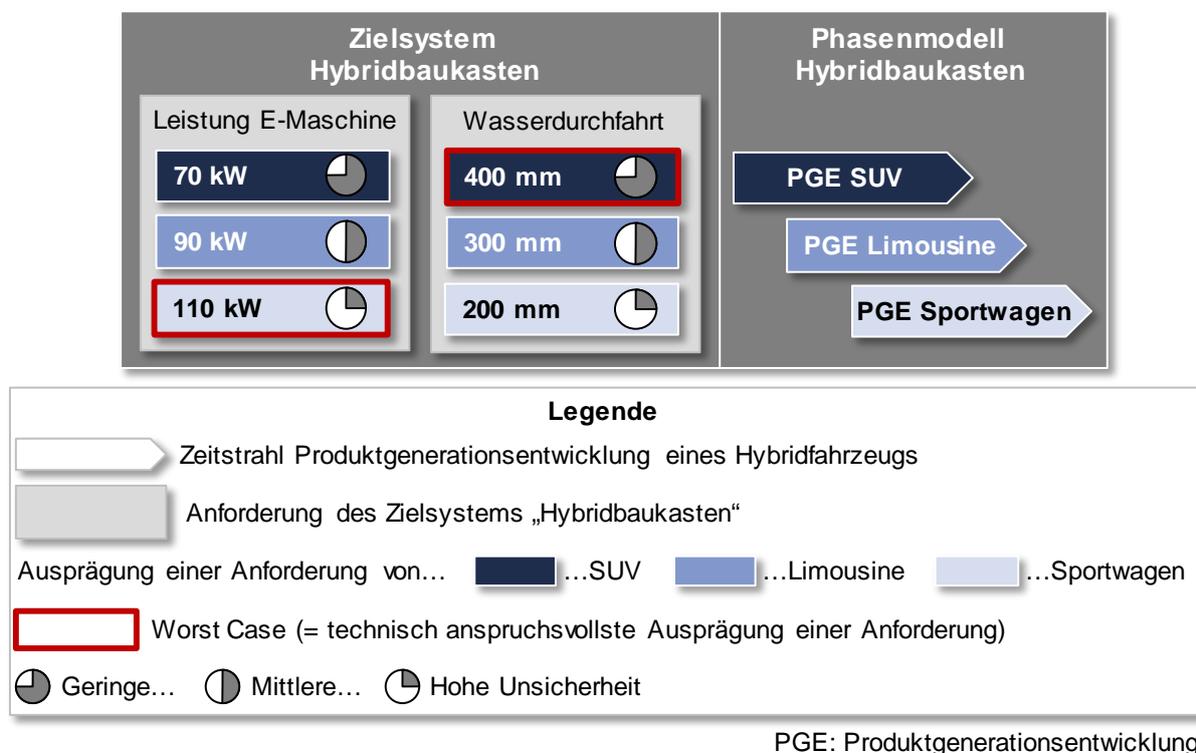


Abbildung 4.8: Baukastengerechte Zielsystemmodellierung mit Varianz und Unsicherheit

Ein weiterer Blick auf die Varianz der Baukasten-Ziele konkretisiert die Methode in dieser Hinsicht weiter: Ein wesentlicher Punkt ist die Ermittlung und Kennzeichnung all derjenigen Ausprägungen, die den **technisch anspruchsvollsten Wert** (oft bezeichnet als der **Worst Case**) einer Anforderung darstellen. Diese Worst Cases stammen nicht immer vom selben Baukasten-Nutzer, sondern müssen für jede Anforderung separat identifiziert werden (rote Rahmen in Abbildung 4.8): Beispielsweise besitzt der SUV im Fall der Wasserdurchfahrt die anspruchsvollste Ausprägung, wogegen der Sportwagen die höchste E-Maschinen-Leistung fordert. Die Gesamtheit dieser Worst Cases bildet die sogenannte **Einhüllende der**

Baukasten-Ziele (rote Kurve in Abbildung 4.7). Sie ist ein Hilfsmittel, um bereits früh Aktivitäten, insbesondere die Validierung, effizient zu planen.

Als letzter Aspekt soll die Berücksichtigung der **Unsicherheit im Baukasten-Zielsystem** beleuchtet werden. Die Entwicklungen der einzelnen Baukasten-Nutzer (also der Fahrzeuge) finden teilweise um mehrere Jahre zeitversetzt statt (angedeutet durch die Zeitstrahle in Abbildung 4.8). Somit sind häufig diejenigen Ziele, Anforderungen und Randbedingungen des Baukasten-Zielsystems, die mit dem spät einsetzenden Baukasten-Nutzer korrespondieren, mit größerer Unsicherheit behaftet als die der früh entwickelten Baukasten-Nutzer. Es reicht also nicht aus, pro Anforderung einen Unsicherheitswert zu vergeben; vielmehr soll die Explikation der Unsicherheit für jede fahrzeugspezifische Ausprägung innerhalb einer Wertespanne separat vergeben werden können (in Abbildung 4.8 durch die Kreise angedeutet).

4.3.2 Modellierung des Zielsystems

Die Einführung des MBSE-Ansatzes im Anforderungsmanagement von Baukästen kann in zwei wesentliche Eckpfeiler aufgeteilt werden: Zum einen wird das **Grundverständnis des Systems Engineering** eingeführt, also die Denkweise der Systemtechnik im Umgang mit Zielen, Anforderungen und Randbedingungen. Zum anderen werden die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen durch ein **Modell des Zielsystems** abgebildet, das aus Elementen und Relationen besteht. Im ersten Teil dieses Kapitels soll gezeigt werden, wie die Denkweise des Systems Engineering bei der Erstellung und Handhabung des Baukasten-Zielsystems helfen kann. Danach werden die zur Modellbildung verwendeten Element- und Relationstypen vorgestellt.

Die Denkweise der **Systemtechnik** wird in der hier vorgestellten Methode durch sprachliche Regelungen der Anforderungs-Texte gefördert: So wird das Hybridmodul⁴⁶¹ stets als das zu entwickelnde System bezeichnet, das aus Subsystemen (u. a. Gehäuse, E-Maschine) besteht, Bestandteil eines Supersystems (das Gesamtfahrzeug) ist und von Nachbarsystemen (z. B. Getriebe, Teile der Karosserie) umgeben ist⁴⁶². Erstens wird auf diese Weise die **Betrachtung** des zu entwickelnden Systems **auf verschiedenen Systemebenen** gefördert, was besonders benötigt wird beim Erkennen von Anforderungen, die das Supersystem betreffen (z. B. akustische Phänomene und Steifigkeit des Gesamttriebstrangs, Crash-Verhalten des Fahrzeugs). Zweitens können die Entwickler beim **Erkennen**

⁴⁶¹ Siehe Kapitel 2.1

⁴⁶² Siehe Kapitel 2.3.1

von **Wechselwirkungen**, vor allem an Schnittstellen mit Nachbarsystemen, unterstützt werden, um so die Vollständigkeit des Zielsystems besser gewährleisten zu können⁴⁶³.

Das Erkennen von baulichen und funktionalen **Schnittstellen** als erster Schritt gewinnt aufgrund des Simultaneous-Engineering-Prozesses in der Fahrzeugentwicklung zusätzlich an Bedeutung, da das Nachbarsystem des Gesamtfahrzeugs meist nicht vom eigenen, sondern von einem anderen Entwicklerteam verantwortet wird. In einem zweiten Schritt ist also eine gründliche Abstimmung und **gemeinsame Tragweitenanalyse** der beiden Entwicklerteams erforderlich. Drittens können Ziele und Anforderungen (z. B. die thermische Belastung eines Bauteils) mithilfe der systemischen Denkweise differenzierter analysiert und auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden: Die thermische Belastung eines Bauteils kann durch seine Eigenerwärmung, seine unmittelbare Nähe zu heißen Nachbarsystemen oder durch die Temperatur der Fahrzeugumgebung (z. B. klimatische Bedingungen, Sonneneinstrahlung) verursacht werden. Solche Betrachtungen machen nicht nur den Inhalt eines Zielsystems präziser, sie **fördern** auch **das Systemverständnis** der Entwickler und können beim Durchdenken von möglichen Anwendungsfällen⁴⁶⁴ behilflich sein.

Da sich ein Zielsystemmodell stets aus unterschiedlichen **Elementtypen** zusammensetzt, ist ein Schema zur Unterteilung dieser Elemente erforderlich. Die Vergabe von Elementtypen ermöglicht die Filterung des Zielsystems nach bestimmten Typen. Als Grundlage zur Definition der Elementtypen der hier vorgestellten Methode dienen die Partialmodelle und Elementtypen nach ALBERS, KLINGLER und EBEL⁴⁶⁵. Aus diesen wurden die am häufigsten vorkommenden Typen ausgewählt und gemäß dem in Abbildung 4.9 dargestellten Schema eingeteilt, sodass für jedes Element sowohl die **Einteilung nach Herkunft** (Spalten) als auch die **Einteilung nach Inhalt** (Zeilen) möglich ist. Somit können fortan nicht nur Anforderungen, sondern auch Randbedingungen nach ihrem Inhalt (funktional, qualitativ, etc.) unterschieden werden. Die Elementtypen werden im Folgenden vorgestellt.

⁴⁶³ Laut Mayer-Bachmann besteht insbesondere bei Anforderungen an benachbarte oder übergeordnete Systeme Verbesserungspotenzial (Mayer-Bachmann 2007).

⁴⁶⁴ Siehe Kapitel 4.3.5

⁴⁶⁵ Albers, Klingler & Ebel 2013; Ebel 2015

Unterscheidung nach...		Funktionales Element	Qualitäts-Element	Organisations-Element	Test-Element	Deliverable-Element
...Inhalt	...Herkunft					
Anforderung						
Endogene Randbedingung						
Exogene Randbedingung						
Ziel						

Abbildung 4.9: Elementtypen mit Unterscheidung nach Herkunft und Inhalt

Zur Einteilung der Elementtypen nach ihrer Herkunft wird zwischen Zielen, Anforderungen und Randbedingungen unterschieden. Dabei wird eine **Anforderung** an das zu entwickelnde System stets von demjenigen Entwicklerteam eigenständig definiert und verantwortet, das das technische System entwickelt. Im Unterschied dazu stammen Randbedingungen von außerhalb des Verantwortungsbereichs des Entwicklerteams und können demzufolge nicht eigenständig definiert oder geändert werden. Diese Randbedingungen werden nach MUSCHIK⁴⁶⁶ weiter unterteilt: **Exogene Randbedingungen** stammen von außerhalb des Unternehmens (z. B. ISO- und DIN-Normen, Gesetze in Zielmärkten) und können vom Entwickler bzgl. Gültigkeit und Inhalt weder eigenständig definiert noch beeinflusst werden. Die **endogenen Randbedingungen** stammen aus dem eigenen Unternehmen und können beispielsweise eine Werknorm oder Ziele, Anforderungen und Randbedingungen des benachbarten Baukastens oder des Supersystems sein. Endogene Randbedingungen werden also nicht eigenständig definiert. Sie entziehen sich jedoch nicht ganz dem Einfluss des Entwicklers, d. h. unter Umständen kann er auf sie einwirken, beispielsweise im Rahmen eines Abstimmungstermins mit dem benachbarten Entwicklerteam oder durch Mitwirken bei der Überarbeitung einer Werknorm. Die hier vorgestellte Einteilung der Zielsystem-Elemente nach ihrer Herkunft verrät dem Betrachter also wichtige Angaben zur Beeinflussbarkeit⁴⁶⁷ der Elemente.

Die inhaltlichen Unterscheidungsmöglichkeiten von Anforderungen bzw. Randbedingungen folgt weitestgehend der Einteilung, die auch in der Literatur zu

⁴⁶⁶ Albers & Muschik 2010; Muschik 2011

⁴⁶⁷ In der Unterscheidung zwischen exogener und endogener Randbedingung findet sich auch Ebels Idee der generischen Beurteilungsdimension „Beeinflussbarkeit“ (siehe Kapitel 2.4.3) wieder.

finden ist⁴⁶⁸. Demnach beschreibt eine **funktionale** Anforderung bzw. Randbedingung eine vom zu entwickelnden System bereitzustellende Funktion⁴⁶⁹. Dagegen enthält die **Qualitäts**-Anforderung bzw. -Randbedingung Merkmale zur Qualität der geforderten Funktionen, beispielsweise Laufleistung, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit⁴⁷⁰. Die funktionale und die Qualitäts-Anforderung bzw. -Randbedingung spezifizieren messbare Merkmale und Eigenschaften des zu entwickelnden Systems, sie blicken also in Richtung Objektsystem. Laut SCHNEIDER enthält ein Zielsystem darüber hinaus auch Elemente, die den Entstehungsprozess an sich spezifizieren⁴⁷¹ und demnach Bezug nehmen auf das Handlungssystem der Entwicklung. Diese Beobachtung hat sich im Zuge der Modellierung von Baukasten-Zielsystemen bestätigt⁴⁷². Deswegen wird an dieser Stelle die **Organisations**-Anforderung bzw. -Randbedingung eingeführt, die Elemente der Partialmodelle Phasen, Aktivitäten, Meilensteine und Interessenvertreter nach EBEL⁴⁷³ in sich vereint. Eine Organisations-Anforderung bzw. -Randbedingung kann also folgende Inhalte spezifizieren und beschreiben:

- Entwicklungsaktivitäten und Arbeitsumfänge einschließlich zugehöriger Meilensteine und Termine (z. B. Prinzip- und Gestaltmodellierung mit Design Freeze, Herstellungszeitraum für Prototypenteile mit Lieferungstermin)
- Rollenverteilung und Jobsplit der Teammitglieder (z. B. zwischen Auftraggeber und -nehmer)
- Planung von Ressourcen (z. B. Prüfstandskapazitäten, Anzahl zu fertigender Prototypenteile)

Die Organisations-Anforderungen bzw. -Randbedingungen erheben dabei nicht den Anspruch, das Handlungssystem vollständig zu beschreiben. Vielmehr sollen gemachte Erfahrungen und gesammeltes Wissen aus vergangenen Entwicklungsprozessen und -aktivitäten im neuen Zielsystem festgehalten werden, um ihre Berücksichtigung im weiteren Verlauf der Entwicklung sicherzustellen.

Die beiden folgenden Zielsystem-Elementtypen beschäftigen sich ebenfalls mit Bestandteilen des Handlungssystems: Ein **Test** ermittelt bestimmte Eigenschaften des zu entwickelnden Systems und liefert somit Erkenntnisse darüber, ob die Ziele,

⁴⁶⁸ Siehe Kapitel 2.4.1

⁴⁶⁹ Pohl & Rupp 2011; Ebel 2015

⁴⁷⁰ Pohl & Rupp 2011

⁴⁷¹ Schneider 2012

⁴⁷² Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit

⁴⁷³ Ebel 2015

Anforderungen und Randbedingungen ganz, teilweise oder nicht erfüllt werden⁴⁷⁴. Häufig treten Tests im Kontext von exogenen und endogenen Randbedingungen (z. B. einzuhaltende Werknormen bzw. Gesetze) in Form von Prüfvorschriften auf, in denen Testfall, Testumgebung und Testinterpretation vorgeschrieben werden. Der Typ **Deliverable** dient als Indikator zur Messung des Projektfortschritts⁴⁷⁵ und kann somit als Arbeitsergebnis aufgefasst werden, das am Ende einer bestimmten Entwicklungsaktivität steht (z. B. ein eingefrorener Konstruktionsstand im CAD-System oder ein Berechnungsergebnis). Deliverables kommen in der Zielsystem-Modellierung häufig vor und treten gemeinsam mit dem Test häufig bei Zielen und Anforderungen mit einem geringen Reifegrad auf.

So kann beispielsweise das akustische Verhalten eines Hybridantriebs erst spät im Entwicklungsprozess in Prototypenfahrzeugen validiert werden. Deswegen können manche akustische Anforderungen zu Beginn der Entwicklung zunächst nur in Form von zu unterbietenden Grenzkurven vorgegeben werden. Als Ergänzung werden im Zielsystem jedoch früh im Entwicklungsprozess Validierungsmaßnahmen (also Tests) gefordert, mit deren Ergebnissen (also Deliverables) der Reifegrad der akustischen Anforderungen erhöht werden kann. Jüngere Forschungsarbeiten von ALBERS ET AL. zeigen anhand des akustischen Verhaltens von Hybridfahrzeugen, wie eine frühe Validierung mit physisch-virtuellen Prototypen mithilfe des IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatzes auch in solchen Fällen gelingen kann⁴⁷⁶.

Der Elementtyp **Ziel** als grundlegender Bestandteil eines Zielsystems wird gemäß der obenstehenden Definition⁴⁷⁷ verwendet. Zur Beibehaltung einer schlanken Methode werden Ziele nicht weiter nach Herkunft oder Inhalt unterteilt, da jedes Ziel ohnehin durch zugehörige Anforderungen und Randbedingungen konkretisiert werden muss. Die **Information** als der letzte Elementtyp der Modellierungstechnik (in Abbildung 4.9 nicht dargestellt) enthält – anders als die übrigen Zielsystem-Elemente – keine Forderungen, sondern kann zur ergänzenden Erläuterung der anderen Zielsystem-Elemente eingesetzt werden, beispielsweise zur Erklärung von Hintergrundinformationen zu einer Anforderung oder Bearbeitungsanleitungen für den Ersteller des Zielsystem-Modells.

Nachdem in den obenstehenden Abschnitten alle Elementtypen der Methode aufgeführt wurden, sollen nun die **Relationstypen** vorgestellt werden. Grundsätzlich

⁴⁷⁴ Ebel 2015

⁴⁷⁵ Ebel 2015

⁴⁷⁶ Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger 2015; Matros, Schille, Behrendt & Holzer 2015; Matros 2016

⁴⁷⁷ Siehe Kapitel 2.4.1

können alle Relationstypen, die EBEL definiert hat⁴⁷⁸, zum Einsatz kommen. Dabei treten die hierarchischen Relationen (z. B. „enthält“, „wird verfeinert durch“), die generischen Relationen (zwei Elemente stehen ganz allgemein in Beziehung zueinander) und die Verifizierungs- und Validierungs-Relationen am häufigsten auf. Eine Sonderrolle nehmen Relationen zwischen Elementen ein, die einen Verweis von einem Zielsystem in ein anderes enthalten. Diese Verweise werden oft benötigt, um beispielsweise die Relation zwischen dem Zielsystem des zu entwickelnden Systems (Hybridmodul) und Zielen, Anforderungen und Randbedingungen des Supersystems (Gesamtfahrzeug) oder des zugehörigen Baukastens herzustellen (vgl. Abbildung 4.6). Die Art und Weise, wie solche Verweise erstellt werden sollen, wird in dieser Arbeit nicht durch die Methode festgelegt, weil sie stark von Faktoren des Unternehmens abhängt (z. B. verantwortliche Organisationseinheit und verwendete Tools fürs Anforderungsmanagement). Eine mögliche Umsetzung von Verweisen und Relationen wird im Anwendungsteil (Kapitel 4.4) vorgestellt.

4.3.3 Referenzmodell

Der Nutzen der Einführung eines Referenzmodells für Baukasten-Zielsysteme kann am besten anhand der Hauptziele von Referenzmodellen verdeutlicht werden: der **Arbeitserleichterung** bei der Erzeugung von projektspezifischen Zielsystemmodellen (korrespondierend zu Forschungsfrage 1.3) und der **Steigerung der Qualität** dieser Zielsystemmodelle⁴⁷⁹. Diese beiden Hauptziele werden in den nächsten Absätzen im Kontext der Zielsystem-Bildung für Baukästen betrachtet und in die Methode integriert.

Ein Referenzmodell setzt sich in der Regel zusammen aus Daten der Vorgängergenerationen desselben oder eines ähnlichen Produkts. Nutzt man dieses Referenzmodell als Vorlage für die Modellerstellung einer neuen Produktgeneration, ergibt sich eine **Arbeitserleichterung**. Um die deduktive Ableitung eines (neuen) Produktmodells aus dem Referenzmodell zu ermöglichen, soll dieses Referenzmodell einerseits so allgemein gehalten sein, dass es auch für zukünftige Entwicklungsprojekte als Vorlage dienen und eingesetzt werden kann. Andererseits soll es möglichst konkret sein, damit möglichst große Anteile seines Inhalts ohne große Anpassungen übernommen werden können. In diesem Spannungsfeld bewegt sich auch die Erstellung eines Referenzmodells für Baukasten-Zielsysteme. Es muss also gelingen, Ziele, Anforderungen und Randbedingungen (einschließlich ihrer wechselseitigen Relationen) des Referenzmodells wiederverwendbar zu gestalten,

⁴⁷⁸ Ebel 2015

⁴⁷⁹ Siehe Kapitel 2.2.5

ohne dass sie an Informationsgehalt und Präzision einbüßen. Teilweise gelingt dies bereits mit einfachen Mitteln, wie einer geschickten Wahl von Formulierungen: Wo in Zielsystemen von Vorgänger-Produktgenerationen der Unternehmensname und der des Lieferanten stand, können für das Referenzmodell die Begriffe „Auftraggeber“ und „Auftragnehmer“ verwendet werden. Statt der Bezeichnung „Hybridmodul“ (Zielsystem Vorgängergeneration) ist im Referenzmodell vom „zu entwickelnden System“ die Rede, um diese Anforderung auch für einen elektrischen Achsantrieb unverändert verwenden zu können.

Um das Referenzmodell auch zur **Steigerung der Qualität** von Baukasten-Zielsystemen einzusetzen, müssen die Inhalte des Referenzmodells im Vorfeld auf ihren Referenzcharakter geprüft werden, d. h. ihre Vollständigkeit, Relevanz und Konsistenz bestmöglich sichergestellt werden. Als erster Anhaltspunkt können die Zielsysteme der Vorgänger-Produktgenerationen herangezogen werden. Je mehr dieser Zielsysteme auf verwertbare Ziele, Anforderungen und Randbedingungen durchforstet werden, desto eher ist das Referenzmodell vollständig. Bei dieser Übertragung alter Zielsystem-Elemente muss permanent hinterfragt werden, ob die Gültigkeit und Widerspruchsfreiheit des Referenzmodells nach wie vor sichergestellt sind⁴⁸⁰. Weiterhin ist es für eine bestmögliche Vollständigkeit, Relevanz und Konsistenz des Referenzmodells unumgänglich, Gespräche mit Fachexperten zu führen zu all denjenigen Themen, die zwar im Baukasten-Zielsystem thematisiert werden müssen, jedoch von anderen Organisationseinheiten verantwortet werden (z. B. Produktions-, Logistik- und Vertriebsthemen). Des Weiteren sollten bereits gemachte Erfahrungen und bewährte Ansätze (seien es spezielle Anforderungsformulierungen, Regelungen zur Zusammenarbeit oder durchzuführende Tests) im Zielsystem-Referenzmodell festgehalten werden. Dadurch kann das Wissen in Form von Lessons Learned und Best Practices unmittelbar in jede Entwicklung einer neuen Produktgeneration einfließen.

Als eine weitere Voraussetzung zum gewinnbringenden Einsatz des Zielsystem-Referenzmodells muss die Ableitung eines projektspezifischen Zielsystem-Modells aus dem Referenzmodell leicht gelingen. Der Entwickler muss also anhand einfacher Regeln und Anleitungen erkennen können, welche Elemente einerseits unverändert übernommen werden können und andererseits welche Elemente mit projektspezifischen Inhalten angepasst und ergänzt werden müssen. Zu diesem Zweck wird in der Methode ein Attribut definiert, das für jedes Zielsystem-Element einen der beiden folgenden Werte annehmen kann: Alle Elemente des

⁴⁸⁰ Mayer-Bachmann 2007

Übernahme-Typs A können für das projektspezifische Zielsystem-Modell **mit Inhalt und Wortlaut unverändert** aus dem Referenzmodell übernommen werden. Typische Beispiele für solche Elemente sind interne Randbedingungen, die für alle Entwicklungsprojekte des Unternehmens gelten (z. B. Werknorm zur Vermeidung umweltschädlicher Werkstoffe), oder Organisationsanforderungen für die Produkt-Nutzungsphase (z. B. dass im Lieferumfang austauschbarer Ersatzteile immer die passenden Schrauben und Dichtungen enthalten sein müssen). Dagegen sind in allen Elementen des **Übernahme-Typs B** zwar der Wortlaut des Ziels, der Anforderung oder Randbedingung bereits enthalten, aber es muss eine **projektspezifische Angabe ergänzt** werden. Diese Angabe kann beispielsweise ein Meilensteintermin, die genaue Menge benötigter Prototypenteile oder die Angabe der E-Maschinen-Leistung sein. In der Kategorie Übernahme-Typ B finden sich auch alle Zielsystem-Elemente, in denen Prinzipskizzen oder Funktionsbeschreibungen vorkommen, die projektspezifisch sind und demzufolge inhaltlich nicht im Referenzmodell vorweggenommen werden können. Sowohl die Zahlenwerte als auch die Skizzen und Texte, die ergänzt werden müssen, sind im Referenzmodell durch einen Platzhalter gekennzeichnet, sodass der Entwickler bei der Ableitung eines projektspezifischen Zielsystem-Modells auf sie aufmerksam wird und nicht vergisst, sie zu bearbeiten und anzupassen. Da jede Produktentwicklung einzigartig ist⁴⁸¹, müssen im projektspezifischen Zielsystem-Modell auch neue Zielsystem-Elemente ergänzt werden. Da jede Produktentwicklung im Regelfall einen gewissen Neuentwicklungsanteil aufweist, können diese Elemente nicht bereits im Referenzmodell enthalten sein.

4.3.4 Explikation von Unsicherheit

In jeder Produktentwicklung sind Ziele, Anforderungen und Randbedingungen unsicherheitsbehaftet. In der Baukastenentwicklung wird dieser Effekt aufgrund des Zeitversatzes der Baukasten-Nutzer nochmals verstärkt und ist ein Haupt-Komplexitätstreiber⁴⁸². Die Unsicherheit von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit in einer teilnehmenden Studie als wesentliche Herausforderung erkannt und durch die Ergebnisse einer Umfrage bestätigt⁴⁸³. Zur Adressierung dieser Herausforderung soll die **Explikation von Unsicherheit** als der erste wichtige Schritt dazu dienen, die Unsicherheit durch Folgeaktivitäten in der Entwicklung zu minimieren. Dazu wird ein Lösungsansatz entwickelt, die sich der beiden generischen Beurteilungsdimensionen

⁴⁸¹ Erste zentrale Hypothese der Produktentwicklung nach ALBERS (Albers 2010)

⁴⁸² Siehe Kapitel 2.4.5

⁴⁸³ Siehe Kapitel 4.2

für Ziele, **Reifegrad** und **Härtegrad**, bedient⁴⁸⁴. Dieser Lösungsansatz soll den Entwickler durch die Explikation der Unsicherheit in die Lage versetzen, konkrete Entwicklungsaktivitäten zur Reduzierung der Unsicherheit zu identifizieren und zu initiieren.

Um den Arbeitsaufwand, der mit der Explikation einhergeht, möglichst gering zu halten und um die Akzeptanz der Methode zu gewährleisten, wurden die beiden graduellen Dimensionen Reife- und Härtegrad in nur wenige **diskrete und eindeutig differenzierbare Abstufungen** überführt, die zur Auswahl stehen. Damit die Explikation der Unsicherheit nicht nur eine bloße Dokumentation des Problems (sprich einer Wertevergabe des herrschenden Reife- und Härtegrads) bleibt, sondern einen unmittelbar anwendbaren Nutzen für die Entwicklung stiftet, werden direkt Lösungsansätze zur Auswahl geboten, also **Entwicklungsaktivitäten**, die **zur Reduzierung der Unsicherheit** ergriffen werden müssen.

Unter den Reifegrad fallen Wissens- und Definitionslücken bzgl. der Erreichbarkeit und Relevanz eines Ziels für das zu entwickelnde System. Die Abbildung 4.10 (links) zeigt die verwendete Skala und deren Abstufungen, die der Reifegrad annehmen kann.

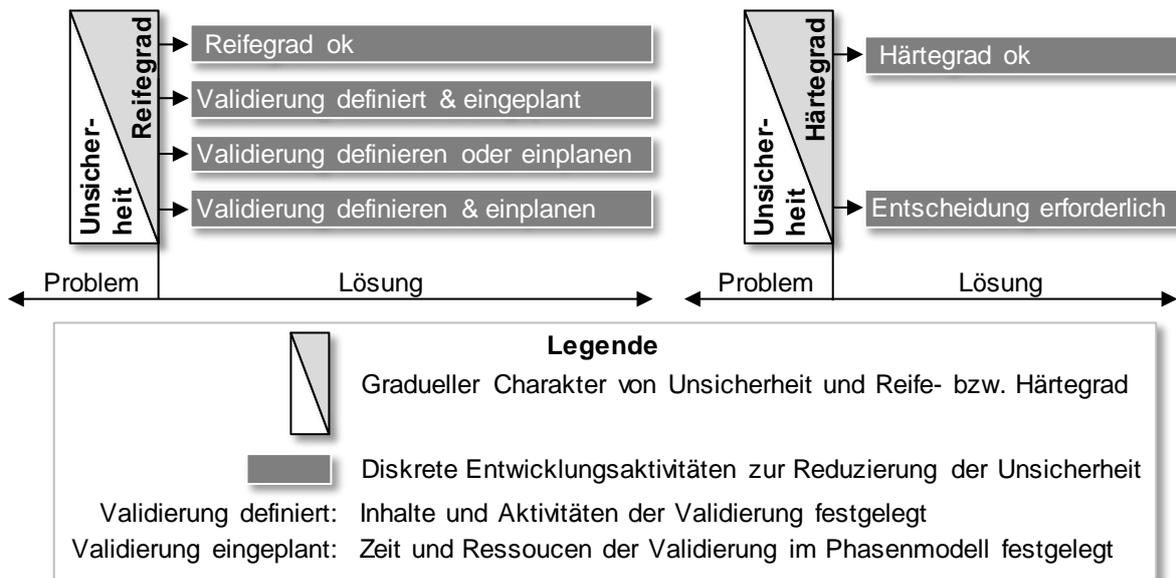


Abbildung 4.10: Skalen für Reifegrad und Härtegrad

Die höchste Unsicherheit und damit der geringste Reifegrad eines Zielsystem-Elements herrscht, wenn keinerlei Erfahrungen oder Erkenntnisse dazu vorliegen, wie relevant das Ziel oder wie realistisch die Erreichung dieses Ziels ist. In solchen Fällen hat der Entwickler die Möglichkeit anzugeben, ob bereits **Aktivitäten zur**

⁴⁸⁴ Siehe Kapitel 2.4.2

Validierung⁴⁸⁵ des Ziels und somit zur Erhöhung seines Reifegrades vorgesehen sind oder nicht. Sofern die Validierung weder inhaltlich definiert noch zeitlich eingeplant ist, kann er den untersten Wert auswählen. Ist eine Validierungsmaßnahme entweder inhaltlich definiert oder zeitlich eingeplant, trifft der mittlere Wert zu. Der zweitoberste Wert der Skala wird entsprechend vergeben, wenn eine Validierung definiert und eingeplant ist, jedoch die Ergebnisse noch nicht vorliegen.

Laut ALBERS, LOHMEYER und EBEL ist der **Härtegrad** ein Maß für die Beständigkeit eines Ziels im Prozess der Produktentstehung⁴⁸⁶. Umgekehrt kann ein zu geringer Härtegrad eines Ziels den zielgerichteten Fortschritt der gesamten Entwicklung wegen der geringen Verbindlichkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit des Ziels verhindern. Solche Ziele mit geringem Härtegrad können nun mit der Vergabe eines Boole'schen Werts (Abbildung 4.10) markiert werden, um in der Folge verbindliche Aussagen und Entscheidungen zur Erhöhung des Härtegrads herbeizuführen (z. B. in Form von Entscheidungsvorlagen für den Vorgesetzten).

Durch den **Zeitversatz der Nutzer eines Baukastens**⁴⁸⁷ gewinnt der Härtegrad von Zielsystem-Elementen (also die Änderbarkeit bzw. Beständigkeit von Zielen) eine zusätzliche Bedeutung, da die Umsetzung der zeitlich spät angesiedelten Baukasten-Nutzer oft noch ungewiss ist. Folglich weisen die meisten Ziele, Anforderungen und Randbedingungen dieses Nutzers im Baukasten-Zielsystem einen sehr geringen Härtegrad auf, was in der Praxis eine geringere Priorisierung dieser Ziele durch den Entwickler zur Folge hat und die Gefahr erhöht, dass wichtige Ziele nicht allen Entwicklern ausreichend präsent sind. Durch die Vergabe des Werts eines geringen Härtegrads und den damit einhergehenden Filterungsmöglichkeiten des Baukasten-Zielsystems können die betroffenen Elemente regelmäßig (z. B. in Review-Terminen) gezielt in Erinnerung gerufen werden.

Wie oben gezeigt, sind Reife- und Härtegrad separate Attribute von Zielsystem-Elementen, für die unabhängig voneinander Werte vergeben werden können. Begründet werden kann dies dadurch, dass vom Entwickler zur Steigerung von Reife- und Härtegrad **unterschiedliche Aktivitäten** verlangt werden, nämlich **Definieren, Einplanen und Durchführen von Validierungen** im Fall des Reifegrads

⁴⁸⁵ Mit der Validierung eines Ziels ist hier nicht immer die Durchführung eines Tests (z.B. Prüfstandsversuch, Simulation) gemeint, sondern es kann sich auch z.B. um ein Gespräch zur Klärung von Expertise und Kompetenz eines Lieferanten oder Entwicklungspartners (Klärung der Erreichbarkeit eines Ziels) oder die Anwendung der Anwendungsfallanalyse (Klärung der Relevanz eines Ziels), siehe Kapitel 4.3.5, handeln.

⁴⁸⁶ Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

⁴⁸⁷ Siehe Kapitel 2.3.3

und **Anstoßen eines Entscheidungsprozesses** im Fall des Härtegrads. Trotzdem beeinflussen sich Reife- und Härtegrad oftmals wechselseitig, wie die folgenden zwei Beispiele zeigen sollen: Zuweilen kann der Härtegrad eines Zielsystem-Elements erst erhöht werden, wenn der Reifegrad an anderer Stelle des Zielsystems gestiegen ist. Beispielsweise kann das Ziel einer bestimmten Leistungsdichte für die E-Maschine erst mit hoher Härte bzw. geringer Änderbarkeit festgelegt werden, wenn in Erfahrung gebracht werden konnte, ob ein bestimmter Werkstoff für das Blechpaket des Stators verfügbar ist. Umgekehrt lohnt sich die Erhöhung des Reifegrads durch kostspielige Investitionen (z. B. die Fertigung von Prototypenteilen) erst dann, wenn der Härtegrad aller Ziele ausreichend hoch bzw. ihre Änderbarkeit gering ist⁴⁸⁸.

4.3.5 Anwendungsfallanalyse mit SPALTEN

Eine Modellierungsregel von EBEL sieht vor, Anwendungsfälle zur Extraktion von Zielen und Anforderungen zu nutzen, da diese eine Analyse der Interaktionen des zu entwickelnden Systems mit seinen Nutzern ermöglicht⁴⁸⁹. Die Fragen, die zur Ermittlung dieser Anwendungsfälle führen können, sind in Abbildung 4.11 aufgeführt.

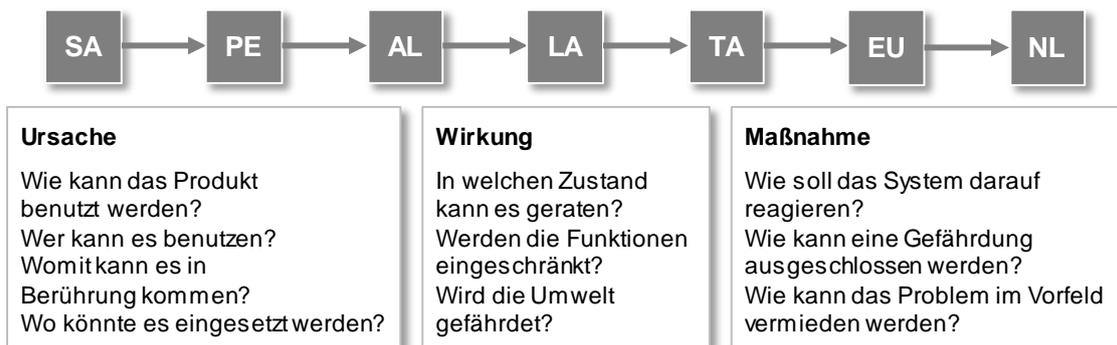


Abbildung 4.11: Anwendungsfallanalyse mit SPALTEN⁴⁹⁰

Mit der Ermittlung der Anwendungsfälle allein ist man noch nicht am Ziel angelangt. Vielmehr müssen aus den ermittelten Anwendungsfällen die richtigen Schlussfolgerungen gezogen und ihre Tragweite analysiert werden, um daraus die richtigen Ziele und Anforderungen ableiten zu können. Hierzu kann der allgemeine **Problemlösungsprozess SPALTEN** nach ALBERS⁴⁹¹ zur Strukturierung eingesetzt werden (vgl. Abbildung 4.11): Zunächst können die Fragen im Zuge der

⁴⁸⁸ Diese wechselseitige Beziehung zwischen Reife- und Härtegrad (bzw. Wissen und Definition) wird von LOHMEYER als Unsicherheitsdilemma bezeichnet (Lohmeyer 2013).

⁴⁸⁹ Ebel 2015

⁴⁹⁰ Nach Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit, dort nach Feldhusen & Grote 2013 und Albers & Braun 2011a

⁴⁹¹ Siehe Kapitel 2.2.3

Situationsanalyse und Problemeingrenzung gestellt werden, um dann in der Folge die Erzeugung passender Anforderungen mit den restlichen Prozessschritten herbeizuführen.

Die Anwendungsfallanalyse, kombiniert mit SPALTEN, kann also zum einen für eine **höhere Vollständigkeit** des Zielsystems sorgen. Sie kann zum anderen auch dazu eingesetzt werden, die **Tragweite** bereits bekannter und bestehender Ziele, Anforderungen und Randbedingungen zu untersuchen. Auf diese Weise können die Entwickler dabei unterstützt werden, einzelne Zielsystemelemente kritisch zu hinterfragen und im Team ein gemeinsames Verständnis bzgl. des gesamten Zielsystems zu erhalten. Dazu ist es wichtig, dass die Anwendungsfälle als Elemente des Zielsystems erhalten bleiben, um die Informationen zur Herkunft der korrespondierenden Ziele, Anforderungen und Randbedingungen so nachvollziehbar und transparent wie möglich zu gestalten. In der vorliegenden Arbeit wurden Anwendungsfälle mit dem Elementtyp *Information* ins Zielsystemmodell integriert. Die Forschung am Einsatz von Anwendungsfällen zur systematischen Ermittlung von Zielen und Anforderungen wird am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe fortgeführt⁴⁹².

4.3.6 Checklisten und Vorlagen

Als weiterer Lösungsansatz zur Erhöhung der Vollständigkeit eines Baukasten-Zielsystems wurden diverse Checklisten eingesetzt und in die Methode integriert (hauptsächlich die Hauptmerkmalliste nach FELDHUSEN und GROTE⁴⁹³). Neben den Checklisten wurden zur Vervollständigung des Zielsystems domänen- und branchenspezifische Leitfäden und Vorlagen herangezogen, etwa Publikationen des VDA⁴⁹⁴, die auf ein möglichst vollständiges Zielsystem für das zu entwickelnde System und seines Produktionsprozesses abzielen⁴⁹⁵.

4.3.7 Formulierungsleitfäden

Zur Steigerung der **sprachlichen Eindeutigkeit und Klarheit** des Zielsystems und seiner Elemente wurden mehrere Leitfäden und Regelwerke angewendet, sowohl aus der Literatur übernommene als auch eigens entworfene. Exemplarisch seien hier die Formulierungsgrundsätze von GRANDE genannt⁴⁹⁶. Diese wurden aufgegriffen

⁴⁹² Matthiesen, Schmidt & Hölz 2015

⁴⁹³ Siehe Anhang A

⁴⁹⁴ Verband der Automobilindustrie

⁴⁹⁵ VDA 2007

⁴⁹⁶ Grande 2014

und in einer angepassten Version eingesetzt⁴⁹⁷. Die folgende Aufzählung bringt einen Auszug der wichtigsten Grundsätze:

- „Begründen Sie Anforderungen, um das Verständnis für Sinn, Tragweite und Wechselwirkungen zu fördern!
- Bilden Sie kurze Sätze!
- Vermeiden Sie Passiv!
- Formulieren Sie nur eine Anforderung pro Satz!“⁴⁹⁸

Darüber hinaus gilt die Maßgabe, möglichst nur exakt testbare Anforderungen zu formulieren. Ob eine Anforderung und die in ihr geforderte Eigenschaft des zu entwickelnden Systems mess- und testbar ist, hängt stark davon ab, in welcher Form der (Zahlen-)Wert der Eigenschaft vorliegt. MUSCHIK unterteilt **mögliche Werttypen** mithilfe von fünf Kategorien, Abbildung 4.12.

Boole'sch	Ja/ nein, 0/1	Qualitativ	Gewicht: Sehr leicht	Quantitativ	Gewicht = 43kg
Deskriptiv	Farbe = Grün	Wertspanne	40kg < Gewicht < 50kg		

Abbildung 4.12: Werttypen in Anforderungen⁴⁹⁹

Dieser Auflistung wurden in der vorliegenden Arbeit zwei Werttypen hinzugefügt sowie Empfehlungen zur Verwendung der Werttypen verfasst. So ist in Dokumenten des Zielsystems häufig der **komparative Werttyp** anzutreffen, bei dem der Wert nicht unmittelbar, sondern indirekt über einen Vergleich mit einem Referenzprodukt angegeben wird (Beispiel auf Systemebene: „Bei der E-Maschinen-Leistung soll eine Steigerung von 20% gegenüber der Vorgängergeneration erzielt werden“; Beispiel auf Supersystem- (d. h. Gesamtfahrzeug-)Ebene: „Das Fahrzeug soll hinsichtlich Längs- und Querdynamik Best-In-Class-Werte⁵⁰⁰ erzielen.“). Ziele mit komparativem Werttyp sind für sich genommen noch nicht sehr aussagekräftig. Um aus ihnen erreichbare und testbare Systemeigenschaften abzuleiten, müssen sie durch Anforderungen konkretisiert werden (im Gesamtfahrzeug-Beispiel z. B. 0 – 100 km/h-Zeit, max. Querbeschleunigung, Rundenzeiten auf Rennstrecken). Ferner müssen die Bezugswerte des Vergleichs bekannt sein. Im Fall der E-Maschinen-Leistung der Vorgänger-Produktgeneration des eigenen Unternehmens ist dieser Bezugswert leicht zu ermitteln. Anders ist es bei Best-In-Class-Forderungen, die sich auf

⁴⁹⁷ Grande 2014

⁴⁹⁸ Die Anpassung erfolgte im Zuge der betreuten Abschlussarbeit von BRANDT (Brandt 2015).

⁴⁹⁹ Muschik 2011

⁵⁰⁰ D. h. das Fahrzeug soll den besten Wert im Vergleich zu seinen (künftigen) Wettbewerbern im gleichen Segment erzielen.

zukünftige (d. h. noch nicht erhältliche) Wettbewerbsfahrzeuge und deren Eigenschaften beziehen. Diese Werte der Wettbewerbsfahrzeuge werden im Verlauf der Entwicklung auf Basis von Prognosen mit variierendem Reifegrad ermittelt. Erst diese Schätzwerte machen das eingangs komparative Ziel zu testbaren Anforderungen⁵⁰¹.

Der zweite ergänzte Werttyp sind **Minimal-** und **Maximal-Werte** (z. B. maximal zulässiges Gewicht des Systems, minimal zu erreichende E-Maschinen-Leistung). Gemeinsam bilden sie eine Wertespanne (vgl. Abbildung 4.12). Minimal- und Maximalwerte treten häufig in frühen Phasen der Entwicklung auf, wenn der Reifegrad der betroffenen Anforderungen noch keine punktgenaue quantitative Angabe zulässt (z. B. in Form einer Grenzkurve zur Schallemission eines Systems, die unterboten werden muss). Überdies lassen Minimal- und Maximalwerte zunächst offen, ob der angegebene Wert punktgenau erreicht oder sogar übertroffen bzw. unterboten werden sollte und lässt somit die Möglichkeit offen, das System leistungsfähiger zu machen als zunächst erwartet. Dennoch sollten Minimal- und Maximalwerte mit Bedacht angewendet werden, weil sie von einigen Mitgliedern des Entwicklungsteams, insbesondere beim Auftragnehmer (z. B. einem Entwicklungsdienstleister, einem Teilelieferanten), als Anforderungen mit zu geringem Härtegrad aufgefasst werden können. Es besteht möglicherweise die Befürchtung, der Auftraggeber könnte seine Forderungen im Verlauf der Entwicklung permanent nach oben korrigieren. Außerdem hätte die häufige Nutzung von Minimal- und Maximalwerten (ebenso der Wertespanne) auf Systemebene negative Auswirkungen auf den Ziel-Reifegrad des Supersystems Gesamtfahrzeug: Würde für das Gewicht jedes Systems eine Wertespanne angegeben, würde das in einer beträchtlichen aufsummierten Wertespanne des Fahrzeug-Gesamtgewichts resultieren. Das würde es unmöglich machen, tragende Karosserieteile zu dimensionieren oder den sich ergebenden Kraftstoffverbrauch zu ermitteln.

Generell gilt im Zusammenhang der Werttypen der oben bereits formulierte Grundsatz, stets eindeutig mess- und testbare Anforderungen zu formulieren. Das bedeutet, dass beschreibende und qualitative Werttypen in quantitative Werte überführt werden sollen. Maximal-, Minimalwerte sowie Wertespannen sollen eingedämmt werden, möglichst auf eine quantitative Angabe. Komparative Werte sollen in konkrete Anforderungen überführt werden und der Bezugswert muss bekannt sein. Werden diese Regeln beherzigt, steigen Reife-, Härtegrad und auch

⁵⁰¹ Albers & Muschik 2010; Muschik 2011

die Verständlichkeit des Zielsystems, was Missverständnissen vorbeugt und letztendlich eine zielgerichtete Entwicklung ermöglicht.

4.4 Implementierung und Anwendung

Dieses Kapitel führt aus, wie die Methode aus Kapitel 4.3 und ihre Lösungsansätze in ein Tool und in ein Unternehmen implementiert werden. Dazu wird zunächst das verwendete Tool *Rational DOORS* des Herstellers IBM kurz vorgestellt. Danach wird gezeigt, wie die oben vorgestellten Lösungsansätze in *DOORS* umgesetzt werden können. Hiernach werden die Randbedingungen behandelt, die bei der Anwendung der Methode bei der Porsche AG berücksichtigt werden mussten. Schließlich werden die Ergebnisse und das erstellte Referenz-Zielsystemmodell zur Entwicklung von Hybrid-Systembaukästen anhand einiger Kennzahlen vorgestellt.

4.4.1 Implementierung ins Tool

Als Tool zur Unterstützung der Aktivitäten des Anforderungsmanagements stand in der Forschungsumgebung dieser Arbeit *Rational DOORS* in der Version 9.3 zur Verfügung⁵⁰². *DOORS* ermöglicht die **modellbasierte Erfassung, Dokumentation und Verwaltung** von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen; d. h. das Anlegen von Elementen mitsamt Relationen einschließlich der Vernetzung verschiedener Zielsysteme untereinander ist möglich. Außerdem bietet *DOORS* folgende Funktionalitäten, mit denen es sich gegenüber MS-Office-Programmen (z. B. Word, Excel) im Anforderungsmanagement abhebt:

- **Vergabe unterschiedlicher Rollen** und Authentifizierungen für Nutzer desselben Zielsystems
- **Nutzerspezifische Sichten**
- **Umfassende Dokumentation** der Änderungshistorie (d. h. zu jedem Element wird gespeichert, welcher Nutzer wann Inhalte geändert hat)
- **Verknüpfung von Anforderungen** mit zugehörigen Tests

Trotz der **objektorientierten Struktur** ähnelt *DOORS* optisch der gewohnten Listendarstellung, die aus dem dokumentenbasierten Anforderungsmanagement bekannt ist, was die Akzeptanz bei ungeübten Nutzern steigert. Das Tool erzielt seine Variabilität und Anpassbarkeit durch die Vergabe von Attributen und Werten, die vom Benutzer bei Bedarf selbst angelegt werden können. Einmal definiert, können sämtliche Elemente eines Zielsystems mit diesen Attributen kategorisiert, bewertet und zur Bildung von Relationen genutzt werden. Die Vergabe von Attributen

⁵⁰² Es ist davon auszugehen, dass die Implementierung der Modellierungsmethode in vergleichbare Tools anderer Anbieter auf ähnliche Weise erfolgen kann.

erlaubt **vielfältige Filterungsmöglichkeiten** der Zielsystem-Elemente, auch durch Kombinations- und Ausschlussmöglichkeiten bestimmter Attribute. Folglich ist es in dieser Arbeit das Ziel, alle Lösungsansätze der Methode mithilfe von Attributen in *DOORS* zu integrieren und anwendbar zu machen.

Als Erstes wird die **Umsetzung der baukastengerechten Struktur**⁵⁰³ in *DOORS* vorgestellt. Vor Einführung der hier vorgestellten Methode war es üblich, eine Tabelle in ein Zielsystem-Element einzufügen, in der die unterschiedlichen Ausprägungen der Baukasten-Nutzer (Abbildung 4.7) eingetragen wurde. Hieraus entsteht aber das Problem, dass dieses Element nicht nur einem, sondern mehreren Baukasten-Nutzern zugewiesen werden muss. Eine eindeutige Filterung nach nur einem Baukasten-Nutzer ist also ebenso wenig möglich wie die **Bildung der Baukasten-Einhüllenden** (durch Herausfiltern der jeweils technisch anspruchsvollsten Werte bzw. der Worst Cases jeder Anforderung) und die differenzierte Vergabe von Reife- und Härtegrad. Aus diesem Grund wurden Wertespanssen in *DOORS* mit separaten Elementen dargestellt, die dem Wortlaut nach zwar gleich sind, aber je nach Baukasten-Nutzer unterschiedliche Ausprägungen der Anforderung enthalten: In Abbildung 4.13 ist zu erkennen, dass den Baukasten-Nutzern (d. h. den Fahrzeugen, die das Hybridsystem verwenden) unterschiedliche Ausprägungen der maximalen Wattiefe zugeordnet wurden.

Die Nummerierung der Überschriften zeigt die hierarchische Struktur des Zielsystems. Um jedem Zielsystem-Element in *DOORS* gemäß Abbildung 4.9 einen Elementtyp zuweisen zu können, wurde das Attribut *Typ* geschaffen. Die Spalte *Carryover* dient der Einteilung aller Zielsystem-Elemente in Übernahme-Elemente vom Typ A und Typ B, was die Ableitung eines projektspezifischen Zielsystem-Modells⁵⁰⁴ aus dem gezeigten Referenzmodell unterstützt⁵⁰⁵. Die Abbildung 4.13 zeigt weitere Attribute, die im Tool als Spalte dargestellt sind, nämlich zum einen die Spalte zur Kennzeichnung des technisch anspruchsvollsten Werts einer Baukasten-Anforderung (*Worst Case*) und zum anderen für Reife- und Härtegrad. Im vorliegenden Beispiel fordert der Baukasten-Nutzer „SUV“ die maximale Wasserdurchfahrhöhe von 400 mm und wurde deshalb als Worst Case markiert. Die Spalten von Reife- und Härtegrad sind hingegen noch leer, weil diese noch nicht im Referenzmodell, sondern erst in einem projektspezifischen Zielsystem-Modell ausgefüllt werden.

⁵⁰³ Siehe Kapitel 4.3.1

⁵⁰⁴ Siehe Kapitel 4.3.3

⁵⁰⁵ Die blaue Farbe der Zielsystem-Elemente vom Typ B signalisiert dem Entwickler, dass die Zahlenwerte bei der Ableitung eines projektspezifischen Zielsystem-Modells ggf. angepasst werden müssen.

Text	Typ	Carryover	Fahrzeug	WorstCase	Reife	Härte
6.16.6 Dichtigkeit	Überschrift	Typ A	Übergreifend			
Es dürfen weder unzulässige Medien in das zu entwickelnde System eindringen noch aus dem System austreten.	Ziel	Typ A	Übergreifend			
Der Systemlieferant validiert die Dichtigkeit des zu entwickelnden Systems gemäß der Werknorm 0815 bis zum Meilenstein 4.	Deliverable interne Randbed.	Typ A				
6.16.6.1 Dichtigkeit gegen Umgebungseinflüsse	Überschrift	Typ A	Übergreifend			
Unter unzulässigen Medien werden insbesondere Wasser, Feuchtigkeit, Schmutz und Partikel verstanden.	Info.	Typ A	Übergreifend			
6.16.6.1.1 Wasserdurchfahrt	Überschrift	Typ A	Übergreifend			
Die maximale Wassertiefe des Gesamtfahrzeugs muss 400 mm betragen.	Funktional	Typ B	SUV	Worst Case		
Die maximale Wassertiefe des Gesamtfahrzeugs muss 300 mm betragen.	Funktional	Typ B	Limousine			
Die maximale Wassertiefe des Gesamtfahrzeugs muss 200 mm betragen.	Funktional	Typ B	Sportwagen			
Die Wasserdurchfahrt muss in allen Betriebszuständen des Antriebsstrangs uneingeschränkt möglich sein.	Qualität	Typ A				
Die Wasserdurchfahrt wird im Gesamtfahrzeug vom Auftraggeber validiert.	Organisatorisch	Typ A				

Legende	
Text:	Wortlaut des Zielsystem-Elements
Typ:	Zuordnung des Elementtyps (Kapitel 4.3.2)
Carryover:	Einteilung in Übernahme-Typ A und -Typ B (Kapitel 4.3.3)
Fahrzeug:	Zuordnung der Modul-Nutzer zu spezifischen Anforderungs-Ausprägungen
Worst Case:	Kennzeichnung des technisch anspruchsvollsten Werts (Kapitel 4.3.1)
Reife, Härte:	Vergabe des Reife- und Härtegrads (Kapitel 4.3.4)

Abbildung 4.13: Implementierung der Methode in DOORS (Ausschnitt des Referenzmodells)

Die **Relationen** konnten ebenfalls in *DOORS* umgesetzt werden. Alle Relationen über die Grenzen eines Zielsystems hinweg (z. B. eine Verlinkung auf ein Element im Zielsystem des benachbarten Baukastens), aber auch inhaltliche Abhängigkeiten zwischen Elementen desselben Zielsystems, können in *DOORS* mit einer gerichteten Relation gebildet werden, d. h. es gibt immer ein Start- und ein Zielelement. Sämtliche Elemente, die über einen Link zu einem benachbarten oder übergeordneten Zielsystem oder ganz allgemein zu einem externen Dokument verfügen, wurden mit einem dafür angelegten Attribut markiert. Zur Erleichterung des Einsatzes der Anwendungsfallanalyse mit SPALTEN, der Checklisten und Vorlagen und Formulierungsleitfäden und -regeln wurden Anleitungen (in Form von Hinweisen für den Ersteller des Zielsystemmodells) in das Referenzmodell integriert.

Abschließend sollen die folgenden Beispiele nochmals die eingangs erwähnten **Filterungsmöglichkeiten** veranschaulichen, die durch die Überführung der Lösungsansätze aus Kapitel 4.3 in Attribute entstehen und durch die das Baukasten-Zielsystem erheblich an Analysierbarkeit und Transparenz gewinnt (dabei sind die Filterkriterien auch beliebig miteinander kombinierbar):

- Filterung nach Elementtyp (z. B. um sämtliche Tests oder Anforderungen mit organisatorischem Inhalt zu erhalten)
- Filterung nach Übernahme-Elementen (z. B. Typ B, um alle Elemente zu erhalten, die einer projektspezifischen Anpassung bedürfen)
- Filterung nach Elementen mit geringem Reife- oder Härtegrad, um alle Anforderungen zu erhalten, zu denen Validierungsmaßnahmen erforderlich sind bzw. zu denen Entscheidungsbedarf besteht
- Filterung nach bestimmten Baukasten-Nutzern
- Filterung nach Verlinkungen (z. B. mit Werknormen, Gesetzen, benachbarten Zielsystemen)

4.4.2 Implementierung ins Unternehmen

Im Zuge der Einbindung und Anwendung der Zielsystemmodelle in der Serienentwicklung von Hybrid-Baukästen bei der Porsche AG mussten einige **unternehmensspezifische Anpassungen** vorgenommen werden. Als die beiden wesentlichen Aspekte, die eine Anpassung der oben erarbeiteten Methode erforderten, haben sich die **unternehmenseigene Zielsystem-Vorlage** in *DOORS* sowie der **Umgang mit Verlinkungen** auf Zielsysteme und Dokumente außerhalb des Baukasten-Zielsystems herausgestellt. Diese Aspekte werden nachfolgend ausgeführt.

Zur Erzeugung des Zielsystem-Referenzmodells und des projektspezifischen Zielsystem-Modells war die bestehende unternehmenseigene Vorlage in *DOORS*⁵⁰⁶ bindend. Sie basiert wiederum auf Vorlagen des VDA⁵⁰⁷ (Verband der Automobilindustrie), die in der Automobilindustrie weit verbreitet sind⁵⁰⁸. Um den Support und die Update-Fähigkeit der erstellten Zielsysteme aufrechtzuerhalten, konnte die Struktur der Unternehmensvorlage nicht beliebig angepasst oder ersetzt werden (z. B. durch eine Struktur gemäß der Systemtechnik mit Gliederung in Systeme und Subsysteme). Obwohl dadurch der Systems-Engineering-Gedanke in der Struktur der Zielsystem-Modelle in Teilen verloren geht, konnten alle anderen Aspekte des MBSE-Ansatzes vollständig in die unternehmenseigene Vorlage integriert werden, zumal da die Modellierungsmethode der vorliegenden Arbeit absichtlich kein Ordnungskriterium für die Struktur des Zielsystems vorgibt. Als zusätzliche Maßnahme zur transparenten und eindeutigen Struktur des Zielsystems

⁵⁰⁶ Eingebordnet ins Modellierungsframework von ALBERS ET AL. (siehe Kapitel 2.2.5) entspricht diese Vorlage einem unternehmensspezifischen Referenzmodell.

⁵⁰⁷ VDA 2006; VDA 2007. Eingebordnet ins Modellierungsframework von ALBERS ET AL. (siehe Kapitel 2.2.5) entsprechen diese Vorlagen domänenspezifischen Referenzmodellen.

⁵⁰⁸ Feldhusen & Grote 2013

wurden Regeln entworfen, die sicherstellen, dass gewisse Themen, deren Einordnung in mehreren Kapiteln möglich wäre, nicht redundant vorkommen und an nur einer Stelle zu finden sind.

Die **Erzeugung von Relationen** zwischen unterschiedlichen Zielsystemen oder Dokumenten in Form von Verweisen und Links erforderte eine differenzierte Vorgehensweise mit der Unterscheidung unterschiedlicher Fälle, um sämtliche Elementvernetzungen in der Baukastenentwicklung⁵⁰⁹ umsetzen zu können. Die Abbildung 4.14 veranschaulicht sämtliche Entscheidungswege mit den daraus resultierenden **Verlinkungstypen**, abhängig vom **Geheimhaltungsstatus** und der **Dokumentationsform** der Zielsysteme.

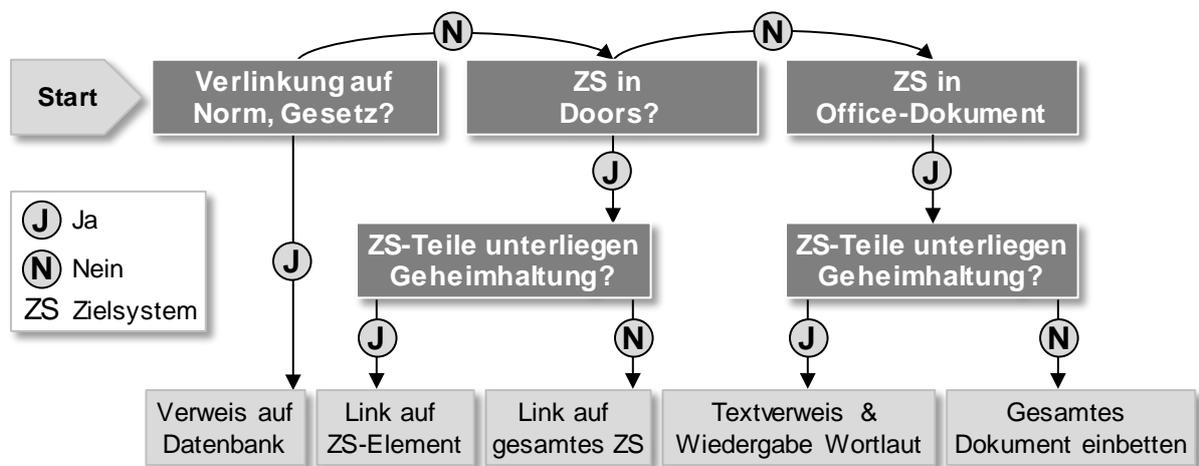


Abbildung 4.14: Verlinkungstypen zwischen Zielsystemen

Wird auf Gesetze oder Normen verwiesen, muss kein Link angelegt werden und es genügt ein Verweis. Denn es ist üblich, dass alle Entwicklungspartner Zugriff auf Datenbanken haben, die die für sie relevanten Normen enthalten. So erhalten beispielsweise Entwicklungsdienstleister und Systemlieferanten Zugang zu einzuhaltenden Werknormen des Fahrzeugherstellers. Handelt es sich nicht um eine Norm oder ein Gesetz, soll in der Regel auf Inhalte anderer Zielsysteme verwiesen werden, beispielsweise Zielsysteme der Nachbarsysteme (z. B. VKM & Getriebe), das Zielsystem des Supersystems (Gesamtfahrzeug) oder systemunabhängige domänenspezifische Zielsysteme (z. B. „Querschnittslastenheft“ zu allen Niedrigvolt-Verkabelungsumfängen). Liegt ein solches Zielsystem in modellbasierter Form in *DOORS* vor, kann die Relation mithilfe eines funktionsfähigen Hyperlinks gebildet werden. Hierbei gilt es jedoch zu unterscheiden, ob das Zielsystem gesamthaft für alle Entwicklungspartner frei einsehbar ist oder ob es auch Elemente enthält, die der

⁵⁰⁹ Siehe Kapitel 4.3.1

Geheimhaltung unterliegen. Im ersten Fall kann auch ein Hyperlink auf das gesamte Zielsystem angelegt werden, im zweiten kann nicht allen Entwicklungspartnern Zugriff auf das gesamte Zielsystem gewährt werden, weswegen ausschließlich Hyperlinks auf einzelne Zielsystem-Elemente zum Einsatz kommen dürfen⁵¹⁰. Liegt das zu verlinkende Zielsystem nicht in *DOORS*, sondern in Form eines Office-Dokuments vor, das der Geheimhaltung unterliegt, wird im Baukasten-Zielsystem ein herkömmlicher Textverweis angelegt und zusätzlich der Wortlaut des Zielelements wiedergegeben. Ist das Office-Dokument mit dem Zielsystem dagegen geheimhaltungstechnisch unkritisch, kann es auch komplett ins Baukasten-Zielsystem eingebettet werden.

Alle Relationstypen, die keine funktionstüchtigen Hyperlinks enthalten (z. B. der Textverweis), führen zu Abstrichen bei Bedienung und Qualität des Zielsystems: Die Bedienung wird weniger komfortabel und die Gefahr steigt, dass dem Entwicklungsteam mangelnde oder veraltete Informationen vorliegen, denn Möglichkeiten wie der automatische Hinweis auf veränderte Inhalte der verlinkten Elemente entfallen. Trotzdem bleibt festzuhalten: Jede Art der Relation – egal in welcher Form – ist besser als eine fehlende Relation. Insofern bilden die in Abbildung 4.14 gezeigten Verlinkungstypen ein **praxistaugliches Vorgehen**, das der vorgefundenen Situation im Unternehmen Rechnung trägt, in dem Zielsysteme der Geheimhaltung unterliegen und die nicht immer modellbasiert vorliegen.

4.4.3 Anwendung im Unternehmen

Im Zuge der Tätigkeit des Autors der vorliegenden Arbeit in einem Unternehmen der Automobilindustrie konnte die in Kapitel 4.3 vorgestellte und in Kapitel 4.4 implementierte Modellierungsmethode angewendet und somit validiert werden. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse werden nachfolgend vorgestellt.

Als zentrales Arbeitsergebnis im Unternehmen ist im Zuge einer betreuten Abschlussarbeit ein **Referenzmodell** für die Serienentwicklung von Hybridantrieb-Systembaukästen entstanden, das alle Lösungsansätze der vorgestellten Methode enthält⁵¹¹. Um dieses Referenzmodell mit Inhalten zu füllen, standen mehrere Quellen zur Verfügung:

⁵¹⁰ Solche beschränkten Zugriffsrechte ließen sich auch über die Vergabe nutzerspezifischer Sichten im Tool realisieren. Dieser Lösungsweg existiert freilich nur bei modellbasierten Zielsystemen. Zudem würde diese Lösung bei komplexen und sehr umfangreichen Zielsystemen (z.B. beim Gesamtfahrzeug-Zielsystem) an der großen Anzahl von Nutzern und Interessenvertretern scheitern, die alle unterschiedliche Zugriffsrechte benötigen würden. Deshalb sind andere Wege zur Steuerung der Zugriffsrechte erforderlich.

⁵¹¹ Die vorgestellte Modellierungsmethode wurde zur Bildung des Referenzmodells im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit angewendet (Brandt 2015, betreute Abschlussarbeit).

- **Lastenhefte** von Vorgänger-Produktgenerationen und Nachbarbaukästen, Zielsysteme des Gesamtfahrzeugs
- **Experten-Gespräche** zu Spezialthemen wie Crash-, Hochvolt- und Funktionaler Sicherheit, Werkstoffe und Recycling, Qualitätssicherungsprozesse von Prototypenteilen (u. v. m.)
- **Dokumente** und **Erfahrungswissen** von Kollegen zu gesammelten Lösungen und bewährten Entwicklungspraktiken aus vergangenen Projekten (Lessons Learned und Best Practices)

Die zentrale Herausforderung beim Zusammenführen der Inhalte der unterschiedlichen Quellen war die **Vermeidung von Redundanzen** oder inhaltlichen Widersprüchen. Weiterhin wurden erforderliche Relationen und Verlinkungen gemäß oben beschriebenen Schema angelegt sowie alle referenzierten Normen und Gesetze auf **Gültigkeit** und **Relevanz** hin überprüft. Während der Methodenentwicklung und der Erstellung des Referenzmodells fand ein permanenter Austausch mit den Entwicklern und späteren Anwendern statt, um regelmäßiges Feedback zum Aufwand-Nutzen-Verhältnis und der so wichtigen Akzeptanz⁵¹² der Methode zu erhalten.

Durch die Erstellung des „Master-Lastenhefts“ ist es gelungen, ein Referenzmodell nicht nur für einen, sondern für drei Hybridsystem-Baukästen unterschiedlicher Hybrid-Triebstrangtopologien bereitzustellen, darunter ein Baukasten für eine P2- sowie eine P4-Topologie⁵¹³. Das bedeutet, ein einziges Referenzmodell kann als Ausgangsbasis für die projektspezifischen Zielsysteme mehrerer Hybridsystembaukästen dienen. Als Konsequenz ist im Referenzmodell nicht nur die Varianz der Baukasten-Anforderungen in Form einer Wertespanne zu berücksichtigen⁵¹⁴ (vgl. Abbildung 4.8), sondern auch die Varianz der unterschiedlichen Hybridsystembaukästen, die mit dem Referenzmodell bedient werden sollen. Folglich existieren einerseits Zielsystem-Elemente, die **baukastenübergreifend** für alle drei Hybridsystem-Baukästen relevant sind, andererseits **baukastenspezifische Elemente** (z. B. Anforderungen zum Verbau zwischen VKM und Hauptgetriebe für den P2-Hybrid oder Einflüsse des achsnahen Verbaus der E-Maschine für den P4-Hybrid). Die baukastenübergreifenden Elemente stellen mit über 80 % den Hauptanteil des Zielsystems (Abbildung 4.15), was den Referenzcharakter des „Master-Lastenhefts“ unterstreicht. Das Referenzmodell ist somit in mehreren Projekten einsetzbar. Dadurch kann der Aufwand seiner

⁵¹² Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012, dort nach Albers & Lohmeyer 2012

⁵¹³ Siehe Kapitel 2.1.1

⁵¹⁴ Siehe Kapitel 4.3.1

Erstellung von mehreren Projekten getragen werden. Darüber hinaus kann ein **Wissensaustausch zwischen den Projekten** erfolgen, beispielsweise in Fällen, in denen bewährte Entwicklungspraktiken einer P2-Hybrid-Topologie auch für die Entwicklung einer neuen P4-Hybrid-Topologie relevant sind.

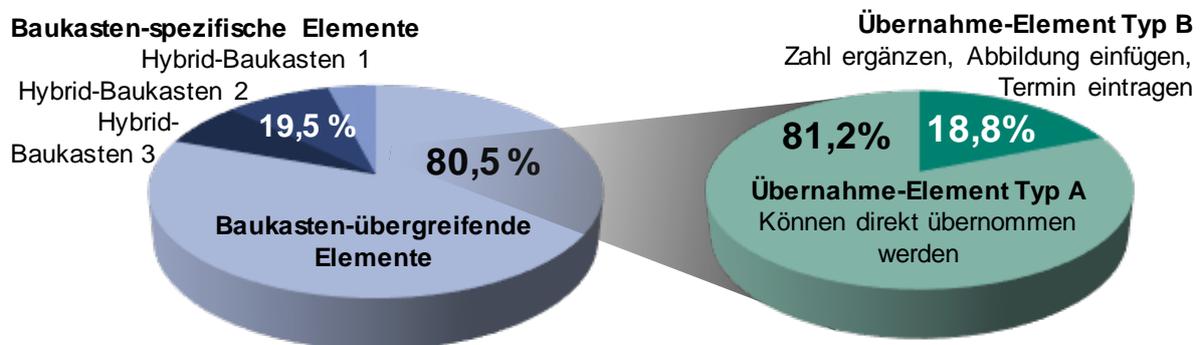


Abbildung 4.15: Anteile von baukastenübergreifenden und von Übernahme-Elementen

Die Menge der baukastenübergreifend gültigen Elemente lässt sich gemäß der in Kapitel 4.3.3 vorgestellten Systematik aufteilen in den Übernahme-Typ A (Übernahme ohne Modifikationen) und den Übernahme-Typ B (Wortlaut bereits fertig formuliert; Platzhalter für Zahlenwert, Termin, Skizze o. Ä. muss projektspezifisch ersetzt werden). Anhand der absoluten Anzahl der beiden Übernahme-Typen von 2429 für Typ A und 562 für Typ B kann die **Arbeitserleichterung**, die durch das Referenzmodell entsteht, nochmals deutlich vor Augen geführt werden, denn diese Elemente müssen vom Entwickler, der ein neues projektspezifisches Baukasten-Zielsystem für Hybridantriebe erstellt, nicht mehr selbst erzeugt werden. Er erhält stattdessen ein Set an Zielen, Anforderungen und Randbedingungen, das bereits im Vorfeld auf **Relevanz**, **Vollständigkeit** und **Konsistenz** geprüft wurde, und er muss lediglich die verbleibenden projektspezifischen Anpassungen und Ergänzungen durchführen. Nachdem ein neues projektspezifisches Zielsystemmodell aus dem Referenzmodell abgeleitet wurde, können auch neue Ziele, Anforderungen und Randbedingungen eingefügt werden.

Eine genauere Analyse des erstellten „Master-Lastenhefts“ für Hybrid-Systembaukästen fördert die Anteile der unterschiedlichen Zielsystem-Elemente zutage (Abbildung 4.16). Insgesamt besteht das Referenzmodell aus 3716 Elementen⁵¹⁵, von denen ca. 43 % aus dem Referenzmodell des Unternehmens stammen. Die Strukturierungselemente sind v. a. Überschriften, die

⁵¹⁵ Für Zielsysteme von Teilsystemen eines Automobils ist ein Umfang von mehreren tausend Elementen durchaus üblich (Mayer-Bachmann 2007).

dem Zielsystem seine hierarchische Struktur geben und die ähnlich häufig wie Informationen und Hinweise auftreten.

Gesamtanzahl Elemente	3716	Elemente aus Unternehmens-Referenzmodell	1611
Strukturierungselemente	612	Informationen & Hinweise	667
Ziele	28	Funktionales Elemente	566
Qualitäts-Elemente	443	Organisations-Elemente	401
Tests	94	Deliverables	364
Interne Randbedingungen	280	Externe Randbedingungen	65
Lessons-Learned-Elemente	>150	Verlinkte Normen & Richtlinien	>110

Abbildung 4.16: Mengen der Elementtypen des ausgeführten Referenzmodells⁵¹⁶

Es fällt auf, dass *Informationen und Hinweise* ein wesentlicher Bestandteil des Zielsystems sind, der dazu dient, Hintergrundinformationen zu Zielen, Anforderungen und Randbedingungen darzustellen⁵¹⁷ (z. B. in Form von Anwendungsfällen). Die Anzahl der *funktionalen, Qualitäts- und Organisations-Elemente* sowie der *Deliverables* bewegt sich in ähnlicher Größenordnung. Damit kommt die Bedeutung von Organisations-Elementen und Deliverables zum Ausdruck, die eigentlich Elemente des Handlungssystems beschreiben, aber trotzdem im Zielsystem aufgeführt werden. Die vergleichsweise geringe Anzahl an *Zielen* lässt sich mit ihrer noch vergleichsweise geringen Etablierung erklären. Zudem enthalten Zielsysteme eines Fahrzeugsystems (z. B. ein Hybridmodul⁵¹⁸) überwiegend relativ konkrete Anforderungen und Randbedingungen, wogegen die eher abstrakteren Ziele häufiger im Gesamtfahrzeug-Zielsystem anzutreffen sind. Die *interne Randbedingung* wird im Vergleich zur *externen Randbedingung* deutlich häufiger verwendet, was der vielfachen Anwendung von internen Richtlinien und Werknormen, aber auch den Verweisen auf Nachbar- und Super-Zielsysteme geschuldet ist.

Der Elementtyp *Test* kommt ebenfalls nur punktuell zum Einsatz, weil im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine vollständige und durchgängige Verknüpfung der Zielsystem-Elemente mit ihren korrespondierenden Validierungsaktivitäten stattfand. Eine solche Verknüpfung bietet noch erhebliches Potenzial, um komplexe Produktgenerationsentwicklungen systematisch und nachvollziehbar zu gestalten.

⁵¹⁶ Da gemäß dem Vergabeschema (Abbildung 4.9) Mehrfachnennungen möglich sind, ist die Summe der Anteile der Elementtypen größer als die Gesamtanzahl der Elemente.

⁵¹⁷ Siehe auch Weber & Weisbrod 2003

⁵¹⁸ Siehe Kapitel 2.1

Hierbei können auch Herangehensweisen zur systematischen Validierung wie der IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz⁵¹⁹ angewandt werden.

Insgesamt sind ins Referenzmodell mehr als **150 Lessons Learned und Best Practices** sowie mehr als **110 Normen und Richtlinien** eingeflossen und als solche markiert worden. Unter ihnen befinden sich viele unterschiedliche Themen; hier eine Auswahl zur Verdeutlichung ihrer Vielfältigkeit: Anleitung zur präzisen Angabe der E-Maschinenleistung, Beschreibung einer standardisierten Testumgebung zur Messung der E-Maschinenleistung, Begriffsdefinitionen (z. B. „Design Freeze“), Verweise auf Entwicklungsleitfäden, Richtlinien zur Gestaltmodellierung, Favorisierung und Ausschluss bestimmter Lösungsprinzipien, Methode zur frühen Validierung der akustischen Eigenschaften des zu entwickelnden Systems.

Es ist davon auszugehen, dass jedes projektspezifische Zielsystemmodell im Vergleich zum Referenzmodell um weitere projektspezifische Elemente ergänzt werden muss, die nicht vorhersehbar sind und deswegen nicht vollumfänglich im Referenzmodell enthalten sein können. Um trotzdem die größtmögliche Menge an Zielen, Anforderungen und Randbedingungen durch das Referenzmodell vorgeben zu können, muss dieses permanent gepflegt, aktualisiert und mit Erkenntnissen laufender und abgeschlossener Entwicklungen angereichert werden.

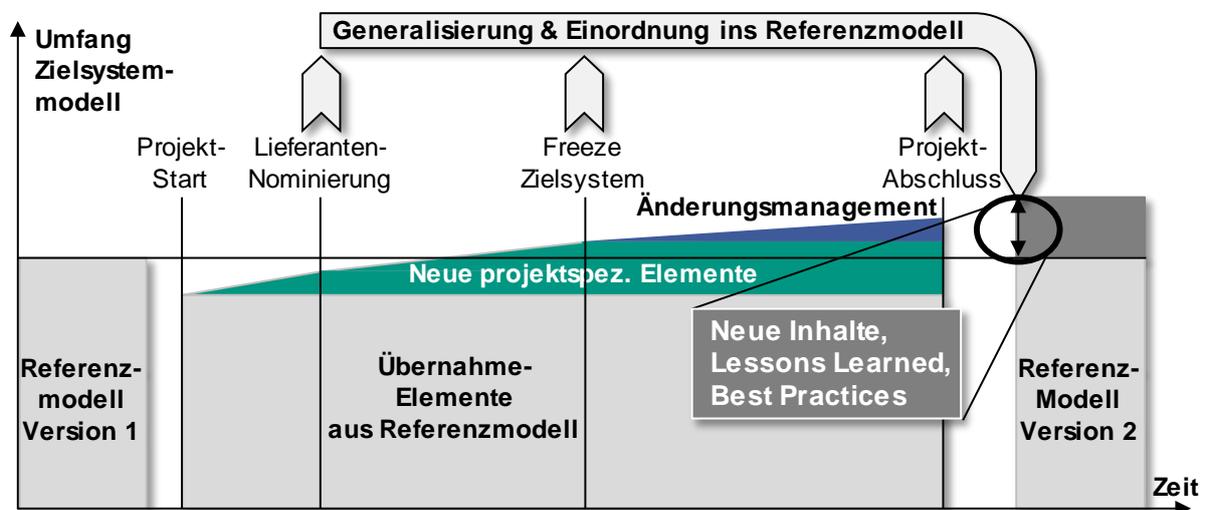


Abbildung 4.17: Pflege des Referenzmodells mit neuen Zielsystem-Elementen

Der in Abbildung 4.17 gezeigte Prozess stellt den **Rückfluss neuer projektspezifischer Inhalte** ins Referenzmodell sicher. Gleichzeitig integriert er das Referenzmodell in die bestehende Prozesslandschaft, indem er die mit der Pflege des Referenzmodells verbundenen Aktivitäten zu Zeitpunkten von bereits

⁵¹⁹ Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

bestehenden Meilensteinen des Produktentwicklungsprozesses ansiedelt. Diese Integration von Methoden in bestehende und bekannte Abläufe des Unternehmens ist ein wichtiges Ziel der Karlsruher Schule, denn so kann die **organisatorische Akzeptanz** der Methoden gefördert werden⁵²⁰.

4.5 Diskussion und Zwischenfazit

Mithilfe einer Literaturrecherche und einer teilnehmenden Studie wurden vier **Kern-Herausforderungen des Anforderungsmanagements** in der Entwicklung von Systembaukästen identifiziert:

- Zielsystem ist unvollständig
- Zielsystem ist manchen Projektbeteiligten unbekannt
- Mangelnde Tragweitenanalyse des Zielsystems
- Zielsystem ist unsicherheitsbehaftet

Die Relevanz dieser Kern-Herausforderungen konnte **durch eine Umfrage** unter den Entwicklern **bestätigt** werden. Die Umfrageergebnisse fördern zutage, welchen großen Einfluss die Qualität im Anforderungsmanagement auf den erfolgreichen Verlauf der gesamten Entwicklung hat und dass sich die Entwickler methodische Unterstützung im Anforderungsmanagement wünschen. Mit der **Methode**, die in der Folge entwickelt wurde, konnte jede der Kern-Herausforderungen mit mindestens einem Lösungsansatz adressiert werden. Die Entwicklung der Methode erfolgte **begleitend zur laufenden Serienentwicklung** und wurde regelmäßig durch den Austausch mit Entwicklern iterativ synthetisiert und validiert. Dabei stand besonders die Erzeugung einer schlanken Methode im Vordergrund, die den Anwender in den Mittelpunkt stellt. Die Methode konnte dann in das branchenweit verbreitete Tool *DOORS* implementiert werden. Die Methode ist angepasst an die Bedürfnisse der in der Fahrzeugindustrie häufig anzutreffenden Entwicklung von Systembaukästen in Kooperation mit Systemlieferanten.

Mit der **baukastengerechten Struktur** als wesentlicher Eigenschaft der entwickelten Methode konnte sichergestellt werden, dass zum einen das komplex vernetzte Baukasten-Zielsystem modelliert werden kann und dass zum anderen praktische **Hilfestellungen zur Handhabung der Komplexität** zur Verfügung stehen, beispielsweise durch Vergabe von Reife- und Härtegrad sowie durch Bildung der Einhüllenden der Baukasten-Ziele zur Planung einer effizienten Baukasten-Validierung. Durch das **Referenzmodell** wurde eine signifikante

⁵²⁰ Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012, dort nach Albers & Lohmeyer 2012; Repenning & Sterman 2001

Arbeitserleichterung ermöglicht, da jetzt projektspezifische Zielsystem-Modelle mit reduziertem Aufwand gebildet werden können, und das gleich für mehrere Hybridbaukästen aus einem einzigen Referenzmodell. Durch die Einbindung von **Lessons Learned** und **Best Practices** in das Referenzmodell sind die Erfahrungen vergangener Projekte an zentraler Stelle gespeichert und können bei Folgeprojekten automatisch berücksichtigt werden. Dadurch, dass sich mehrere Hybrid-Systembaukästen eines einzigen Referenzmodells bedienen, kann so auch ein Queraustausch der Informationen erreicht werden. Ferner ist die **Implementierung der Methode** in die bestehende Entwicklungs-Prozesslandschaft eines Automobilherstellers **erfolgt**.

Im Folgenden sollen einige **Restriktionen der Forschungsumgebung** sowie mögliche **weiterführende Fragestellungen** für die Forschung diskutiert werden. So war die gestalterische Freiheit bei der Wahl der Struktur des Zielsystemmodells stark beschränkt durch die verbindliche unternehmensinterne Zielsystem-Vorlage. Hier sind Verbesserungen bei Verständlichkeit und Konsistenz des Modells zu erwarten, wenn die Struktur beispielsweise gemäß der Systemtechnik gewählt würde. Weiterhin war die ausschließlich modellbasierte Darstellung des Zielsystems nicht möglich, da manche Zielsysteme anderer Organisationseinheiten im Unternehmen nur dokumentenbasiert vorlagen. So ergab sich als Zugeständnis an die Anwendbarkeit eine Mischform, wie beispielsweise die Erläuterung der erforderlichen Verlinkungstypen zeigt.

Der zu leistende **Einmalaufwand**, der beim Erzeugen eines Referenzmodells entsteht, kann Entwickler abschrecken und dazu führen, dass die Methode nicht zum Einsatz kommt. Obwohl mit zahlreichen Bearbeitungshinweisen im Referenzmodell versucht wurde, die Anwendung der entwickelten Methode so einfach und barrierefrei wie möglich zu gestalten, bedarf es einer gewissen Experimentierfreude und Neugier. Ferner muss der Anwender in Kauf nehmen, dass die **Amortisation** des am Anfang getätigten Aufwands zeitversetzt eintritt.

Zur Kern-Herausforderung *Zielsystem ist manchen Projektbeteiligten unbekannt* konnten Lösungsansätze gefunden werden. Mit diesen allein ist es jedoch vermutlich nicht möglich, diese Herausforderung vollständig zu überwinden, denn dass das Zielsystem allen beteiligten Entwicklern bekannt ist, wird maßgeblich davon beeinflusst, ob die **passenden Kommunikationsstrukturen** vorhanden sind und auch genutzt werden. Dies wiederum hängt stark von der Unternehmenskultur und der Bereitschaft der Beteiligten ab, einen **offenen Informationsaustausch** zu pflegen.

5 Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung einer Modellierungsmethode, mit deren Hilfe SysML-Modelle des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs technischer Systeme erzeugt und angewendet werden können, um die Serienentwicklung von Baukästen zu unterstützen.

5.1 Ziele der Methode

Dieser Abschnitt stellt die Ziele der Modellierungsmethode vor, die den Funktions-Gestalt-Zusammenhang in SysML darstellen soll (Abbildung 5.1).

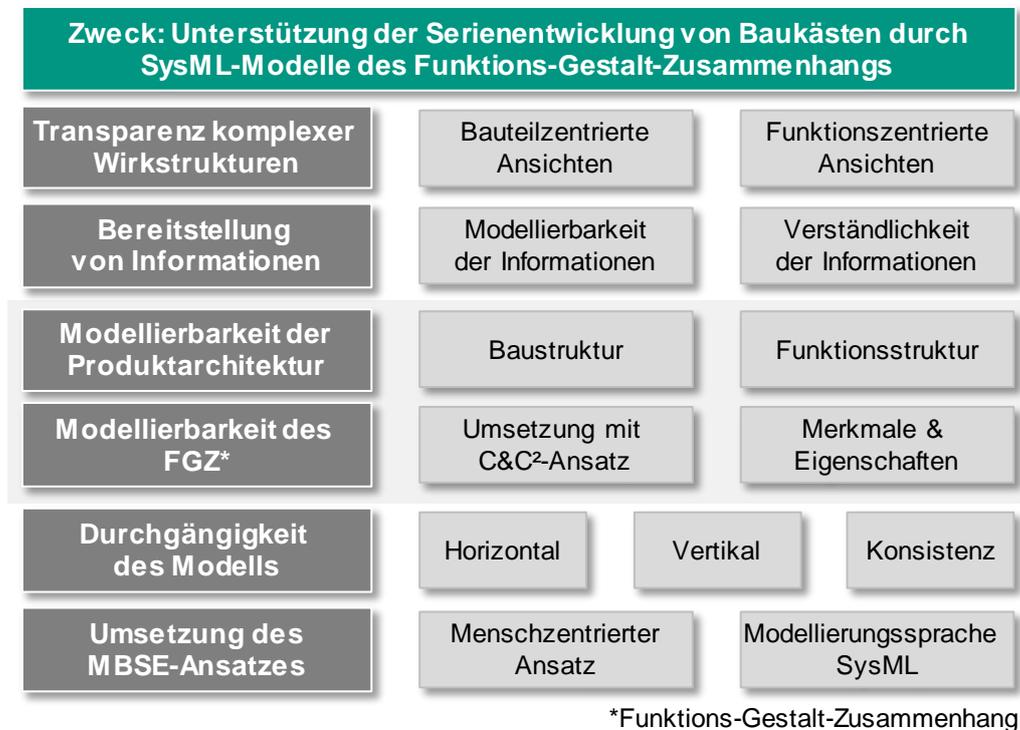


Abbildung 5.1: Ziele der Modellierungsmethode

Das erste Ziel der Methode ist die Schaffung von **Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen** eines technischen Systems. Diese Wirkstrukturen müssen also modellierbar und so darstellbar sein, dass der Entwickler die benötigten Informationen finden und verstehen kann. Zu diesem Zweck sollen insbesondere zwei Ansichten auf die Produktarchitektur im SysML-Modell möglich sein: Zum einen soll die **bauteilzentrierte Ansicht** alle Funktionen anzeigen, an deren Erfüllung ein

Bauteil oder Gestaltelement beteiligt ist⁵²¹. Zum anderen soll die **funktionszentrierte Ansicht** ermöglichen, alle zu einer Funktion zugehörigen Bauteile anzuzeigen. Die bauteil- und funktionszentrierten Ansichten sollen den Entwickler also insbesondere in der Analysephase seiner Entwicklungsaufgabe unterstützen, um ein umfassendes Systemverständnis zu erhalten, bevor er mit der Suche nach geeigneten Lösungen sowie deren Umsetzung startet.

Ein weiterer Anwendungsfall des SysML-Modells ist die **Bereitstellung von Informationen** zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang, welche bei den Entwicklungen vorheriger Modulgenerationen desselben Systembaukastens angefallen sind. Mit der Speicherung von Produktinformationen in einem zentral zugänglichen Modell können Vorteile gegenüber personengebundenem Wissen und auch dokumentenbasierten Wissensmanagement-Ansätzen erzielt werden: Die Informationen zu technischen Sachverhalten können im Modell genau dort gespeichert werden, wo sie der Entwickler leicht wiederfinden kann, nämlich am betroffenen Bauteil bzw. der involvierten Funktion. Der Suchaufwand in Dateien und Laufwerken abgeschlossener Projekte kann also minimiert werden. Ferner stehen die Informationen im Modell allen Projektbeteiligten zur Verfügung. Der auskunftssuchende Entwickler ist also nicht mehr ausschließlich auf den richtigen Wissensträger⁵²² angewiesen, sondern kann das Modell zurate ziehen. Diese Informationen setzen sich zusammen aus Lessons Learned und Best Practices. Das SysML-Modell soll also sämtliche Angaben enthalten, die zur Erfassung des technischen Sachverhalts erforderlich sind, sodass die angesammelten Informationen in der Entwicklung der nächsten Modulgeneration modellbasiert zur Verfügung stehen. Die Modellierungsmethode muss somit für die **Modellierbarkeit der Informationen** sorgen, damit keine wichtigen Informationen zu den Wirkstrukturen verloren gehen. Dabei ist es wichtig, nicht nur gewünschte Produktfunktionen erfassen zu können, die sich aus den Anforderungen und Zielen des Systems ableiten, sondern auch nicht erwünschte Wirkungen (z. B. Verschleiß, Verlustleistung)⁵²³. In der darauffolgenden Nutzung des SysML-Modells muss auf die **Verständlichkeit der Informationen** geachtet werden, damit die Entwickler die richtigen Rückschlüsse ziehen können.

⁵²¹ Ein Bauteil bzw. Gestaltelement allein kann noch keine Funktion ausüben. Dies ist nur gemeinsam mit den umgebenden Bauteilen bzw. Gestaltelementen möglich, damit Wirkpartner zur Verfügung stehen, mit denen Wirkflächen zu gemeinsamen Wirkflächenpaaren kombiniert werden können.

⁵²² Mit Wissensträgern sind überwiegend an der Entwicklung beteiligte Personen gemeint, weniger Datenträger oder andere Wissensquellen.

⁵²³ Viele Lessons Learned entstehen gerade in Verbindung mit der Eindämmung und Beseitigung nicht erwünschter Wirkungen.

Für die **Modellierbarkeit der Produktarchitektur** müssen deren beiden Bestandteile **Baustruktur** und **Funktionsstruktur** modellierbar sein. Weiterhin sollen in der Folge Elemente der Baustruktur (in der Regel Bauteile und Gestaltelemente) mit Elementen der Funktionsstruktur in Form von Wirknetzen verknüpft werden. Daher muss der **Funktions-Gestalt-Zusammenhang** ebenfalls **modellierbar** sein. Dies soll in dieser Arbeit mit dem **C&C²-Ansatz** nach ALBERS⁵²⁴ mit seinen Elementen Wirkflächenpaar, Leitstützstruktur und Connector umgesetzt werden. Außerdem soll die Möglichkeit bestehen, zu Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zugehörige funktionsrelevante **Merkmale und Eigenschaften** nach ZINGEL⁵²⁵ anzulegen, denn Gestaltungswissen zu technischen Systemen verbirgt sich stets im Detail⁵²⁶, wie etwa Toleranzen, Werkstoffbestandteile, Verschleißverhalten u. v. m.

Zur Sicherstellung der Qualität der Modelle muss die Modellierungsmethode den Modellersteller dazu in die Lage versetzen, die **Durchgängigkeit**⁵²⁷ der erzeugten Modelle sicherzustellen. Hierbei sind die Unterpunkte horizontale Durchgängigkeit, vertikale Durchgängigkeit und Konsistenz zu berücksichtigen. Diese drei Kriterien sollen in der vorliegenden Arbeit im Zuge der Validierung der Methode⁵²⁸ an einem ausgeführten SysML-Modell auf ihren Erfüllungsgrad untersucht werden. Dazu soll die Fähigkeit zur **horizontalen Durchgängigkeit** (d. h. Modell ist zeitlich durchgängig verwendbar) anhand der folgenden Kriterien messbar gemacht werden:

- Modell kann **erweitert** werden (Modell wird "breiter", indem neue Modellelemente auf **bestehenden Systemebenen** ergänzt werden)
- Modell kann **ausdetailliert** werden (Modell wird „tiefer“, indem **tiefere Systemebenen** und dazugehörige Modellelemente ergänzt werden)
- Modell kann **aktualisiert** werden (Modell wird auf den aktuellsten Stand gebracht, indem **bestehende Modellelemente angepasst** werden)

Die **vertikale Durchgängigkeit** soll durch die Struktur des Modells im Sinne der Systemtechnik (möglicher Wechsel der betrachteten Systemebenen) und die Verwendung der Modellierungssprache SysML (möglicher Wechsel des Blickwinkels auf das Modell) sichergestellt werden. Die Untersuchung der **Konsistenz** konzentriert sich auf den Abgleich der Inhalte von CAD- und SysML-Modell, aufgrund der vorherrschenden Rolle des CAD-Systems in der Serienentwicklung.

⁵²⁴ Siehe Kapitel 2.5.2

⁵²⁵ Siehe Kapitel 2.5.4

⁵²⁶ Albers, in Schmalenbach 2013

⁵²⁷ Siehe Kapitel 2.2.1

⁵²⁸ Siehe Kapitel 5.4.3

Unter dem Punkt **Umsetzung des MBSE-Ansatzes** befinden sich die restlichen Ziele. Zum einen soll zur Erzeugung der Modelle die **Modellierungssprache SysML**⁵²⁹ eingesetzt werden. Zum anderen sollen die Bedürfnisse der Entwickler (und späteren Anwender) durch einen **menschzentrierten Ansatz** in den Mittelpunkt gerückt werden⁵³⁰, um Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit der SysML-Modelle zu gewährleisten.

5.2 Modellierungsmethode

Dieses Kapitel stellt (korrespondierend zu Forschungsfrage 2.1) als Beitrag zur Karlsruher Schule eine neue Modellierungsmethode für SysML vor, die im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde. Sie basiert auf der von ALBERS und ZINGEL vorgestellten Modellierungsmethode⁵³¹, der den C&C²-Ansatz in die SysML implementiert. Im Unterschied zu diesem Ansatz, der auch Anwendungsfälle, Anforderungen und Aktivitäten in SysML abbildet, konzentriert sich die Modellierungsmethode der vorliegenden Arbeit auf den Funktions-Gestalt-Zusammenhang mit allen dazu erforderlichen Modellbestandteilen, wie vernetzter Bau- und Funktionsstruktur mitsamt Merkmalen und Eigenschaften der Wirkstruktur. Folglich wird der Ansatz von ALBERS und ZINGEL hauptsächlich auf diesem Gebiet weiterentwickelt. ZINGEL führt aus, dass die Modellierungsmethode für die Synthese neuer technischer Systeme gedacht ist, betont jedoch, dass auch Analysetätigkeiten durch retrospektive Modellierung bestehender Systeme möglich sind⁵³². Die SysML-Modelle, die in der vorliegenden Arbeit erstellt werden, sollen hauptsächlich zur **Analyse technischer Systeme** dienen, begründet durch die Ziele eines Systemmodells (Schaffen von Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen) und eines Referenzsystem-Modells (Speicherung und Weitergabe von Informationen). Auf diese Weise kann ein SysML-Modell das erforderliche Systemverständnis für anschließende Syntheseschritte schaffen, welche auch in anderen Produktmodellen stattfinden können, die in der Serienentwicklung weit verbreitet sind (u. a. Berechnungsmodelle oder CAD-Modelle).

Im Folgenden werden alle **Entitäten** und **Relationen** der neuen Modellierungsmethode einschließlich ihres Zwecks vorgestellt. Gemeinsam bilden sie das Metamodell. Die Abbildung 5.2 zeigt die SysML-Blöcke, die per Definition von Stereotypen aus dem SysML-Standard-Block abgeleitet werden, sowie die zum Einsatz kommenden Relationen.

⁵²⁹ Siehe Kapitel 2.5.4

⁵³⁰ Albers & Braun 2011a

⁵³¹ Siehe Kapitel 2.5.4

⁵³² Albers & Zingel 2013; Zingel 2013; Zingel, Albers, Matthiesen & Maletz 2012

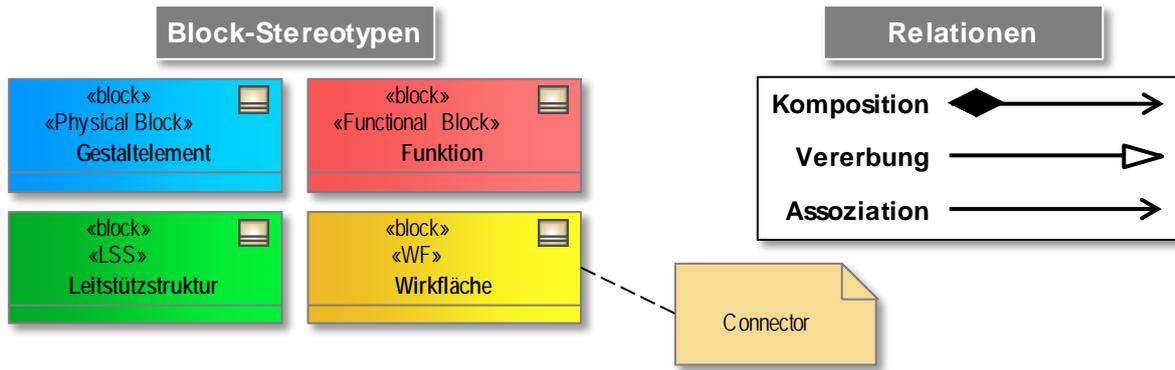


Abbildung 5.2: Definierte Block-Stereotypen und verwendete Relationen des Metamodells

Der blaue **Physical Block** repräsentiert stets **Gestaltelemente**. Gemäß der Systemtechnik können dies sowohl komplette technische Systeme, also Baugruppen unterschiedlichen Umfangs, als auch Subsysteme bis hinunter auf die Bauteilebene sein. Damit kann er flexibel eingesetzt werden und sämtliche Elemente eines CAD-Strukturbaums darstellen, der ebenfalls Baugruppen und Bauteile enthält. Weiterhin kann der Physical Block auch zur Darstellung von Fluiden (z. B. Kühl- und Schmiermedien) und Feldern (z. B. magnetischen und elektrischen Feldern) eingesetzt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, ein kompliziertes, physisch zusammenhängendes Bauteil (z. B. ein Gussgehäuse, zu sehen in Anhang C, Fallbeispiel 1) auf der nächsttieferen Systemebene in seine Gestaltelemente zu zerlegen, die wiederum mit Physical Blocks modelliert werden können. Eine solch detaillierte Modellierung bietet sich insbesondere bei Bauteilen an, die zwar in der Stückliste und im CAD-Strukturbaum als ein einziges Teil aufgeführt sind, jedoch aufgrund einer hohen Funktionsintegration sehr viele Wirkflächen besitzen (z. B. an Lagersitzen, Dichtungsaufnahmen, Flanschen und Bohrungen eines Gussgehäuses). In welchen Fällen ein solch hoher Detaillierungsgrad für die Modellierung gewählt wird, richtet sich danach, wie tief man ins technische System eintauchen muss, um einen technischen Sachverhalt und seinen Funktions-Gestalt-Zusammenhang ohne Informationsverlust abbilden zu können.

Der rote **Functional Block** wird verwendet, um **Funktionen** innerhalb der Funktionsstruktur zu modellieren. Der grüne Block für **Leitstützstrukturen** und der gelbe Block für **Wirkflächen** dienen zur Nachbildung der Leitstützstrukturen und Wirkflächen des C&C²-Ansatzes. Aus diesen beiden Block-Typen setzen sich die Wirknetze in den SysML-Modellen zusammen. Ein Wirkflächen-Block kann auch als Connector fungieren, indem er als ein solcher durch einen Kommentar in SysML gekennzeichnet wird. Ein Connector enthält im C&C²-Ansatz immer eine Wirkfläche und ein Modell von (Teil-)Systemen der Umgebung außerhalb des Gestaltungsraums. Um den Bedienkomfort zu erhöhen, kann der Connector in

SysML als Link fungieren, welcher zu einem Diagramm führt, das diese (Teil-)Systeme enthält (siehe Anhang C, Abbildung 9.4). Um die soeben vorgestellten Block-Typen miteinander zu vernetzen, kommen in der Modellierungsmethode die in der SysML spezifizierten Relationen **Komposition**, **Generalisierung** (auch Vererbung) und **Assoziation** zum Einsatz.

Nachdem die Entitäten und Relationen, aus denen sich das Metamodell zusammensetzt, vorgestellt worden sind, wird die **Vernetzung dieser Modellelemente** beispielhaft anhand des Wirknetzes eines kämmenden Zahnradpaars veranschaulicht (Abbildung 5.3). Um dieses Wirknetz darstellen zu können, werden in einem ersten Schritt **im Blockdefinitionsdiagramm (BDD, Abbildung 5.4) sämtliche benötigten Blocks definiert und vernetzt**. Daraufhin kann ein **Internes Blockdiagramm (IBD, Abbildung 5.5)** erzeugt werden, welches das eigentliche **Wirknetz enthält** und sozusagen das Innere des Functional Blocks zeigt. Zur transparenten Darstellung eines solchen technischen Sachverhalts werden die Wirknetze (Abbildung 5.3) stets gemeinsam mit den Blöcken im BDD (Abbildung 5.4) dargestellt. In der vorliegenden Arbeit werden sie jedoch zur besseren Lesbarkeit in getrennten Abbildungen gezeigt.

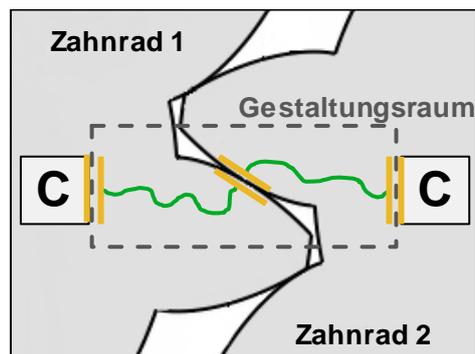


Abbildung 5.3: Kämmendes Zahnradpaar mit Wirknetz „Zahnnormalkraft übertragen“

Die **Kompositionen** sorgen dafür, dass, sobald ein Physical Block bzw. Functional Block entfällt, automatisch auch die zugehörigen LSS- und WF-Blöcke entfallen bzw. inaktiv werden. Diese existenzabhängigen Beziehungen stehen in Analogie zum realen System: Entfällt dort ein Gestaltelement bzw. wird eine Funktion nicht mehr benötigt, so entfallen auch die Elemente des zugehörigen Wirknetzes bzw. so gehört das Wirknetz dann zum inaktiven Teil der Wirkstruktur.

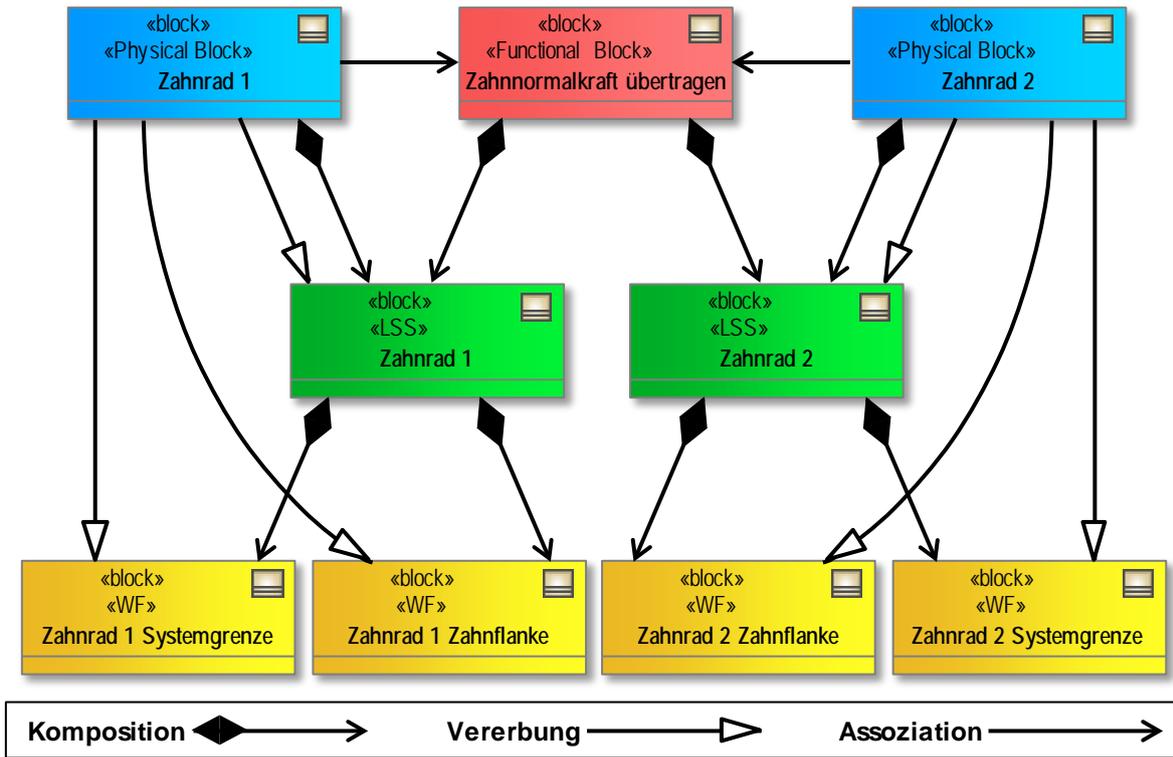


Abbildung 5.4: Vernetzung der Modellelemente des Zahnradpaars im BDD

Die **Generalisierung** ermöglicht die **Vererbung von Merkmalen und Eigenschaften** (analog ALBERS und ZINGEL⁵³³) der LSS und WF auf den zugehörigen Physical Block. Somit sind die Merkmale und Eigenschaften, die als Attribute der LSS- und WF-Blöcke angelegt werden, später ebenfalls im Physical Block ersichtlich. Als Neuerung gegenüber der bisherigen Modellierungsmethode können nun Merkmale und Eigenschaften der WF-Blöcke analog der Merkmale und Eigenschaften der LSS-Blöcke vererbt werden. Die **Assoziation** stellt den Zusammenhang zwischen den Physical Blocks und den Functional Blocks her, bildet somit die Verbindung zwischen einem Element der Baustruktur und einem Element der Funktionsstruktur. Diese Assoziation ermöglicht es, die im Zielsystem der Methode geforderten **bauteil-** und **funktionszentrierten Ansichten** zu erzeugen.

Zur Darstellung des Wirknetzes kommt ein IBD zum Einsatz (Abbildung 5.5). Hierbei gilt: Es wird nur ein Wirknetz pro Diagramm dargestellt, um die Übersichtlichkeit des Modells zu wahren.

⁵³³ Albers & Zingel 2013; Zingel 2013

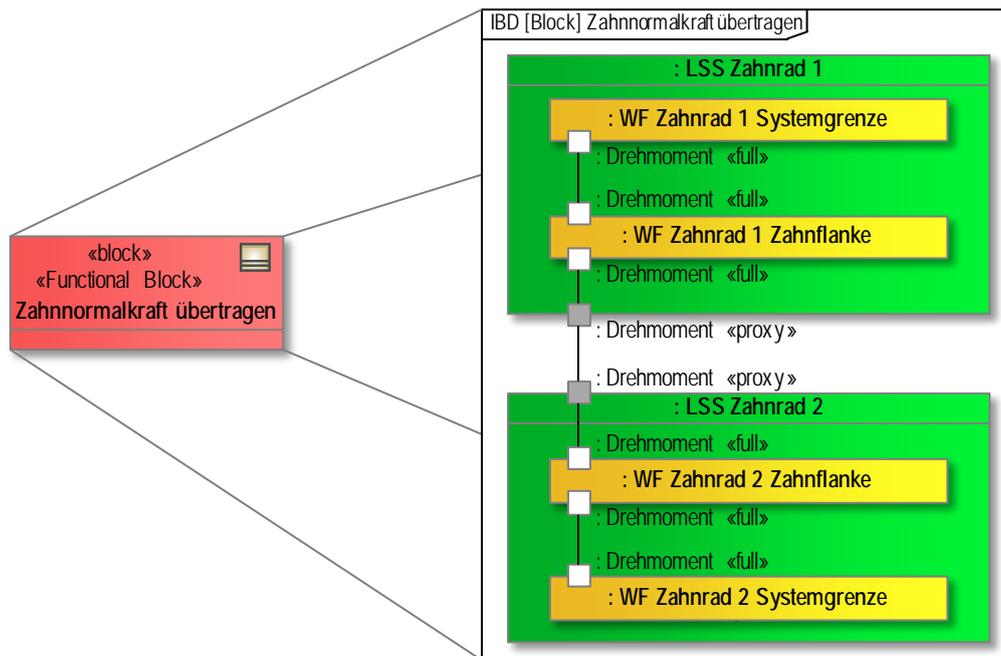


Abbildung 5.5: Wirknetz des Zahnradpaars im IBD und zugehöriger Functional Block

Aufgrund der Kompositionsbeziehung zwischen LSS- und WF-Blöcken im BDD (vgl. Abbildung 5.4) werden die WF-Blöcke innerhalb der LSS-Blöcke dargestellt. Die Full Ports (weiß) der WF-Blöcke und die Proxy Ports (grau)⁵³⁴ der LSS-Blöcke bilden gemeinsam mit den Verbindungslinien den **Objektfluss**, der zur genaueren Bezeichnung seines Zwecks nach **Energie-**, **Stoff-** und **Informationsfluss** unterschieden werden kann⁵³⁵. Als sinnvolle Erweiterung dieser Klassifizierung hat sich bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes der **Kraftfluss** (dem Energie-Objektfluss zugehörig) bewährt, weil er bei der Modellierung sehr häufig zum Einsatz kommt. Überdies kann der C&C²-Ansatz mithilfe des Kraftflusses auch Konstrukteuren, die den Ansatz noch nicht oft angewendet haben, leicht nähergebracht werden. Die Art des Objektflusses kann durch die Zuordnung einer physikalischen Größe näher spezifiziert werden (z. B. beim Kraftfluss: Drehmoment, Schwingungen; beim Stofffluss: Kühlmittelvolumenstrom, Leckagepfad für Schmiermittel), welche im Namen der Ports abgelesen werden kann.

Die **Baustruktur** wird in der Modellierungsmethode durch BDD-Diagramme dargestellt, in denen alle Physical Blocks mithilfe der Komposition hierarchisch miteinander vernetzt sind (Abbildung 5.6 links; größere Darstellung siehe Anhang C, Abbildung 9.1). Das Ordnungskriterium der Baustruktur entspricht dem des CAD-Modells des technischen Systems. Die Identifikation der Bauteile wird durch die

⁵³⁴ Zu Definition und Zweck der Port-Typen wird auf WEILKIENS verwiesen (Weilkiens 2014).

⁵³⁵ Zingel 2013

Verwendung der gleichen Namen wie im CAD-Modell ermöglicht. Damit finden die Entwickler eine ihnen **bekannte Struktur** vor, anhand derer sie sich in den SysML-Modellen zurechtfinden können.

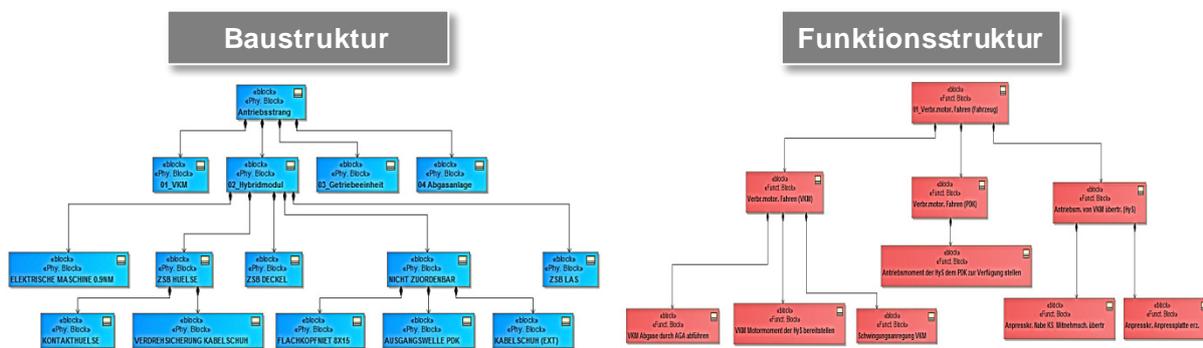


Abbildung 5.6: Baustruktur und Funktionsstruktur (Auszüge) des SysML-Modells eines Hybridmoduls

Als Pendant zur Baustruktur gliedert die **Funktionsstruktur** alle Functional Blocks des SysML-Modells, ebenfalls unter Einsatz der Komposition in BDD-Diagrammen (Abbildung 5.6 rechts; größere Darstellung siehe Anhang C, Abbildung 9.2). Als Ordnungskriterium der Funktionsstruktur wurde ein **hierarchisches Konzept** ausgewählt, in dem sich Gesamtfunktionen aus Teilfunktionen zusammensetzen.

5.3 Anwendung und initiales Systemmodell

Dieser Abschnitt behandelt die Erzeugung eines SysML-Produktmodells mithilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modellierungsmethode. Dieser Arbeitsschritt wird als Verifikation der Methode genutzt, da hiermit ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden kann. Zunächst wird der Umfang des initialen Systemmodells erläutert (Kapitel 5.3.1). Danach wird anhand ausgewählter Beispiele demonstriert, wie das SysML-Modell die Serienentwicklung von Baukästen unterstützen kann (Kapitel 5.3.2). Abschließend werden die Ergebnisse der Verifikation zusammengefasst und daraus weiterführende Ziele für die sich anschließende Validierung abgeleitet (Kapitel 5.3.3).

5.3.1 Umfang des initialen Systemmodells

Die Modellierungsmethode wurde im Rahmen der Abschlussarbeit von WEIßINGER⁵³⁶ eingesetzt, um ein initiales Systemmodell einer neuen Hybridmodulgeneration für einen P2-Hybrid-Triebstrang⁵³⁷ zu erstellen. Dieses Hybridmodul ist Bestandteil eines existierenden Hybridmodul-Systembaukastens mit bereits fertig entwickelten

⁵³⁶ Weißinger 2014, betreute Abschlussarbeit

⁵³⁷ Siehe Kapitel 2.1.1

Hybridmodulgenerationen, mit denen es – aufgrund des Gleichteileprinzips der Baukastenentwicklung – einen **hohen Übernahmevariations-Anteil** gemein hat.

Das initiale Systemmodell enthält die komplette **Baustruktur** des Hybridmoduls, dessen wichtigste **Hauptfunktionen** sowie die Modellelemente zur Darstellung der zugehörigen **Wirknetze** mithilfe des C&C²-Ansatzes. Die Detaillierung der Baustruktur endet auf Ebene der Bauteile, die nicht weiter in ihre Gestaltelemente zerlegt sind. Unter den Hauptfunktionen werden die möglichen Betriebszustände eines Vollhybrid-Triebstrangs⁵³⁸ mit ihren Unterfunktionen und Wirknetzen auf Systemebene verstanden (z. B. alle Kraft- und Drehmomentflüsse durch das Hybridmodul). Gleichwohl wurden einige Subsysteme des Hybridmoduls etwas stärker ausdetailliert, um die Modellierbarkeit auf unterschiedlichen Systemebenen testen zu können. Dieser Detaillierungsgrad des SysML-Modells reicht bereits aus, um die grundlegende Funktionstüchtigkeit der Modellierungsmethode zu erproben. Das initiale Systemmodell bietet somit einen Grundstock zur Darstellung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs, der in der darauffolgenden Nutzungsphase des SysML-Modells sukzessive durch detailliertere Darstellungen technischer Sachverhalte angereichert werden kann.

Die Modellierung von technischen Sachverhalten, die Wechselwirkungen über die Systemgrenze des Hybridmoduls hinweg enthalten, wurde anhand ausgewählter Beispiele untersucht (darunter z. B. Schwingungen, die von der VKM ausgehen und Subsysteme des Hybridmoduls mechanisch beanspruchen). Da von den Nachbarsystemen (v. a. VKM & Getriebe) keine SysML-Modelle vorlagen, wurden die **Nachbarsysteme als Partialmodell** so erstellt, dass die betroffenen Funktionen einschließlich ihrer Wirknetze über die Systemgrenze hinweg modelliert werden konnten. An einem Connector können diese Diagramme, die die Nachbarsysteme darstellen, in SysML verlinkt werden. So lassen sich Ansichten des (Partial-)Modells bzw. der Struktur des Nachbarsystems schnell erreichen (siehe Anhang C, Abbildung 9.4). Als Modellierungstool wurde Cameo Systems Modeler der Firma No Magic verwendet.

5.3.2 Anwendung des initialen Systemmodells

Dieses Kapitel gewährt einen Einblick in das initiale Systemmodell des Hybridmoduls⁵³⁹ anhand beispielhafter Darstellungen, mit denen veranschaulicht wird, wie das SysML-Modell die Serienentwicklung von Hybridbaukästen unterstützen kann. Die **Modellierbarkeit des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs**

⁵³⁸ Siehe Kapitel 2.1.1

⁵³⁹ Siehe Kapitel 2.1

soll am Beispiel der Funktion „elektrisches Fahren“ des Hybridmoduls⁵⁴⁰ demonstriert werden. Hierzu zeigt Abbildung 5.7 Auszüge der zugehörigen BDD (links) und IBD (rechts).

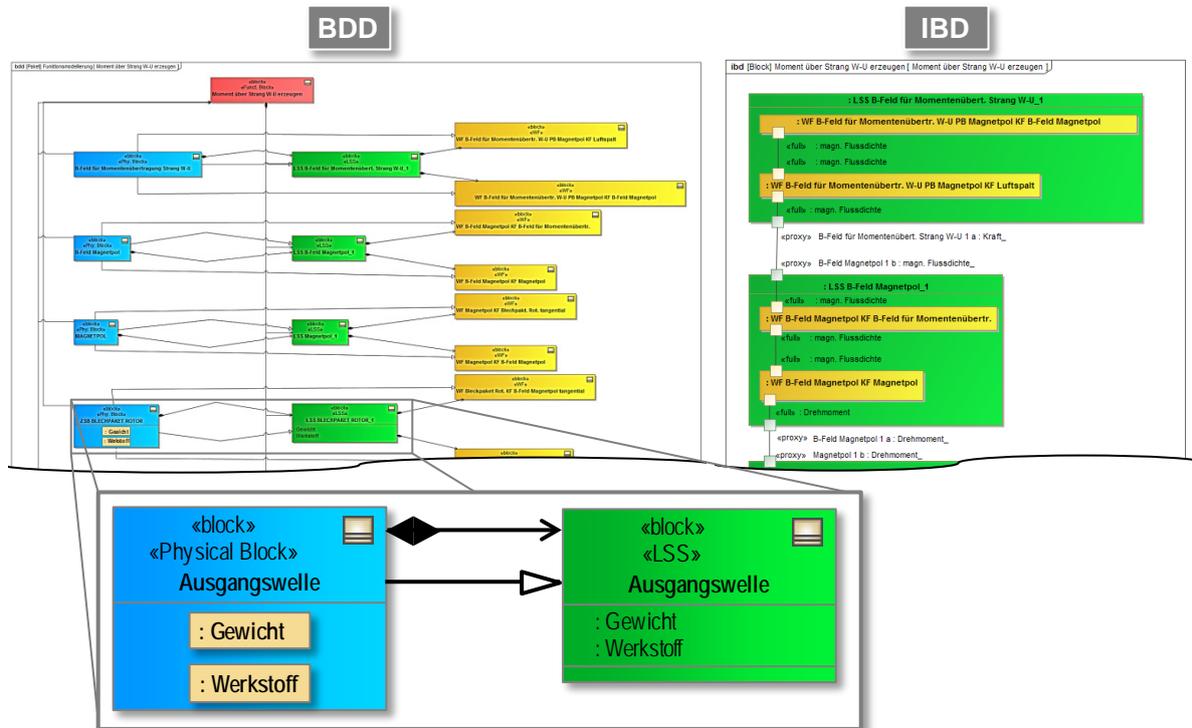


Abbildung 5.7: BDD und IBD der Hybridmodul-Funktion „elektrisches Fahren“

Das IBD ist im SysML-Modell durch einen Doppelklick auf den Functional Block im BDD erreichbar, denn das IBD stellt mit der Flussdarstellung des Wirknetzes das „Innenleben“ der Funktion dar. Durch diesen Objektfluss im IBD werden die im BDD definierten Wirkflächen zu Wirkflächenpaaren kombiniert, was gemäß dem C&C²-Ansatz erfüllt sein muss, damit sie gemeinsam mit den LSS eine Funktion ausüben können. Die Funktion „elektrisches Fahren“ stellt einen Energiefluss dar, der die Wandlung eines Dreiphasen-Wechselstroms in ein Drehmoment zum Antrieb des Hybridfahrzeugs beschreibt⁵⁴¹. Das magnetische Feld, das zur Beschreibung des Wirkprinzips der elektrischen Maschine benötigt wird, kann dabei nach MATTHIESEN als Gestaltelement (d. h. Physical Block) modelliert werden⁵⁴². So wird gezeigt, dass nicht nur Bauteile, sondern auch Felder modelliert werden können.

Die **Modellierbarkeit von Produktinformationen**, welche häufig aus Details der konstruktiven Ausgestaltung bestehen, ist durch die Modellierung von

⁵⁴⁰ Die zugehörige Baustruktur und Funktionsstruktur sind in Abbildung 5.6 zu sehen.

⁵⁴¹ Zur ausführlicheren Beschreibung der Wirkungsweise von elektrischen Maschinen sei auf folgende Fachliteratur verwiesen: Hofmann 2014, Binder 2012.

⁵⁴² Matthiesen 2002

funktionsrelevanten Merkmalen und Eigenschaften der LSS und WFP sichergestellt. Diese Merkmale und Eigenschaften werden mithilfe der Vererbungsbeziehung zum zugehörigen Physical Block auch am betroffenen Bauteil im SysML-Modell sichtbar, wie es in der Vergrößerung in Abbildung 5.7 anhand der Werkstoff- und Gewichtsangabe gezeigt ist (weiteres Beispiel zur Vererbung funktionsrelevanter Merkmale und Eigenschaften siehe Anhang C, Fallbeispiel 2).

Das nachstehende Beispiel soll den Einsatz der **bauteil- und funktionszentrierten Ansichten** zur Unterstützung der Entwickleraktivitäten demonstrieren. Diese Ansichten können bei Bedarf jederzeit zur Bearbeitung individueller Entwicklungsaufgaben erzeugt werden. So ist der Entwickler in der Lage, sich jederzeit selbst eine passende Ansicht zu erzeugen, und ist nicht ausschließlich auf bereits bestehende Ansichten des SysML-Modells angewiesen.

Zu den Aufgaben des Hybridmoduls gehört es, das Drehmoment der VKM während der verbrennungsmotorischen Fahrt an die Eingangswelle des Getriebes zu leiten⁵⁴³. Das BDD und das zugehörige Wirknetz dazu sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

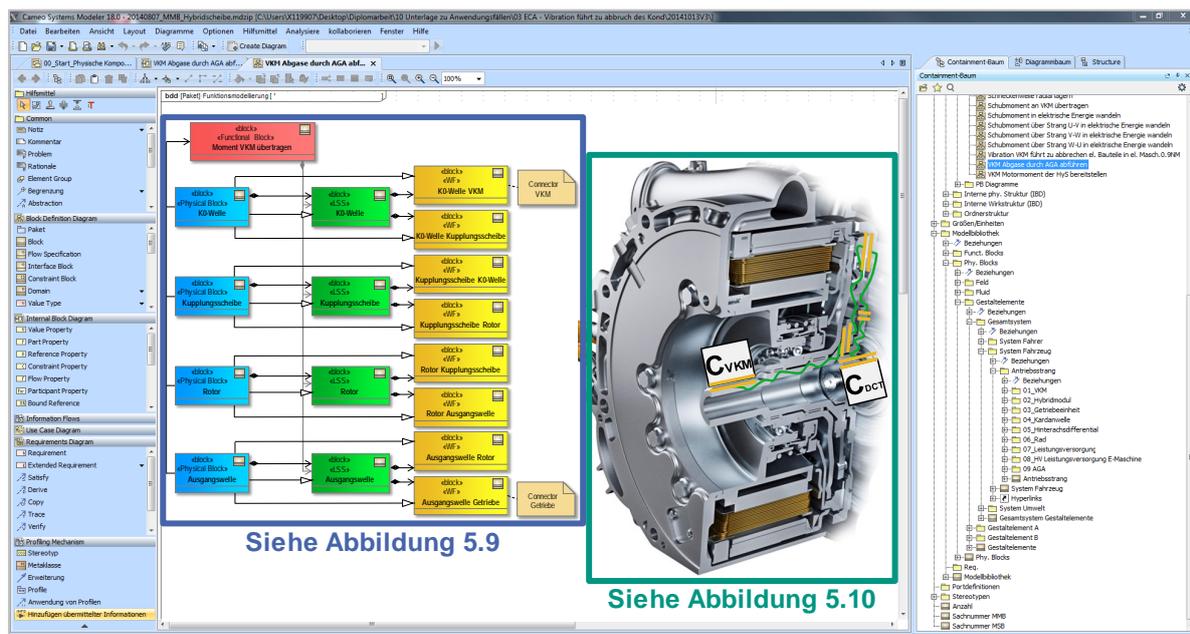


Abbildung 5.8: Gemeinsame Darstellung der SysML-Blöcke (links) und des C&C²-Wirknetzes (rechts) in einem BDD

Zur besseren Lesbarkeit werden diese beiden Bestandteile in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 nochmals gezeigt.

⁵⁴³ Siehe Kapitel 2.1; Weitere Ansichten zu diesem Beispiel siehe Anhang C, Fallbeispiel 1.

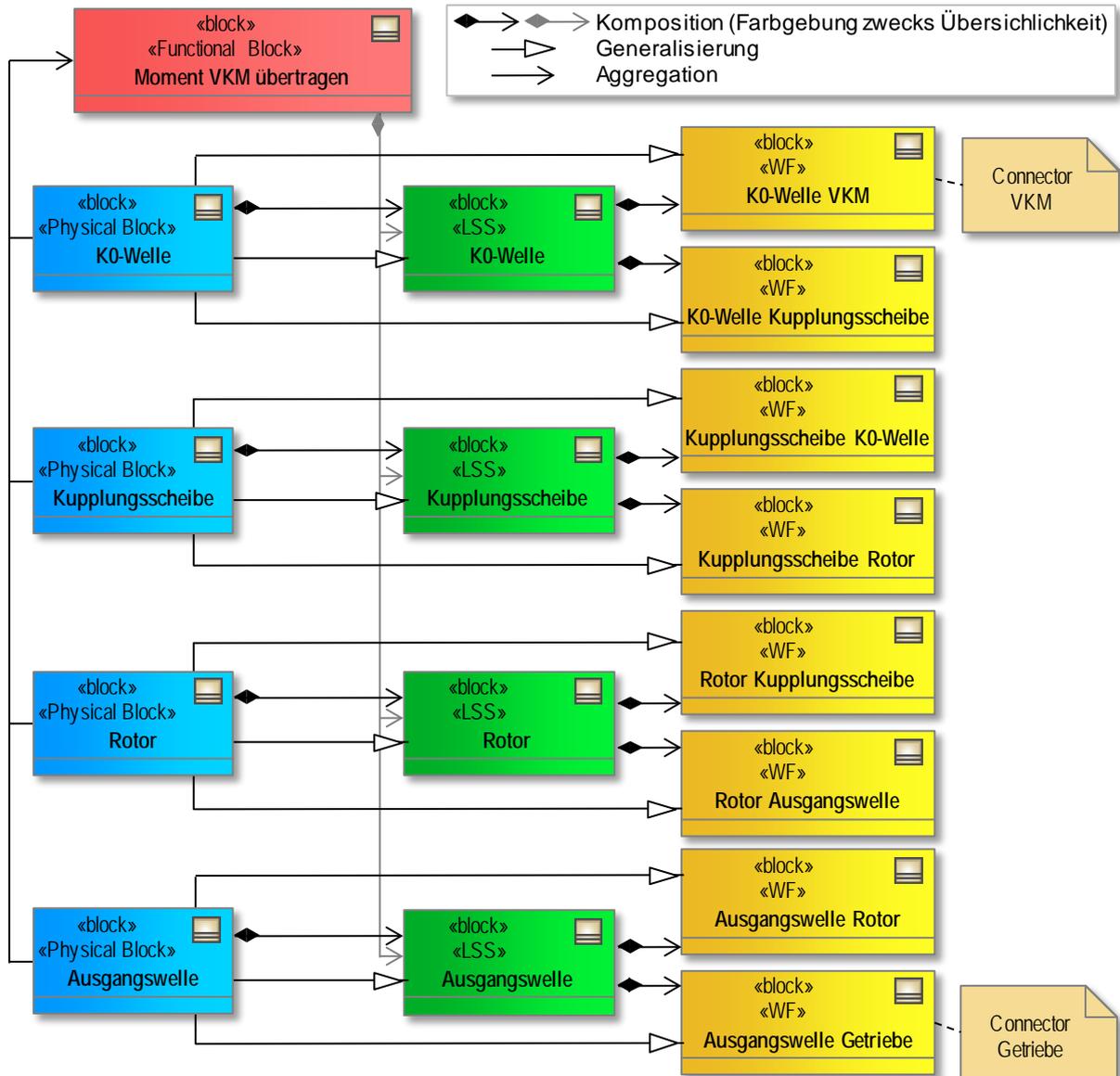


Abbildung 5.9: BDD der Funktion „Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten“⁵⁴⁴

Angenommen, ein Entwickler erhält die Aufgabe, das Hybridmodul einer neuen Generation im Vergleich zur vorherigen so zu optimieren, dass das maximale Drehmoment der VKM um 100 Nm erhöht werden kann: Bevor er nun die Attribute einzelner Bauteile des Hybridmoduls im Kraftfluss des VKM-Drehmoments konstruktiv anpasst, kann er sich durch die funktionszentrierte Ansicht in SysML (Abbildung 5.11) über alle Bauteile (Blöcke A) informieren, die an der Erfüllung der Funktion *Moment VKM übertragen* beteiligt sind (Block B).

⁵⁴⁴ Das zugehörige IBD dieser Funktion ist in Anhang C, Fallbeispiel 1, abgebildet.

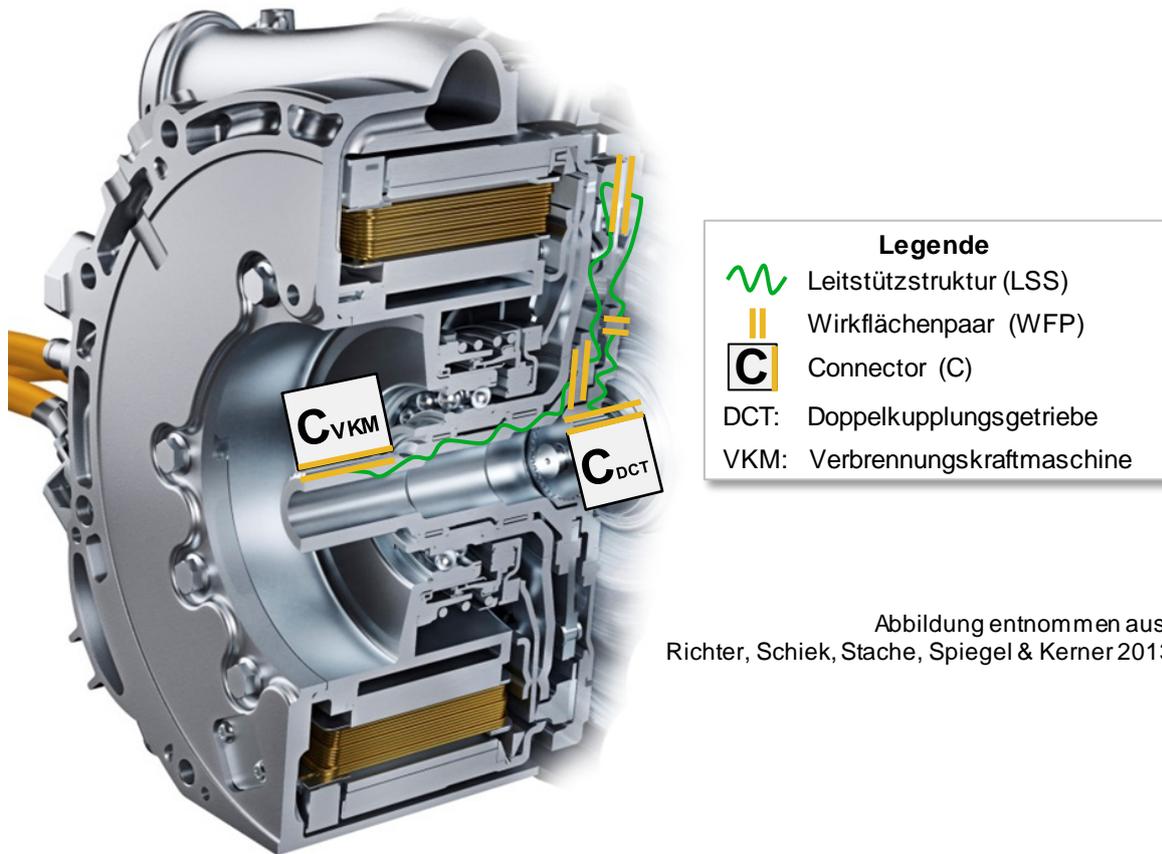


Abbildung entnommen aus:
Richter, Schiek, Stache, Spiegel & Kerner 2013

Hinweise

Aus Geheimhaltungsgründen wurde der CAD-Screenshot des ursprünglichen SysML-Modells durch eine Abbildung der Vorgänger-Generation des Hybridmoduls ersetzt. Das eingezeichnete Wirknetz ist jedoch identisch.

Abbildung 5.10: Wirknetz der Funktion „Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten“

Zusätzlich kann sich der Entwickler zur Funktion *Moment VKM übertragen* alle Unterfunktionen anzeigen lassen (Blöcke C). Eine dieser Unterfunktionen lautet *Anpresskraft Kupplungsscheibe erzeugen*, da die Trennkupplung im Drehmomentfluss der VKM eingebunden ist. Zu dieser Unterfunktion lassen sich wiederum alle beteiligten Bauteile anzeigen (Blöcke D), unter denen sich auch die Membranfeder befindet. Um die Trennkupplung für das höhere VKM-Drehmoment auszulegen, könnte der Entwickler also die Federsteifigkeit der Membranfeder erhöhen, damit die Anpresskraft an der Trennkupplung steigt. Bevor der Entwickler diese Maßnahme umsetzt, kann er zunächst in der bauteilzentrierten Ansicht prüfen, ob durch seine geplante Optimierung der Membranfeder ungewollte Wechselwirkungen zu benachbarten Subsystemen entstehen können, beispielsweise zum Aktuierungssystem der Trennkupplung: Erhöht sich nämlich die Federsteifigkeit der Membranfeder, so steigen auch die Betätigungskräfte des Aktuierungssystems zum Öffnen der Trennkupplung (Block E), was dazu führen kann, dass die erforderliche Verstellgeschwindigkeit und -genauigkeit nicht mehr erreicht wird.

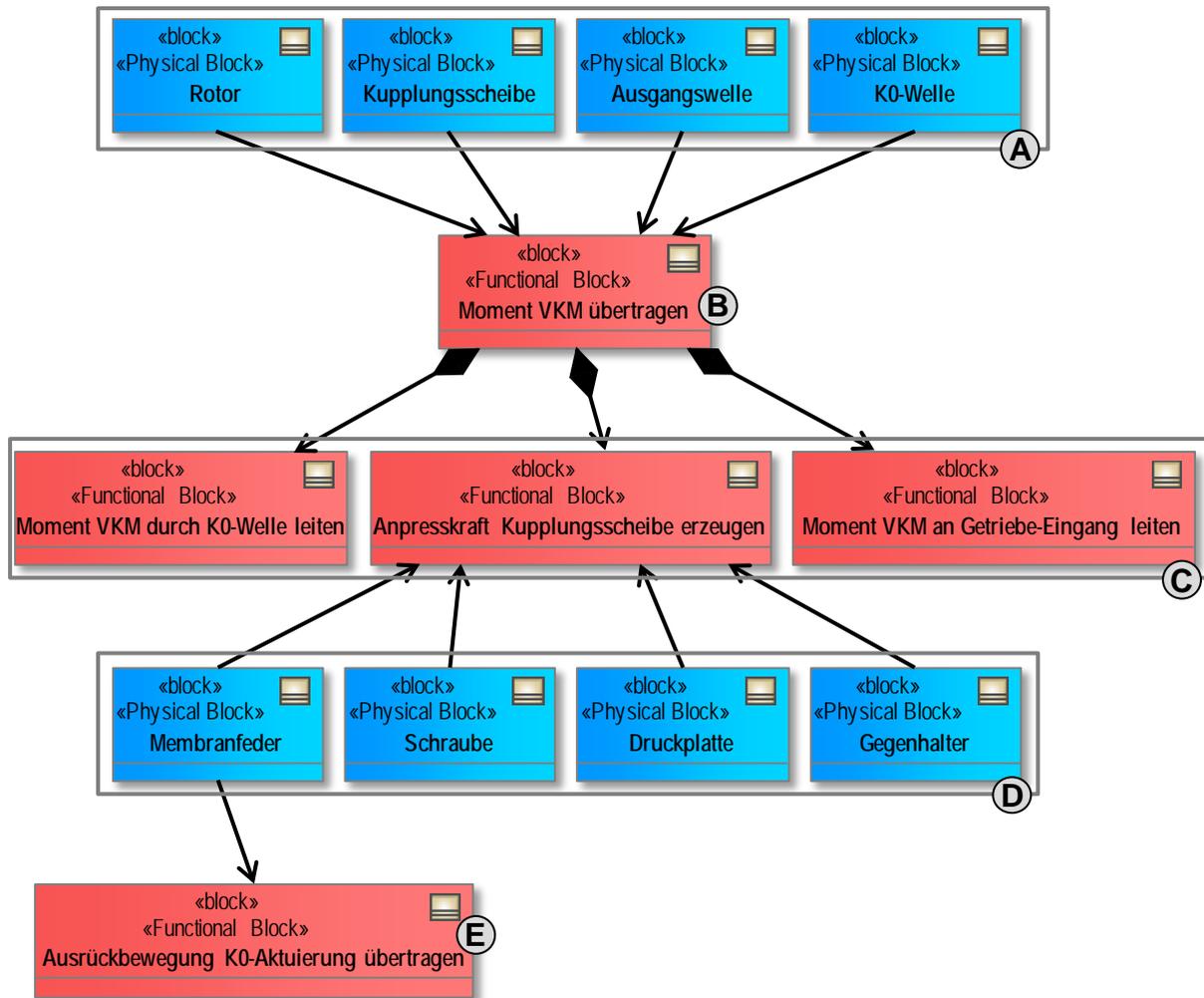


Abbildung 5.11: Funktions-Gestalt-Zusammenhänge zur Funktion „Moment VKM übertragen“

Dieses Praxisbeispiel verdeutlicht, dass der Entwickler durch die bauteil- und funktionszentrierten Ansichten des SysML-Modells in der Analyse des technischen Systems unterstützt wird. Auf diese Weise sinkt die Gefahr, wichtige Wechselwirkungen zu übersehen.

5.3.3 Ergebnisse der Verifikation

Bei der Modellierung des initialen Systemmodells eines Hybridmoduls⁵⁴⁵ konnte gezeigt werden, dass die neue **Modellierungsmethode in der Lage** ist, die Produktarchitektur und den **Funktions-Gestalt-Zusammenhang** eines technischen Systems mithilfe des C&C²-Ansatzes in SysML **darzustellen**. Sowohl Funktionen auf hoher Systemebene als auch detaillierte technische Sachverhalte (darunter auch magnetische Felder) konnten erfolgreich modelliert werden. Die **Sicherung von**

⁵⁴⁵ Siehe Kapitel 2.1

Prinzip- und Gestaltinformationen gelingt über die Modellierung von Merkmalen und Eigenschaften der Wirknetze (Abbildung 5.7). Weiterhin kann die Modellierungsmethode mit ihren bauteil- und funktionszentrierten Ansichten **Transparenz bei den Wirkstrukturen** des technischen Systems schaffen.

Aus der Verifikation lässt sich auch **weiterführender Untersuchungsbedarf** für die anschließende Validierung ableiten. Die Erstellung, Bedienung und Anwendung des Modells erfolgte während der Verifikationsphase ausschließlich durch die Modellersteller. Deswegen sollen in der Validierungsphase auch **Entwickler** – als die vorgesehenen Nutzer des SysML-Modells – im Sinne eines menschenzentrierten MBSE-Ansatzes **einbezogen werden**. Überdies hat die Verifikation zu neuen Erkenntnissen geführt, die den Bedarf an tiefergehenden Untersuchungen aufdecken. So war die Erstellung des initialen Systemmodells mit einem hohen Modellierungsaufwand verbunden, wie die aufgewendete Zeit von über 100 Arbeitsstunden zeigen. In der Validierung soll versucht werden, die Ursachen für den entstehenden **Aufwand zur Pflege und Nutzung** der Modelle aufzudecken und diesen Ursachen den anteiligen Zeitaufwand zur Modellierung zuzuordnen. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt der Validierung des SysML-Modells soll die **Rolle des CAD-Systems** sein, denn in der Erstellungsphase des initialen SysML-Modells wurde das CAD-System häufig genutzt, um das erforderliche Systemverständnis für die Modellierung der technischen Sachverhalte zu schaffen⁵⁴⁶. Deswegen wird in der Nutzungsphase des SysML-Modells analysiert, welche Rolle das CAD-System spielt und ob künftig eine bessere Vernetzung von CAD- und SysML-Modell Vorteile in der Anwendung bringen kann.

5.4 Validierung der Methode

In diesem Kapitel wird das SysML-Modell mit dem Funktions-Gestalt-Zusammenhang, dessen Erstellung im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, einer Validierung unterzogen. Dazu werden Daten sowohl zur Funktionstüchtigkeit der Modellierungsmethode als auch zu Nutzen und Zeitaufwand von SysML-Modellen in der Serienentwicklung von Baukästen erfasst und ausgewertet. So können einerseits zu **Vorzügen** und andererseits zu noch **unerschlossenen Potenzialen** wichtige Einblicke gewonnen werden, zumal da zum Einsatz von SysML in der Serienentwicklung bislang kaum Erfahrungswerte vorliegen. Aufgrund der bekannten Hindernisse bei der Einführung des MBSE-Ansatzes und seiner

⁵⁴⁶ Weisinger 2014, betreute Abschlussarbeit

Methoden in der Ingenieurspraxis⁵⁴⁷ kommt der **Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen** der SysML-Modelle eine besondere Bedeutung zu.

Im Zuge der Validierung wurden drei Untersuchungen durchgeführt (Abbildung 5.12). Als Ergebnis einer teilnehmenden Studie wird ein **Impact Model** nach BLESSING und CHAKRABARTI⁵⁴⁸ vorgestellt, das die Einflussgrößen auf die Akzeptanz eines neu eingeführten MBSE-Ansatzes systematisch darstellt (Kapitel 5.4.1). In **Experteninterviews** werden Entwickler befragt und gebeten, eine Potenzialeinschätzung zur Nützlichkeit der SysML-Modelle abzugeben und sie ihrer Bereitschaft, die Modelle zu erstellen und zu pflegen, gegenüberzustellen (Kapitel 5.4.2).

	Nutzen	Aufwand
Impact Model	Ermittlung der <u>Einflussgrößen</u> auf die <u>Akzeptanz</u> des MBSE-Ansatzes	
Experten-interviews	<u>Potenzialeinschätzung</u> - Steigerung Systemverständnis - Personenungebundens Wissensmanagement	<u>Bereitschaft zu Erstellung & Pflege</u> des Modells
Praxistest	<u>Entwickler-Feedbackgespräch</u> - Darstellungsweise & Bedienbarkeit - Wissenstransfer Lessons Learned	- Auswertung <u>Modellierungszeiten</u> - Ergonomie & Bedienkomfort

Abbildung 5.12: Studien zur Validierung von SysML-Modellen in der Serienentwicklung

Die dritte Untersuchung ist ein **Praxistest**, in dem das initiale Systemmodell⁵⁴⁹ um technische Sachverhalte in Form von Lessons Learned und Best Practices angereichert wird. Während dieser Modellerweiterung werden zum einen Daten zur Erfassung des Modellierungsaufwands gesammelt. Zum anderen wird der Nutzen des SysML-Modells mithilfe eines Feedbackgesprächs mit den Entwicklern eines Hybrid-Entwicklungsteams durchgeführt (Kapitel 5.4.3).

5.4.1 Impact Model

Dieser Abschnitt der Arbeit erläutert den Kontext, in dem die Validierung der Methode in der Serienentwicklung von Baukästen erfolgt. Dies geschieht mithilfe

⁵⁴⁷ Diskussion siehe Kapitel 2.2.1

⁵⁴⁸ Blessing & Chakrabarti 2009

⁵⁴⁹ Siehe Kapitel 5.3

eines Impact Models nach BLESSING und CHAKRABARTI⁵⁵⁰, das **Einflussfaktoren und Wechselwirkungen der Untersuchungsumgebung** untereinander verbindet. Dieses Impact Model kann in zwei Teile untergliedert werden: Der erste (Abbildung 5.13) umfasst allgemeingültige Einflussgrößen. Sie sollen – zusätzlich zur Verwendung in der vorliegenden Arbeit – als Vorlage und Ausgangsbasis für ähnliche Untersuchungen anderer Autoren (d. h. Erforschung von Praxistauglichkeit und Akzeptanz von MBSE-Methoden in der industriellen Ingenieurspraxis) dienen. Der zweite Teil des Impact Models (Abbildung 5.14) beschreibt hingegen die spezifischen Einflussgrößen der in dieser Arbeit entwickelten Modellierungsmethode.

Zunächst sei noch erwähnt, dass es über die hier beschriebenen Zusammenhänge hinaus viele **weitere Wechselwirkungen** im Umfeld der Praxisuntersuchung von modellbasierten Ansätzen gibt. An dieser Stelle werden nur die wichtigsten vorgestellt. Wird das hier vorgestellte Impact Model in weiteren Forschungsvorhaben eingesetzt, sollte es punktuell weiter ausdetailliert und an die vorliegenden Bedürfnisse angepasst werden, zumal da die Unternehmensleitung vor Einführung neuer Methoden im Kontext des MBSE-Ansatzes häufig eine **fallspezifische Untersuchung** fordert⁵⁵¹. Die Darstellungsweise in Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14 ist so zu lesen: Ein Pfeil sagt aus, dass eine Verbesserung des Kriteriums des Start-Blocks eine Verbesserung des Kriteriums des Ziel-Blocks zur Folge hat. Beispielsweise erhöht die Bekanntheit einer Methode deren Akzeptanz beim Entwickler. Ein Pfeil mit Minus-Symbol symbolisiert dagegen eine Verschlechterung des Kriteriums des Ziel-Blocks. Der Inhalt dieser Zusammenhänge wird nun beschrieben.

Als Kern-Zielgröße der Untersuchungen wurde die **Akzeptanz des Entwicklers** für den MBSE-Ansatz gewählt, denn in ihr spiegelt sich u. a. wider, ob sich **Aufwand und Nutzen des MBSE-Ansatzes** in einem gesunden Verhältnis befinden. Durch die Messung der Akzeptanz werden zudem Defizite von Entwicklungsmethoden erkennbar.

⁵⁵⁰ Blessing & Chakrabarti 2009

⁵⁵¹ Endler, Steffen, Lohberg & Munker 2013

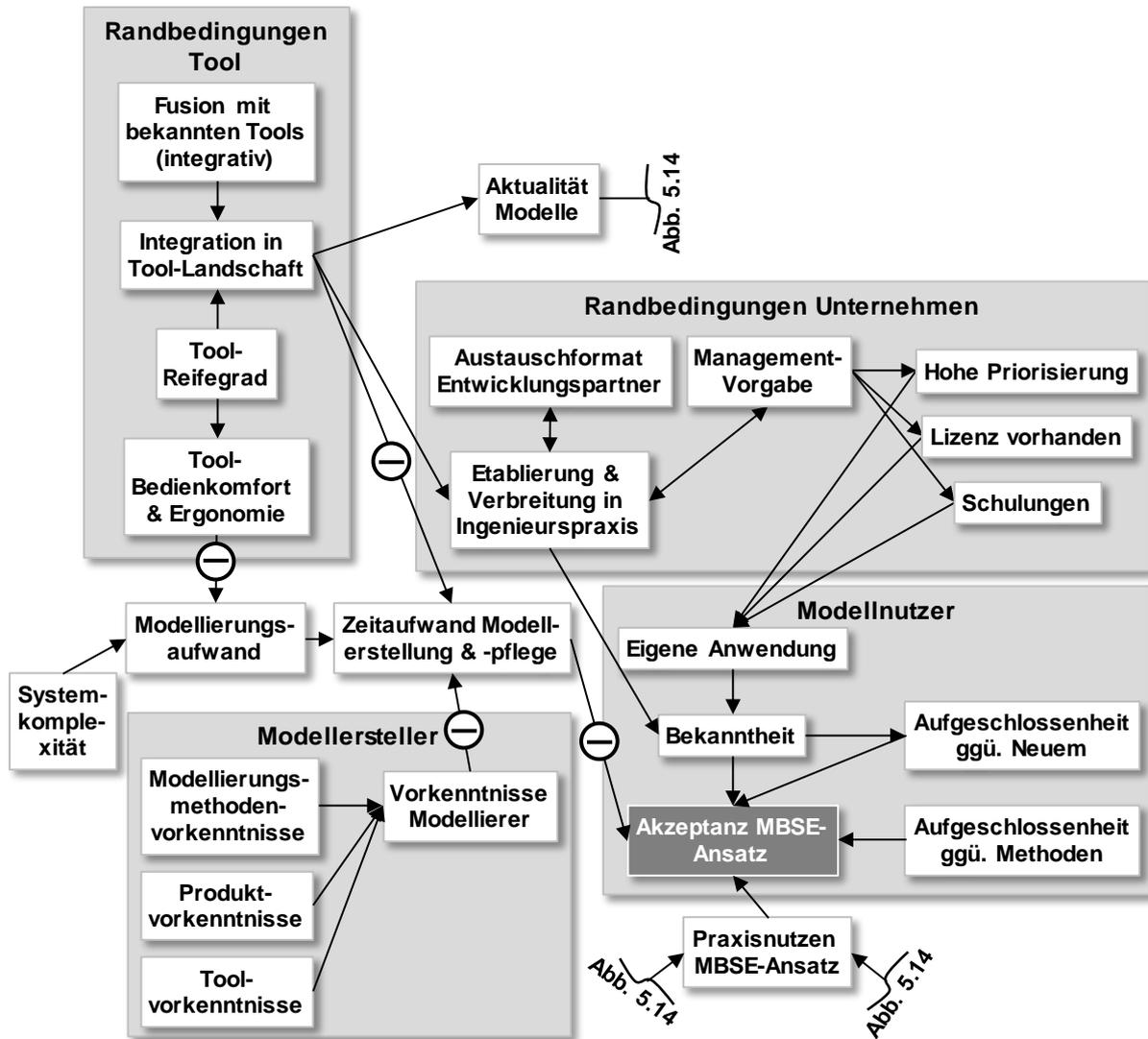


Abbildung 5.13: Allgemeine Einflussgrößen auf Akzeptanz eines MBSE-Ansatzes

Die Grundvoraussetzung für die *Akzeptanz des MBSE-Ansatzes* des **Modellnutzers** ist der *Praxisnutzen des MBSE-Ansatzes*. Der *Zeitaufwand für Modellerstellung und -pflege* wirkt sich hingegen negativ auf die Akzeptanz des Entwicklers aus. *Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem* und *Aufgeschlossenheit gegenüber Entwicklungsmethoden* steigern die Akzeptanz⁵⁵². Ebenso steigert die *Bekanntheit* des MBSE-Ansatzes und seiner Methoden – u. a. hervorgerufen durch die *eigene Anwendung* – die Bereitschaft des Entwicklers, den MBSE-Ansatz und seine Methoden einzusetzen.

Die Bekanntheit und die eigene Anwendung werden außerdem von den **Randbedingungen des Unternehmens** beeinflusst: Die *eigene Anwendung* stellt sich am ehesten ein, wenn der Entwickler dem Einsatz des MBSE-Ansatzes eine

⁵⁵² Stechert 2010, dort nach Rupp 2007

hohe Priorisierung einräumt, eine *Tool-Lizenz* vorhanden ist und er eine *Schulung*⁵⁵³ erhalten hat. Diese drei Aspekte werden durch die *Vorgabe des Managements* (z. B. Vorgesetzte, Unternehmensleitung), den Ansatz einzusetzen, gefördert. Diese Entscheidung des Managements hängt wiederum wechselseitig ab von der *Etablierung und Verbreitung* des Ansatzes in der Ingenieurspraxis. Dies wird u. a. beeinflusst von dem benötigten *Austauschformat von Daten und Informationen mit den Entwicklungspartnern* (z. B. Entwicklungsdienstleister, Systemlieferanten).

Als nächstes wird das Cluster des **Modell-Erstellers** vorgestellt. Je mehr *Vorkenntnisse* der Modell-Ersteller zu *Modellierungsmethoden, Tools* und zum *Produkt* besitzt, desto geringer fällt der *Zeitaufwand für Modellerstellung und -pflege* aus. Die Rolle von Modellersteller und Modellnutzer kann von ein und demselben oder von unterschiedlichen Teammitgliedern übernommen werden⁵⁵⁴, daher die in Abbildung 5.13 eingeführte Trennung. In letzterem Fall treffen auf den Modellersteller natürlich dieselben Kriterien zu wie auf den Modellnutzer. Diese sind aber zwecks der Übersichtlichkeit nicht ein weiteres Mal dargestellt.

Der *Modellierungsaufwand* als Eingangsgröße des *Zeitaufwands für Modellerstellung und -pflege* wird von der *Komplexität des zu entwickelnden* (bzw. zu modellierenden) *Systems*, aber auch von den **Tool-Randbedingungen** beeinflusst. Dieser Aufwand lässt sich zum einen durch hohen *Tool-Bedienkomfort und -Ergonomie*, zum anderen mit einer guten *Integration in die Toollandschaft* reduzieren. Beide hängen vom *Tool-Reifegrad* und den softwareseitig verfügbaren Funktionalitäten ab. Eine stimmige *Integration in die bestehende Toollandschaft* fördert die *Aktualität der Modelle*. Auf diese Weise kann deren *Konsistenz*, eine Kenngröße der *Durchgängigkeit* (vgl. Abbildung 5.14), besser sichergestellt werden. Außerdem fördert die Eingliederbarkeit auch *die Etablierung und Verbreitung* des MBSE-Ansatzes. Diese Eingliederung kann sowohl integrativ (alle Produktmodelle in einem Tool) als auch förderativ (Produktmodelle in unterschiedlichen Tools mit Verknüpfungen über eine Förderierungsplattform, z. B. *Phoenix Model Center* oder *Dassault Reqtify*⁵⁵⁵) erfolgen.

Die Abbildung 5.14 zeigt die Kriterien und Randbedingungen, die durch den MBSE-Ansatz zustandekommen, der in der vorliegenden Arbeit vorgestellt wird. Diese wirken über den *Praxisnutzen des MBSE-Ansatzes* wiederum auf die *Akzeptanz des Entwicklers* ein. Dazu enthält die Abbildung Einflussgrößen der

⁵⁵³ Erhaltene Schulungen steigern die Modellierungsmethoden- und Toolvorkenntnisse (Relation nicht dargestellt), womit letztlich der Zeitaufwand für Modellerstellung & -pflege gesenkt werden kann.

⁵⁵⁴ Zingel 2013

⁵⁵⁵ Woyak 2007; Dassault 2015

Modellierungsmethode sowie der System- und Referenzmodelle, die mithilfe der Modellierungsmethode erstellt werden.

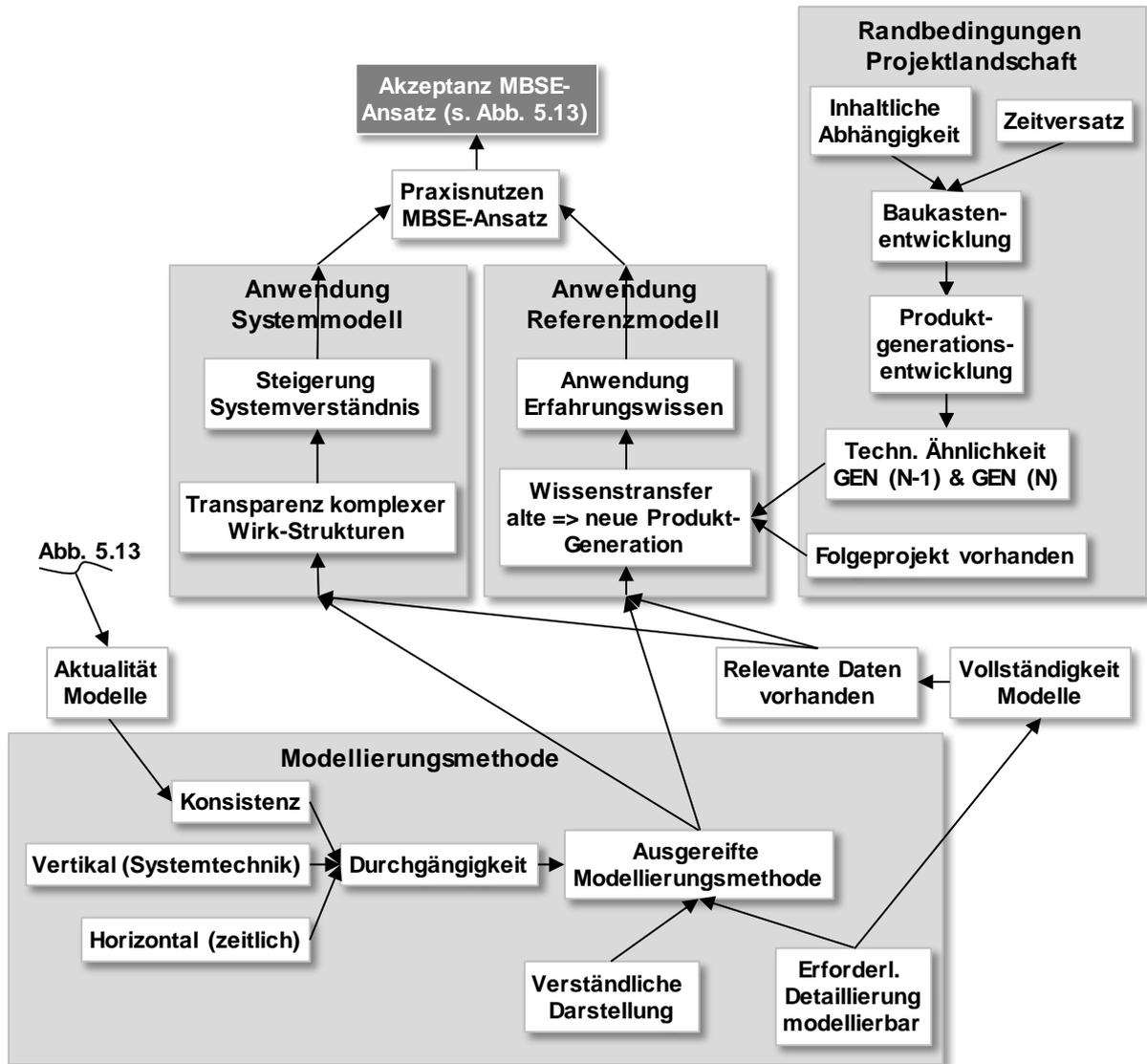


Abbildung 5.14: Spezifische Einflussgrößen des MBSE-Ansatzes dieser Arbeit

Der *Praxisnutzen* des MBSE-Ansatzes kommt in der vorliegenden Arbeit durch die beiden Hauptziele des SysML-Modells zustande: Die **Anwendung des Systemmodells** soll durch mehr *Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen* für die *Steigerung des Systemverständnisses* sorgen. Die **Anwendung des Referenzmodells** soll den *Wissenstransfer* von einer alten auf eine neue Produktgeneration unterstützen und somit die *Anwendung von Erfahrungswissen* ermöglichen. Ob dieser *Wissenstransfer* stattfindet und folglich in der Evaluierung des MBSE-Ansatzes dieser Arbeit beobachtet werden kann, hängt von den vorliegenden **Randbedingungen der Projektlandschaft** ab. Damit die modellierten Informationen Verwendung finden, muss ein *Folgeprojekt vorhanden* sein, das eine gewisse *Ähnlichkeit* zwischen der bereits modellierten und der neu zu entwickelnden Produktgeneration aufweist. Dies ist in der *Entwicklung eines Baukastens* sehr häufig

der Fall, da die Module eines Baukastens *inhaltlich voneinander abhängig* und mit *Zeitversatz* nach den Mechanismen der *Produktgenerationsentwicklung* entwickelt werden⁵⁵⁶.

Weitere Voraussetzungen für den gewinnbringenden Einsatz des System- und des Referenzmodells sind deren Eigenschaften, die maßgeblich durch die **Modellierungsmethode** vorgegeben werden. Zunächst ist wichtig, dass *die relevanten Daten vorhanden* sind, sprich die *Vollständigkeit der Modelle*. Das wiederum hängt davon ab, ob die dazu erforderlichen *Detailierungsebenen des Produkts modellierbar* sind, sodass keine relevanten Informationen durch den Verkürzungsvorgang der Modellbildung verloren gehen. Diese *Modellierbarkeit* ist, gemeinsam mit einer *verständlichen Darstellung* und der *Durchgängigkeit*⁵⁵⁷, Voraussetzung für eine *ausgereifte Modellierungsmethode*. Die *Durchgängigkeit* hängt wiederum von den Kriterien *horizontale Durchgängigkeit* (zeitlich durchgängig), *vertikale Durchgängigkeit* (Wechsel der Betrachtungsebene im Sinne der Systemtechnik) und *Konsistenz* (d. h. *Aktualität & Übereinstimmung unterschiedlicher Modelle*) ab.

5.4.2 Experteninterviews

Nach der Vorstellung des Impact Models zur Analyse der gesamten Untersuchungsumgebung rücken in den durchgeführten Experteninterviews die **Bedürfnisse und Meinungen der Entwickler** (d. h. der Modellnutzer) in den Mittelpunkt. Mithilfe der Einzelaussagen lassen sich aus der Fülle der in Kapitel 5.4.1 vorgestellten Einflussgrößen die wichtigsten herausfiltern und im darauffolgenden Praxistest eingehend untersuchen.

Die insgesamt 16 befragten Personen sind allesamt Fachexperten unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Berufserfahrung, die in der **Baukastenentwicklung** von Fahrzeug-Antriebssystemen (VKM, Getriebe, Hybrid- und E-Antriebe) in Vor- und Serienentwicklung der Porsche AG tätig sind und größtenteils die Freigabe-Verantwortung für das zu entwickelnde System ihres jeweiligen Teams innehaben. Sie alle hatten vor dem Interview keine Erfahrungen in der eigenen Anwendung von SysML-Modellen. Den Interviewten wurden in Einzelterminen der Aufbau und die Verwendungsmöglichkeiten des in Kapitel 5.3 vorgestellten SysML-Modells anhand zweier Beispiele aus der Entwicklung des modellierten Hybridmoduls⁵⁵⁸ präsentiert.

⁵⁵⁶ Siehe Kapitel 2.3.3

⁵⁵⁷ Siehe Kapitel 2.2.1

⁵⁵⁸ Siehe Kapitel 2.1

Darauffolgend wurden ihnen in einem semistrukturierten Interview Fragen zu ihrer **Einschätzung des Potenzials** für die Entwicklung durch das SysML-Modell gestellt.

Als Erstes wurden die Entwickler gebeten, das Potenzial von SysML-Modellen einzuschätzen, **Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen** und funktionalen Wechselwirkungen zu schaffen. Die Antworten fallen bei drei Vierteln der Befragten positiv aus, wie folgende Einzelaussagen zeigen:

- „Bei [Modellen gesamter Module] bin ich davon überzeugt, dass die SysML das Potenzial aufweist.“ Derselbe Entwickler weiter: „Ich hab‘ schon darüber nachgedacht, selbst ein Tool mit vergleichbaren Features zu erstellen.“
- „In meiner Berufserfahrung gab es schon viele Fälle, wo sich sehr lange [funktionale] Rattenschwänze ergeben haben. Die könnte man jetzt mit der SysML verfolgen.“
- „Als Neuling lerne ich den Aufbau und die Funktion einer Komponente kennen, für einen schnellen Überblick.“

Es gab auch vereinzelt kritische Stimmen, beispielsweise von einem Entwickler mit viel Berufserfahrung: „Ich glaub‘, das hilft was bei neuen Kollegen, aber mir bringt das nichts. Alle funktionsrelevanten Angaben finde ich auf der [CAD-]Zeichnung, das reicht vollkommen aus.“

Danach wurde den Interviewten die Frage gestellt, ob sie das SysML-Modell für geeignet halten, **Lessons Learned** zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang **modellbasiert zu speichern** und zur Verfügung zu stellen. Hier äußern sich alle der Befragten positiv, wobei sie die Eignung der SysML-Modelle teilweise an bestimmte Bedingungen knüpfen:

- „Ich sehe [in der SysML] zwei Schlüsselvorteile: Eine gute Übergabe von Lessons Learned [von alten in neue Projekte] kann erfolgen, und Lessons Learned sind [im Vergleich zum klassischen Wissensmanagement] viel besser bauteil- und funktionsrelevant abgespeichert.“
- „Unter Berücksichtigung der verstrichenen Zeit zwischen Projekten ist der Ansatz schon gut. Man muss jedoch jedes Lessons Learned den Rahmenbedingungen zuordnen können, in dem es aufgetreten ist.“
- „Es muss eine Unterscheidung möglich sein zwischen unauffälligen Funktionen und den problematischen Punkten [...]. Also ohne die [Tool-]Funktion, Sachverhalte zu highlighten, halte ich es für ungeeignet.“
- „Es ist mir ein Anliegen, meine Erfahrungen weiterzugeben. Die Lessons Learned zu dokumentieren ist immer gut, auch dann, wenn sie wie hier in einem zentralen Tool gespeichert werden.“ Aber ein solches Tool, so dieser Entwickler, dürfe den persönlichen Erfahrungsaustausch nie vollständig ersetzen.

Zur Frage, ob die Entwickler bereit seien, in Anbetracht des Nutzens der SysML-Modelle **Arbeitszeit** in deren Erstellung und Pflege zu **investieren**, ergab sich ein einheitliches Stimmungsbild:

- „*Nein, denn die Zeit gibt es nicht, die hab‘ ich nicht.*“
- „*De facto ist die Zeit zum Modellieren nicht vorhanden.*“
- „*Nein, denn die Arbeitszeit dazu hab‘ ich nicht. Sporadisch könnte ich zwar schon daran arbeiten, aber nur, wenn mir jemand sagt, es dürfen andere Aufgaben liegen bleiben.*“
- „*Man muss die Zeit dafür einplanen [...], aber dazu müsste man die Projektplanung ändern.*“

Diese Aussagen verdeutlichen den hohen Einfluss, den der Zeitaufwand für Modellerstellung und -pflege auf die Akzeptanz von modellbasierten Ansätzen hat, aber auch die geringen Zeitreserven, über die Entwickler zum Erlernen und Bedienen neuer Entwicklungsmethoden verfügen.

Aus den Experteninterviews können folgende Erkenntnisse mit Einfluss auf Design und Durchführung des anschließenden Praxistests des SysML-Modells gewonnen werden: Das SysML-Modell, das mit der in dieser Arbeit entwickelten Modellierungsmethode erstellt wurde, stößt bei den Befragten sowohl zur **Steigerung des Systemverständnisses** als auch zur **Speicherung von Erfahrungswissen** auf überwiegend positive Resonanz. Viele Entwickler können sich vorstellen, die SysML-Modelle zu Rate zu ziehen, unter der Voraussetzung, sie müssen keine zeitliche Mehrbelastung durch die Modellierung in Kauf nehmen. Somit ist der **Zeitaufwand für Erstellung und Pflege der Modelle** der womöglich kritischste Erfolgsfaktor für eine Etablierung des Ansatzes im Unternehmen. Dieser Interessenkonflikt ließe sich zumindest teilweise aufheben, indem alle Teammitglieder Leserechte für das SysML-Modell erhalten, wobei ein speziell geschulter Modellersteller im Team dessen Erstellung und Pflege übernimmt, um nicht alle Teammitglieder damit zeitlich in Anspruch zu nehmen.

Weil der Zeitaufwand einen großen Einfluss auf die Entwicklermeinung zum SysML-Modell ausübt, sieht das Forschungsdesign des nachfolgenden Praxistests vor, die **Abfrage des Nutzens gezielt getrennt vom entstehenden Aufwand** durchzuführen. Dadurch kann verhindert werden, dass die Entwickler den Nutzen ablehnend bewerten aus der Befürchtung heraus, mit der Einführung von SysML-Modellen sei automatisch eine zeitliche Mehrbelastung verbunden. Somit kann den SysML-Modellen ein hoher Praxisnutzen auch dann bescheinigt werden, wenn diesem ein großer Aufwand gegenübersteht. Ist ein hoher Praxisnutzen erst einmal nachgewiesen, kann er als Motivation dienen, in einem zweiten Schritt den großen Aufwand zu reduzieren und drittens einen angemessenen Aufwand einzuplanen. Das

kann u. a. geschehen, indem die Ursachen des Aufwands beseitigt werden, z. B. durch Steigerung der Bekanntheit von SysML über die universitäre Lehre oder durch Forcierung der Integration von SysML in die bestehende Toollandschaft.

5.4.3 Praxistest

Der Praxistest ist nach den oben ausgeführten Ergebnissen des Impact Models und der Experteninterviews das Kernelement der Validierung der entwickelten Modellierungsmethode für SysML. Nach der kurzen Darstellung der Ziele werden Inhalt und Vorgehensweise des Praxistests aufgeführt. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung der Ergebnisse, die in Kapitel 5.5 diskutiert werden.

Ziele

Das wesentliche Ziel des Praxistests ist die Prüfung, ob die Methoden-Ziele aus Kapitel 5.1 erreicht werden konnten. Dazu wird die entwickelte Modellierungsmethode auf ihre **Funktionsstüchtigkeit** getestet. Hierfür wird das mit ihr erstellte System- und Referenzmodell u. a. auf Durchgängigkeit und Darstellbarkeit der technischen Sachverhalte untersucht (korrespondierend zu Forschungsfrage 2.2). Weiterhin soll der **Praxisnutzen** des modellierten SysML-Modells (korrespondierend zu Forschungsfrage 2.3) aus Sicht der Entwickler, also der Modellnutzer, beurteilt werden (vgl. Abbildung 5.14). Schließlich soll dieser Praxisnutzen dem so erfolgsentscheidenden **Modellierungsaufwand** gegenübergestellt werden, um sowohl die Nutzen- als auch die Kostenseite des MBSE-Ansatzes erfassen zu können. Aus dem Ergebnis dieser ausführlichen empirischen Untersuchung sollen **Erkenntnisse** zur Anwendung von SysML-Modellen in der Serienentwicklung im industriellen Umfeld gewonnen werden. Gleichzeitig sollen **Verbesserungspotenziale** erkannt werden, um daraus weiterführende Forschungsschwerpunkte abzuleiten.

Inhalte und Vorgehensweise

Wie in Kapitel 5 dargelegt, schließt sich an die dreimonatige Erstellungsphase des initialen Systemmodells in SysML eine sechsmonatige Nutzungsphase an (Abbildung 3.3), in der das SysML-Modell die laufende Serienentwicklung eines Hybridmoduls⁵⁵⁹ begleitet. Während dieser Zeit werden technische Sachverhalte sowohl dieses in Entwicklung befindlichen Moduls (Produktgeneration N) als auch fertig entwickelter Hybridmodule (Produktgeneration N-x) analysiert und modelliert. So wird das initiale Systemmodell sowohl mit technischen Sachverhalten der gerade laufenden Entwicklung (Systemmodell) als auch mit Lessons Learned und Best Practices aus

⁵⁵⁹ Siehe Kapitel 2.1

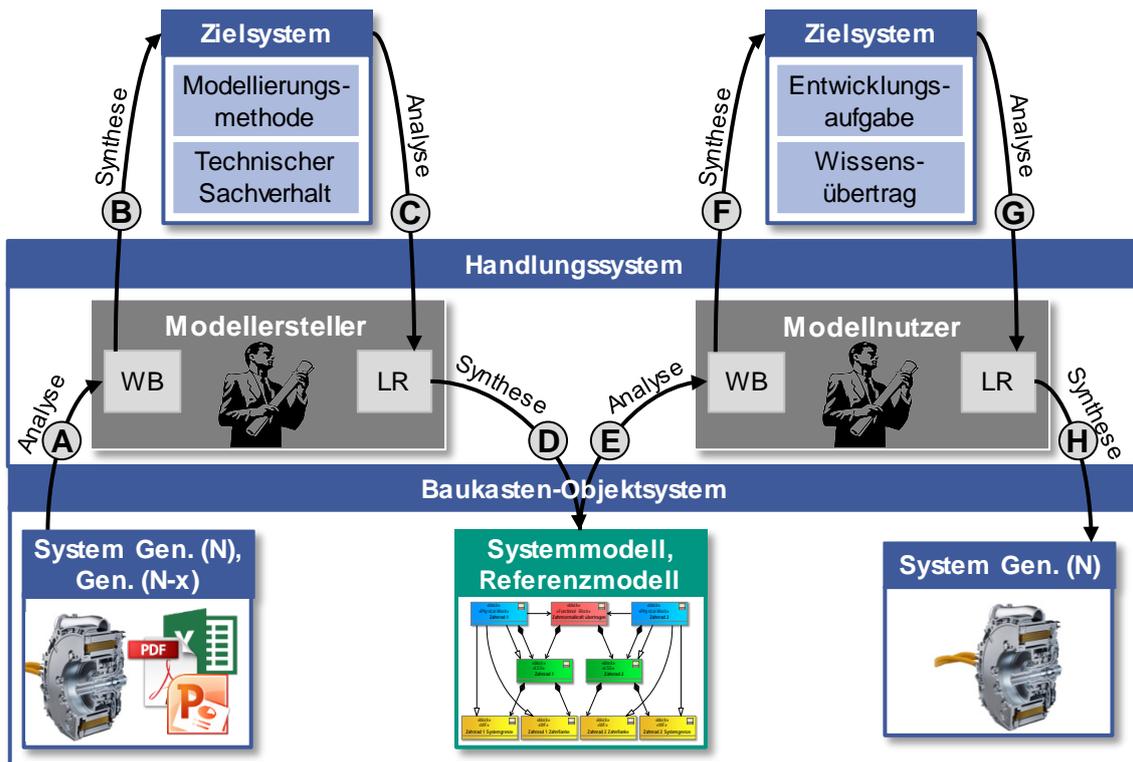
bereits abgeschlossenen Hybridmodul-Entwicklungen (Referenzmodell) desselben Baukastens angereichert. So konnten im Zuge des Praxistests **31 Sachverhalte** der Hybridmodul-Baukastenentwicklung in SysML abgebildet werden, die sich über einen Zeitraum von ca. vier Jahren erstreckt.

Auf den ersten Blick mag es verwundern, dass Aspekte von System- und Referenzmodell in einem einzigen SysML-Modell modelliert werden können. Dies ist jedoch problemlos möglich, da alle Module des Hybridbaukastens aufgrund eines hohen Übernahmevariante-Anteils eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Bei baulichen Unterschieden zwischen den Modulen war überwiegend eine Gestaltvariation unter Beibehaltung des Lösungsprinzips zu beobachten, was den Zweck verfolgt, die Module an verschiedenartige Supersysteme (unterschiedliche Fahrzeuge) und Nachbarsysteme (unterschiedliche VKM oder Getriebe, vgl. Abbildung 2.1) anzupassen. Zudem wurden technische Sachverhalte von System- und Referenzmodell (überwiegend Lessons Learned aus abgeschlossenen Modulentwicklungen) mit demselben Detaillierungsgrad modelliert, da dieser weniger durch die Zugehörigkeit zu System- oder Referenzmodell bestimmt wird, sondern in beiden Fällen durch die Notwendigkeit, keine wichtigen Informationen zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang außer Acht zu lassen.

Die Vorgehensweise bei der Durchführung des Praxistests wird anhand der Aktivitäten der liegenden Acht nach ALBERS, EBEL und LOHMEYER⁵⁶⁰ in Abbildung 5.15 aufgezeigt⁵⁶¹. Analog zum Impact Model, das in Kapitel 5.4.1 vorgestellt wird, sind Modellersteller und -nutzer als zwei unterschiedliche Personen dargestellt. Der Praxistest soll im Schwerpunkt weniger die kognitiven, gedanklichen Verarbeitungsschritte von Modellersteller und -nutzer beleuchten, sondern die oben aufgeführten Ziele verfolgen. Die einzelnen Arbeitsschritte werden im Folgenden anhand der Abbildung 5.15 erklärt. Begleitend zu jedem der dargestellten Arbeitsschritte werden durch den Praxistest mehrere Parameter erfasst, die im Ergebnisteil dieses Kapitels vorgestellt werden.

⁵⁶⁰ Siehe Kapitel 2.2.4

⁵⁶¹ Trotz anderer Anordnung der Analyse- und Synthese-Pfeile gleicht die Abfolge derjenigen aus Abbildung 2.9.



WB: Wissensbasis; LR: Lösungsraum

- Analyse- und Syntheseschritte bei Erstellung und Nutzung des SysML-Modells**
- (A): Aufbau Systemverständnis zu diversen Hybridmodul-Generationen
 - (B): Herauslösen eines zu modellierenden Sachverhalts (z. B. Lessons Learned)
 - (C), (D): Modellierung des Sachverhalts mithilfe der Modellierungsmethode in SysML
 - (E): Analyse SysML-Modell bei einer Entwicklungsaktivität des Hybridmodul-Baukastens
 - (F), (G), (H): Anwendung Informationen des SysML-Modells auf die aktuelle Hybridmodul-Generation

Abbildung 5.15: Vorgehensweise im Praxistest des SysML-Modells

Im ersten Analyseschritt baut sich der Modellersteller das erforderliche Verständnis bzgl. der Hybridmodule auf (Schritt A). Zur Analyse ihrer Baustruktur kommt dabei vornehmlich das CAD-Modell zum Einsatz⁵⁶². Um die funktionalen Zusammenhänge zu ermitteln, werden zum einen zahlreiche Unterlagen der dokumentenbasierten Entwicklung analysiert (z. B. Besprechungsprotokolle, Präsentationsfolien und Lessons-Learned-Dokumente). Zum anderen werden Entwickler nach ihrem Erfahrungswissen befragt, um implizites Wissen zur Entwicklung der Module zu erhalten.

⁵⁶² In der vorliegenden Arbeit werden Methoden zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen entwickelt. Dabei ist davon auszugehen, dass zu Beginn der Serienentwicklung stets ein CAD-Modell vorliegt (z. B. aus Vorentwicklungs-Projekten, von Lieferanten, von der Vorgänger-Modulgeneration).

Aus diesen Informationen wählt der Modellersteller einen technischen Sachverhalt aus, den er unter Anwendung der Modellierungsmethode in SysML erstellen möchte (Schritte B und C). Im darauffolgenden Syntheseschritt fügt der Modellersteller dem SysML-Modell den neuen technischen Sachverhalt hinzu (Schritt D). Die Sachverhalte werden entweder in bereits bestehende Diagramme (BDDs und IBDs⁵⁶³) eingefügt oder es müssen neue Diagramme angelegt werden⁵⁶⁴. In den meisten Fällen werden zur akkuraten Darstellung eines Sachverhalts die bestehenden Modellelemente erweitert und ergänzt (z. B. durch Anlegen einer neuen Detaillierungsebene, wenn ein Bauteil in seine Gestaltelemente zerlegt wird). So wächst der Detaillierungsgrad des SysML-Modells punktuell an den Stellen, an denen es erforderlich ist. Im Umkehrschluss wird vermieden, an vergleichsweise unwichtigen Stellen einen hohen Modellierungsaufwand zu verursachen. Dies entspricht im Kern der Idee, die ALBERS ET AL. mit dem C&C²-Ansatz verfolgen: Innerhalb eines geschlossenen Modells können je nach Bedarf Teile fraktal detailliert oder auch vergrößert werden⁵⁶⁵.

Nach der Modellierung der Sachverhalte wurde den Modellnutzern die Möglichkeit gegeben, den Praxisnutzen des SysML-Modells zu beurteilen. Die Probanden waren Mitglieder eines interdisziplinären Entwicklerteams, dem Systemkonstruktoren, Versuchs- und Berechnungsingenieure sowie Teamleiter angehörten. Die Beurteilung des Praxisnutzens des SysML-Modells durch die Entwickler wird im weiteren Verlauf als **Feedbackgespräch**⁵⁶⁶ bezeichnet. Es wurde stets mit gleichbleibendem Ablauf abgehalten, siehe Abbildung 5.16. Den Entwicklern wurde zunächst das **SysML-Modell** mit seiner Struktur und der Methode zur Darstellung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs **erklärt** (Schritt 1). Dieser Schritt war erforderlich, weil die Probanden zuvor keine Schulung zu SysML und der Bedienung des verwendeten Tools erhalten hatten. Anschließend wurden jedem Entwickler **zwei ausgewählte technische Sachverhalte** im SysML-Modell durch den Modellersteller **vorgestellt**, die die Entwickler jeweils nicht persönlich bearbeitet hatten (Schritt 2).

⁵⁶³ Siehe Kapitel 5.2

⁵⁶⁴ Die Modellierung der Sachverhalte in SysML erfolgte im Rahmen einer Abschlussarbeit (Jantolß 2015, betreute Abschlussarbeit).

⁵⁶⁵ Vgl. u. a. Albers & Wintergerst 2014

⁵⁶⁶ Das Feedbackgespräch wurde nach Methodik eines semistrukturierten Interviews abgehalten (vgl. Marxen 2014).

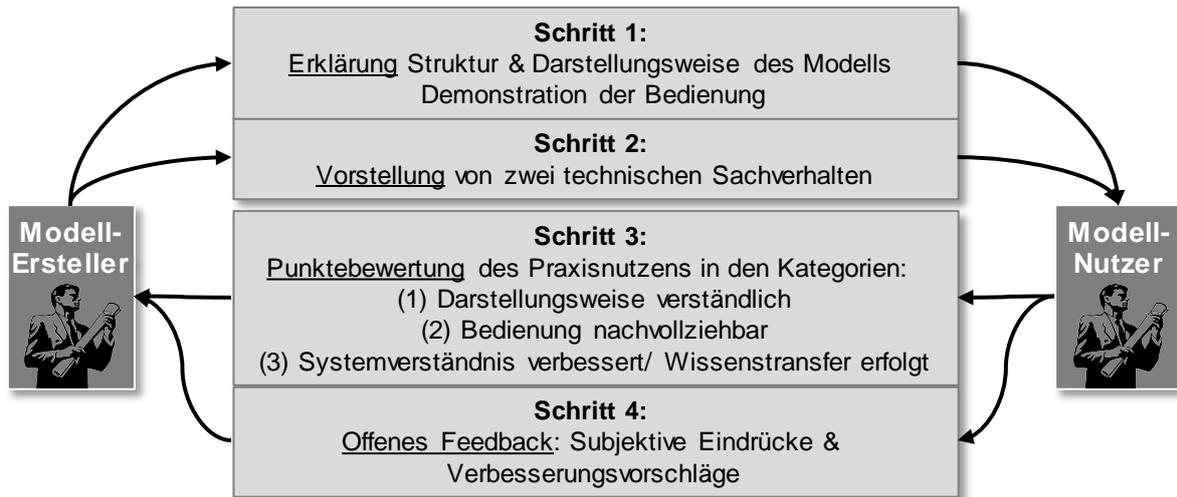


Abbildung 5.16: Ablauf des Feedbackgesprächs

So konnte der Wissenstransfer durch das SysML-Modell beurteilt werden. Danach konnten die Entwickler das SysML-Modell auf Skalen von 1 – 5 in den **drei Kategorien** *Darstellungsweise verständlich*, *Bedienung nachvollziehbar* und *Systemverständnis verbessert/ Wissenstransfer erfolgt* **bewerten** (Schritt 3). Zum anderen konnten sie ein **offenes Feedback** über ihre subjektiven Eindrücke sowie Verbesserungsvorschläge abgeben, das von den Forschern protokolliert wurde (Schritt 4).

Die Informationen, die der Entwickler durch das Zurateziehen des SysML-Modells gewonnen hat (Schritt E, Abbildung 5.15), kann er in der Folge – vorausgesetzt, es besteht eine entsprechende Entwicklungsaufgabe – auf das zu entwickelnde System anwenden (Schritte F, G und H, Abbildung 5.15). Diese Synthesetätigkeit des Entwicklers wird durch den vorangegangenen Analyseschritt des SysML-Modells maßgeblich unterstützt. Allerdings soll hier betont werden, dass das SysML-Modell kein Ersatz sein kann für die kreative Schaffenskraft eines Entwicklers bei der Suche nach neuen technischen Lösungen⁵⁶⁷, da der Zweck des Modells nicht die automatisierte Gestaltsynthese oder die rechnergestützte Auswahl geeigneter Prinziplösungen ohne menschliches Zutun ist. Nach ALBERS ET AL. obliegt es also nach wie vor dem Entwickler mit seiner unersetzlichen Problemlösungskompetenz, die modellierten Informationen auf Relevanz für seine aktuelle Entwicklungsaufgabe zu prüfen⁵⁶⁸.

Die Vorgehensweise des Praxistests wurde im Rahmen einer Pilotphase erprobt. Dabei gaben die Probanden zur Darstellung der in SysML modellierten technischen

⁵⁶⁷ Redtenbacher 1859

⁵⁶⁸ Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012, dort nach Albers & Lohmeyer 2012; Schmalenbach 2013

Begründung⁵⁷⁰ wiedergegeben (B). Als letzte Maßnahme wurde ein Hyperlink in die Windows-Ordnerstruktur eingefügt (C), in dem Dokumente wie Präsentationen, Protokolle und ergänzende Abbildungen zum Sachverhalt abgelegt wurden. Somit fungiert das SysML-Modell als zentrales Zugangsinstrument, das Informationen bauteilbezogen bereitstellt: Der Entwickler muss zuvor nicht den Speicherort der Dokumente kennen, sondern gelangt über den Physical Block des betroffenen Bauteils zu den Informationen. Der Hyperlink, der Zugang zur weit verbreiteten, dokumentenbasierten Informationsspeicherung verschafft, kann als Übergangslösung angesehen werden, die den Paradigmenwechsel hin zur MBSE-Denkweise einleiten kann.

Die Mittel und Wege, mit denen die Informationen zu technischen Sachverhalten mithilfe des SysML-Modells dokumentiert werden, sind bewusst redundant gehalten. Denn dadurch entsteht kein großer Mehraufwand; beispielsweise ist das Auffinden von Ansprechpartnern und Dokumenten im Analyseschritt des Modellerstellers (vgl. Abbildung 5.15) ohnehin erforderlich. Ferner verringert es die Wahrscheinlichkeit von Problemen bei der Interpretation der Modellinhalte, insbesondere wenn die Zeitpunkte von Modellerstellung und -nutzung weit auseinanderliegen⁵⁷¹.

Ergebnisse

Die Ergebnisse des Praxistests sind in die folgenden Rubriken eingeteilt: Zunächst werden die Ergebnisse zur **Funktionsstüchtigkeit der Modellierungsmethode** vorgestellt. Darauf folgen die Ergebnisse zum **erzielten Nutzen** und schließlich die Auswertungen zum **Modellierungsaufwand**. Doch zuallererst führt der folgende Abschnitt einige Erfahrungen zur ersten Phase des Praxistests auf, nämlich zur Ermittlung der modellierten technischen Sachverhalte.

Um den Detaillierungsgrad des initialen Systemmodells ausschließlich an den erforderlichen Stellen zu erhöhen, wurden als technische Sachverhalte insbesondere Lessons Learned und Best Practices aus abgeschlossenen Hybridmodul-Entwicklungen modelliert. Hierzu wurden die Entwickler des Hybridmodul-Baukastens vom Modellersteller nach jenen Lessons Learned befragt und gebeten, die entsprechenden Dokumente (technische Unterlagen, Lessons-Learned-Dokument vom Projektabschluss) zur Verfügung zu stellen, um den technischen Sachverhalt modellieren zu können. Insbesondere bei zeitlich weiter zurückliegenden Projekten gestaltete sich diese Beschaffung von Informationen nicht immer als einfach:

⁵⁷⁰ Mc Mahon, Lowe & Culley 2004

⁵⁷¹ Ebel 2015

- Ansprechpartner zu bestimmten Sachverhalten sind **nicht mehr greifbar** (z. B. weil sie die Abteilung gewechselt oder das Unternehmen verlassen haben).
- Der Entwickler hat **keine Zugriffsberechtigung** mehr auf die Daten eines abgeschlossenen Projekts (z. B. weil er in einem neuen Projekt eingesetzt wird).
- Der Entwickler hat zwar die Zugriffsberechtigung, findet aber die Dokumente **erst nach längerem Suchen** in der Windows-Ordnerstruktur wieder.
- Bei 45 % der modellierten Sachverhalte **liegen keine Dokumente vor** (d. h. die Informationen existieren ausschließlich als implizites Wissen der damals involvierten Entwickler).

Diese Auflistung führt das **Potenzial** vor Augen, das zentral zugängliche, **modellbasierte** und **durchgängige Produktmodelle** zur Informationsspeicherung im Unterschied zum dokumentenbasierten Wissensmanagement besitzen.

Im Zuge des Praxistests wurden verschiedenartige technische Sachverhalte mit ihrem Funktions-Gestalt-Zusammenhang modelliert. Die Komplexität der Sachverhalte konnte vom Modellersteller auf einer Skala von 1 (sehr geringe Komplexität) bis 5 (sehr hohe Komplexität) bewertet werden. Die Auswertung ergibt, dass die modellierten Sachverhalte die **gesamte Bandbreite** an Komplexität abdecken. Folgende Beispiele geben einen Einblick in die Verschiedenartigkeit der Sachverhalte:

- **Sehr geringe Komplexität:** Werkstoffänderung bei einem stark belasteten Bauteil der Trennkupplungs-Aktuatorik zur Verbesserung des Verschleißverhaltens (siehe auch Anhang C, Fallbeispiel 2)
- **Mittlere Komplexität:** Optimierung der Entwärmung des Stators der E-Maschine, d. h. bestehende WFP und LSS werden mit ihren Merkmalen und Eigenschaften so optimiert, dass die Wärmeübertragungsfähigkeit gesteigert werden kann (siehe auch Anhang C, Fallbeispiel 3)
- **Sehr hohe Komplexität:** Schwingungen, die vom Nachbarsystem VKM erzeugt werden, pflanzen sich über Flansch und Verschraubung in das Hybridmodul fort. So kann es bei bestimmten Betriebszuständen und Drehzahlen zu Resonanzerscheinungen kommen, die die Bauteile des Hybridmoduls schädigen können, wogegen diese durch konstruktive Maßnahmen geschützt werden müssen.

Ein wichtiges Ergebnis aus der Untersuchung der Funktionstüchtigkeit der Modellierungsmethode ist, dass **alle aufgetretenen Sachverhalte** ungeachtet der variierenden Komplexität und Inhalte **modelliert werden konnten**. Das bedeutet, dass die Modellierungsmethode in der Lage ist, alle relevanten Informationen zum

Funktions-Gestalt-Zusammenhang der untersuchten Sachverhalte abzubilden, ohne dass wichtige Aspekte ausgelassen werden müssen. Die folgenden Ausführungen analysieren die dabei erforderliche Modellierungsarbeit näher. Die Aufteilung der modellierten technischen Sachverhalte in System- und Referenzmodell ergab, dass 65 % dem Referenzmodell zuzuordnen sind (meist Lessons Learned aus abgeschlossenen Hybridmodul-Entwicklungen) und die restlichen 35 % dem Systemmodell zugeordnet werden können (meist aktuelle Entwicklungsthemen des in Entwicklung befindlichen Hybridmoduls). Der hohe Anteil der Sachverhalte des Referenzmodells ist ein erneutes Indiz für dessen wichtige Rolle in der Produktgenerationsentwicklung.

Die Fähigkeit der Modellierungsmethode, durchgängige SysML-Modelle zu erzeugen⁵⁷², wird im Praxistest ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.18 dargestellt und werden nun erläutert.

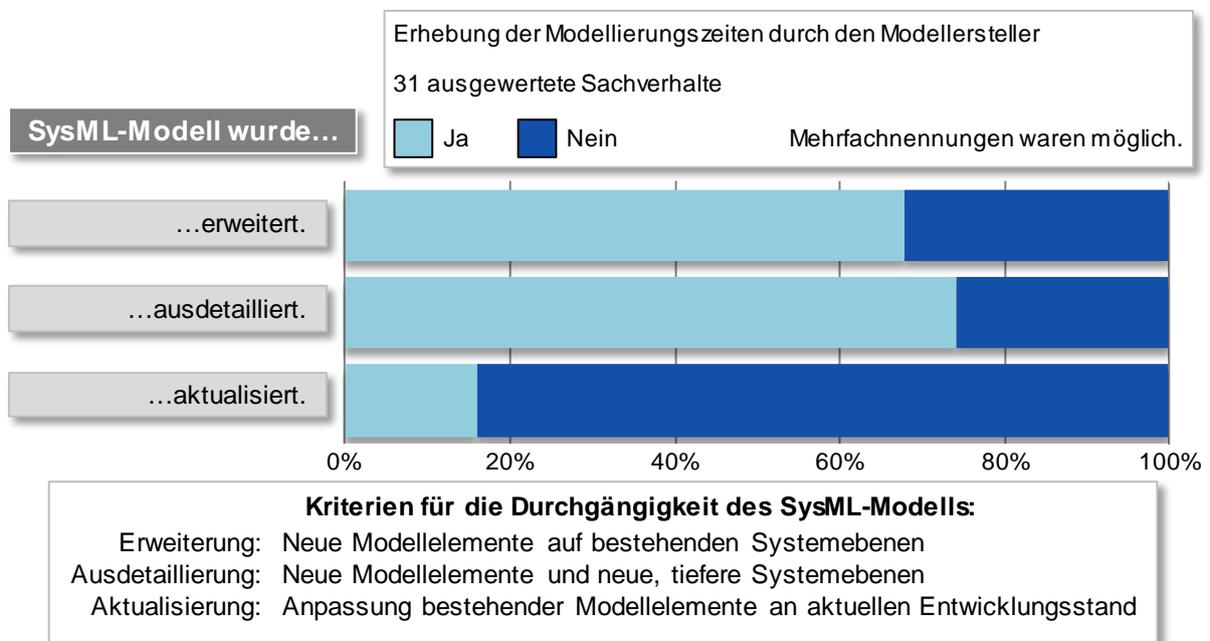


Abbildung 5.18: Fähigkeit der Modellierungsmethode zur Durchgängigkeit

Die Auswertung der erfassten Parameter (Mehrfachnennung war möglich) ergibt, dass bei 68 % der modellierten technischen Sachverhalte Gestaltelemente und deren Funktion ergänzt werden mussten. In diesen Fällen wurde das SysML-Modell **erweitert**. Es handelte sich hierbei häufig um Subsysteme des Nachbarsystems (z. B. zur Modellierung von thermischen Wechselwirkungen mit der Abgasanlage der VKM, die in unmittelbarer Nachbarschaft zum Hybridmodul verläuft). In 74 % der modellierten technischen Sachverhalte wurde das SysML-Modell zur korrekten und

⁵⁷² Siehe Kapitel 5.1

vollständigen Darstellung des Sachverhalts weiter **ausdetailliert**, u. a. durch Hinzufügen einer tieferen Systemebene. Beispielsweise wurde eine Welle des Hybridmoduls punktuell gehärtet. Zur Darstellung dieses Sachverhalts wurde die Welle mittels neuer Physical Blocks in gehärtete und nicht gehärtete Abschnitte zerlegt. In 16 % der modellierten technischen Sachverhalte wurde das SysML-Modell vor Einpflegen eines neuen Sachverhalts **aktualisiert**⁵⁷³. Insgesamt wurde bei 94 % der Sachverhalte eine Änderung des SysML-Modells durchgeführt. In sämtlichen Fällen, in denen eine Änderung erforderlich war, konnten die Modellinhalte ergänzt und aktualisiert werden, Lücken wurden stets geschlossen. Somit konnte die **Fähigkeit der Modellierungsmethode** gezeigt werden, die **Durchgängigkeit der erstellten SysML-Modelle** zu fördern.

Zur **Validierung des Nutzens** der SysML-Modelle wurden die Modellnutzer in einem Feedbackgespräch befragt. Neben der Möglichkeit, die Praxistauglichkeit des SysML-Modells in drei Kategorien auf einer Punkteskala zu bewerten, konnten die Probanden ihr Feedback in einem offenen Gespräch mit den Forschern abgeben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Abbildung 5.19 dargestellt und werden anschließend diskutiert.

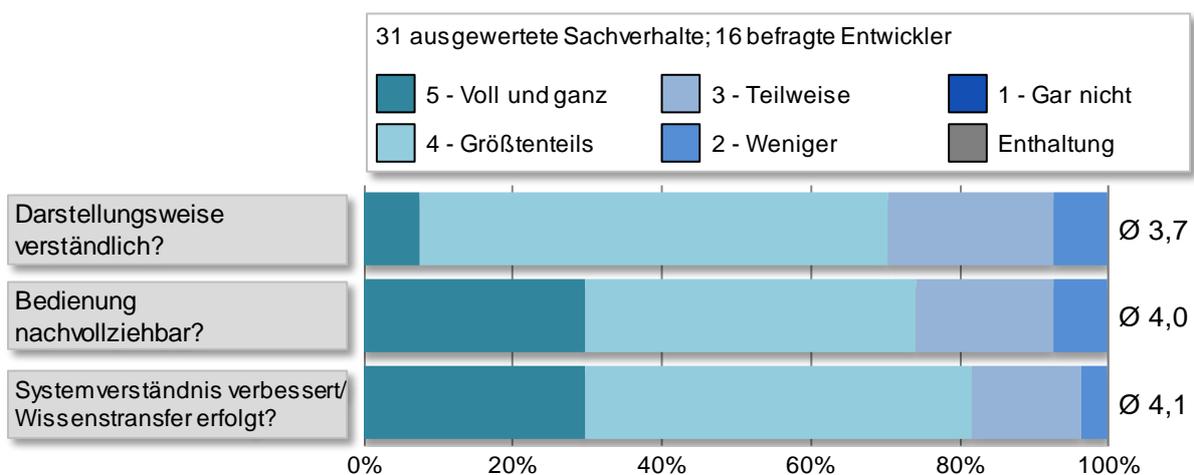


Abbildung 5.19: Entwicklermeinung zur Praxistauglichkeit des SysML-Modells

Eine fachdisziplinübergreifende Modellierungssprache muss Informationen anwendergerecht darstellen⁵⁷⁴. Deswegen zielt die erste Frage an die Modellnutzer auf die **Darstellungsweise** des betrachteten technischen Sachverhalts ab. Wie die Auswertung zeigt, bewerten knapp drei Viertel der Befragten den präsentierten

⁵⁷³ Unter Aktualisieren des SysML-Modells wird sein Angleichen an den aktuellen Projektstand des Hybridmoduls verstanden, welcher stets im CAD-Modell abgebildet ist. Da keine automatisierte Schnittstelle zwischen SysML- und CAD-Modell vorhanden ist, muss diese Aktualisierung durch den Modellersteller durch Vergleichen der Modelle erfolgen.

⁵⁷⁴ Albers & Zingel 2013; Zingel 2013

Sachverhalt als voll und ganz bzw. größtenteils verständlich dargestellt. Dabei fanden sich insbesondere Konstrukteure gut in der hierarchischen Darstellung der Baustruktur zurecht, weil sie diese bereits aus dem CAD-System kannten. Auch Berechnungsingenieure waren aufgrund ihrer Erfahrung mit objektorientierten Systemmodellen (z. B. aus *MATLAB* bzw. *Simulink*) an die Darstellungsweise des SysML-Modells gewohnt. Außerdem wurden die redundanten Angaben zur Darstellung des Sachverhalts (Wirknetz im Modell, Kurzbeschreibung in Textform, Link auf Dokumente) positiv beurteilt.

Es gab auch kritische Stimmen: Einige Probanden bemängelten die Darstellungsform der SysML-Sprachelemente in Form von Blöcken und Relationen, die ohne Zuhilfenahme des C&C²-Wirknetzes sehr abstrakt sei und deswegen nicht ohne Anpassungen (z. B. für die Diskussion mit dem Management) eingesetzt werden könne. Laut einem Befragten stehe die gewöhnungsbedürftige Abstraktion im Gegensatz zum erklärten Anspruch der SysML, ein verbessertes Systemverständnis und Informationen nicht nur Experten, sondern einer breiten Masse von Entwicklern zur Verfügung zu stellen⁵⁷⁵.

Die darauffolgende Frage, ob die **Bedienung nachvollziehbar** ist, soll klären, ob die Handhabbarkeit und Ergonomie des SysML-Modells aus Sicht der Modellnutzer gegeben ist. Hier gaben ca. 70 % der Befragten an, dass sie die Bedienung als nachvollziehbar empfinden und sich auch eigenständig im Modell zurechtfinden würden. Speziell die verschiedenen Einstiegsmöglichkeiten in das Modell (über Bau- oder Funktionsstruktur, Schnellzugriff auf Lessons Learned in Ordnerstruktur und Suchfunktion nach Schlagworten) werden unterschiedlichen Bedürfnissen und Motivationen der Entwickler auf der Suche nach Informationen gerecht. Einige Probanden bescheinigten, dass ihnen bereits die kurze Einführung in die Bedienung des Modells im Zuge des Feedbackgesprächs ausreiche, um sich im Modell zurechtzufinden. Das Auffinden der Bauteile sei gut nachvollziehbar und auch das direkte Aufrufen der Lessons Learned sei sehr nützlich.

Aufgrund der Menge an Befragten und des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwands⁵⁷⁶ war es nicht möglich, vor Durchführung des Praxistests SysML-Schulungen durchzuführen. Stattdessen wurde das SysML-Modell in den Feedbackgesprächen stets unter ausführlicher Erklärung des Modellerstellers

⁵⁷⁵ Der hier zutage tretende Unterschied zwischen dem Abstraktionsniveau des SysML-Modells und dem gewohnten Abstraktionsniveau der Entwickler wurde für die Einführung von modellbasierten Ansätzen auch von ALBERS und ZINGEL als erfolgsentscheidend herausgestellt (Albers & Zingel 2013a).

⁵⁷⁶ Andere Forschungsarbeiten berichten von einwöchigen Schulungen, die erforderlich sind, um zunächst ungeschulte Entwickler eigenständig mit SysML arbeiten zu lassen (Zingel 2013).

bedient. Diese Einschränkung schlägt sich auch auf die Bewertung der Nachvollziehbarkeit der Bedienung nieder: Trotz der überwiegend guten Bewertungen unterstrichen die meisten Probanden, dass sie die Bedienbarkeit noch besser bewerten würden, wenn sie zuvor eine SysML-Schulung erhalten hätten. Weiterhin gaben die allermeisten Befragten an, die Voraussetzung für die Bestnote bei dieser Frage sei die Möglichkeit, das SysML-Modell in einem längeren Zeitraum eigenständig nutzen zu können. Diese beiden Aussagen bestätigen die im Impact Model aufgestellten Zusammenhänge (Abbildung 5.13): Schulungen und die darauffolgende eigene Anwendung eines MBSE-Ansatzes spielen eine wichtige Rolle für dessen Akzeptanz.

Die letzte Frage des Feedbackgesprächs zielt auf die Erfüllung des Zwecks des SysML-Modells ab, nämlich die **Transparenz bei komplexen Wirkstrukturen** (Hauptnutzen des Systemmodells) und den **Wissenstransfer** von abgeschlossenen auf laufende Entwicklungsprojekte (Hauptnutzen des Referenzmodells). Die Probanden wurden gefragt, ob sie durch die Analyse des präsentierten Sachverhalts ihr Systemverständnis verbessern konnten bzw. sich in der Lage sehen, die angeeigneten Informationen in Folgeprojekten anzuwenden. Bei einem arithmetischen Mittelwert von vier aus fünf möglichen Punkten sieht der größte Teil der Entwickler den Zweck des SysML-Modells als erfüllt und kann somit dessen Nutzen für die persönliche Arbeit erkennen. Die Tauglichkeit des Modells für das Wissensmanagement wird also erkannt und bestätigt.

Nach Vergabe der Punktebewertungen (Abbildung 5.19) wurden die Befragten im Feedbackgespräch aufgefordert, ein abschließendes Resümee zu ziehen und den MBSE-Ansatz gesamthaft zu bewerten. Einige beispielhafte Aussagen werden hier sinngemäß wiedergegeben:

- Die Idee eines zentralen **Modells als Speicherort für Informationen** zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang sei sehr gut.
- Der Ansatz müsse einen **festen Platz im Entwicklungsablauf** erhalten.
- Der **Mehrwert** des SysML-Modells auf Arbeitsebene **sei erkennbar** und könne noch gesteigert werden, wenn die Darstellungsweise der SysML-Blöcke und -Relationen für Präsentationen fürs Management geeignet wäre (so wie das bei den C&C²-Wirknetzen bereits der Fall sei).
- Das **Modell lebe von der Pflege** (d. h. es muss aktuell und konsistent gehalten werden). Dieser Pflegeaufwand wird aber als relativ hoch eingeschätzt.

Die letzte Aussage zeigt auf, dass die Entwickler bei der Abfrage des Nutzens bereits versuchen, den entstehenden Aufwand abzuschätzen, obwohl dieser gar nicht gefragt war.

Die folgenden Ausführungen stellen die Ergebnisse des Praxistests vor, die den **Modellierungsaufwand** erfasst haben. Die Daten dazu wurden durch den Modellersteller begleitend zur Modellierungstätigkeit (Schritt D, Abbildung 5.15) erhoben. Der Kern zur Quantifizierung des Aufwands zur Einführung der Modellierungsmethode in SysML ist die Analyse der benötigten Modellierungszeiten für die einzelnen modellierten Sachverhalte (Abbildung 5.20).

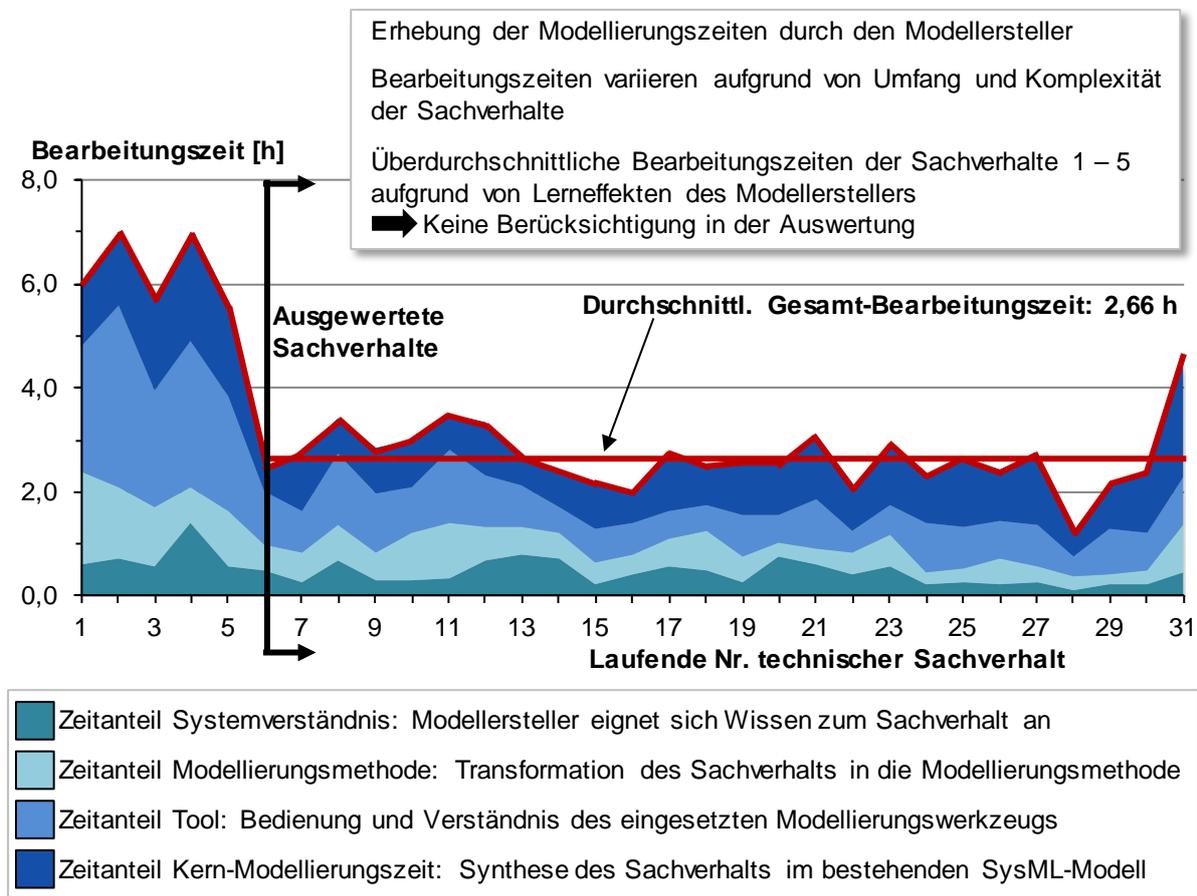


Abbildung 5.20: Zeitanteile zur Modellierung der technischen Sachverhalte

Die Gesamt-Modellierungszeit pro technischem Sachverhalt (rote Kurve) lässt bereits einige Rückschlüsse zu. Es ist zu erkennen, dass die Gesamt-Modellierungszeiten mit fortlaufender Nummer der chronologisch sortierten Sachverhalte sinken. Das kann mit Lerneffekten des Modellerstellers begründet werden. Er hatte zu Beginn der Modellierung den Kenntnisstand eines Novizen⁵⁷⁷, sowohl im Bereich der SysML als auch bei Hybridfahrzeugen. Aufgrund dieser Lerneffekte fallen die Gesamt-Modellierungszeiten der Sachverhalte 1 – 5 überdurchschnittlich hoch aus. Sie werden deswegen in den folgenden Auswertungen und Diskussionen nicht berücksichtigt. Die Varianz in der Gesamt-Modellierungszeit der verbleibenden

⁵⁷⁷ Vgl. Forschungsarbeiten: Albers & Turki 2014; Turki 2014

Sachverhalte ist auf deren unterschiedlichen Umfang und Komplexität zurückzuführen (so auch beim Sachverhalt Nr. 31, der besonders komplex ist).

Die Komplexität der modellierten Sachverhalte wurde vom Modellersteller während der Modellierung des jeweiligen Sachverhalts auf einer Skala von 1 (sehr wenig komplex) bis 5 (sehr komplex) eingestuft. Die Einstufung erstreckt sich über alle fünf Komplexitätsstufen, d. h. die Sachverhalte decken die komplette Bandbreite an Komplexität ab. Die weniger bis mittelkomplexen Sachverhalte überwiegen jedoch. Die durchschnittliche Gesamt-Modellierungszeit der Sachverhalte 6 – 31 beträgt 2,66 Stunden.

Gemessen an der überwiegend geringen bis mittleren Komplexität der modellierten Sachverhalte und der Tatsache, dass ein bereits bestehendes Modell erweitert wurde (statt ein Modell von Grund auf neu zu erstellen), erscheint die durchschnittliche Gesamt-Modellierungszeit relativ hoch. Dem gegenüber steht das Ergebnis der Experteninterviews⁵⁷⁸, in denen das Stimmungsbild der Entwickler ergab, dass sie aufgrund ihrer Auslastung und der häufig terminlich angespannten Situation in der Serienentwicklung nur sehr wenig bis gar keine Zeit aufwenden können, das SysML-Modell zu pflegen. Um diesem für Erfolg und Akzeptanz des MBSE-Ansatzes so wichtigen Aspekt weiter auf den Grund zu gehen, sollen im Folgenden die Ursachen für die langen Modellierungszeiten gefunden werden. Dazu wurde die Gesamt-Modellierungszeit jedes Sachverhalts in die vier Zeitanteile *Systemverständnis*, *Modellierungsmethode*, *Tool* und *Kern-Modellierungszeit* aufgespalten (Abbildung 5.17). Der Einfluss dieser vier Kategorien bei der Modellierung wird auf den folgenden Seiten diskutiert. Die Abbildung 5.21 zeigt die durchschnittliche prozentuale Aufteilung der Zeitanteile über die ausgewerteten Sachverhalte 6 - 31 hinweg.

Die Zeit im Anteil **Systemverständnis** nutzt der Modellersteller, um (im Zuge der Analysephase zur Bildung seiner Wissensbasis, Schritt A in Abbildung 5.15) alle benötigten Informationen (z. B. in Form von Dokumenten) zu sammeln und sich das erforderliche Wissen zum technischen Sachverhalt (z. B. in Gesprächen mit Entwicklern) anzueignen. Bei Lessons Learned ist dabei ein besonderes Augenmerk auf die Ursache und die Lösung des technischen Problems zu legen. Der Modellersteller verbrachte durchschnittlich 14,7 % bzw. 30 Minuten mit dieser Tätigkeit.

⁵⁷⁸ Siehe Kapitel 5.4.2

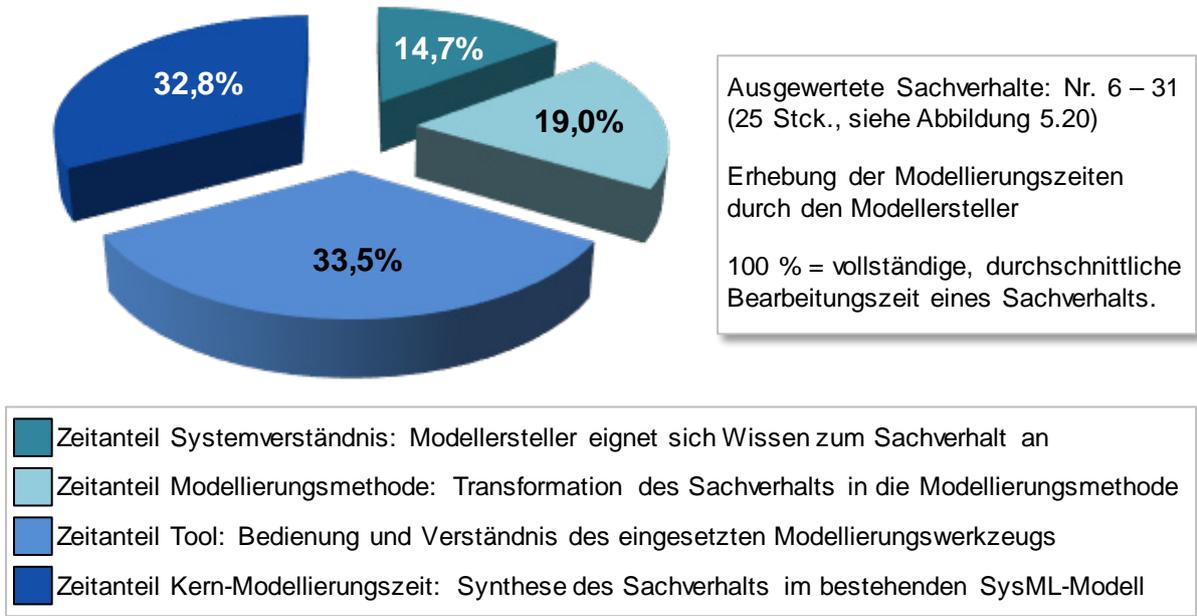


Abbildung 5.21: Durchschnittliche Zeitanteile der SysML-Modellierung

Der Zeitanteil zum Erlangen des Systemverständnisses macht den geringsten der vier Anteile aus. Dennoch bietet sich hier Raum für Verbesserungen und damit eine Verkürzung der benötigten Gesamt-Modellierungszeit. Zum Erwerb eines umfassenden Systemverständnisses war bei über der Hälfte der Sachverhalte die Analyse der Baustruktur am CAD-System erforderlich, weil nur im CAD-Modell 3D- und Schnitt-Ansichten verfügbar sind. Ein solcher permanenter Wechsel zwischen SysML- und CAD-Modell ist aufwändig und nimmt wertvolle Zeit in Anspruch. Noch deutlicher wird das Optimierungspotenzial beim Aufwand zur Sicherstellung der Konsistenz der beiden Modelle: Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung des modellierten Hybridmoduls war bei drei Viertel der modellierten Sachverhalte eine Gegenprüfung der Aktualität des SysML-Modells am CAD-System erforderlich, bevor die SysML-Modellierung überhaupt starten konnte. Diese Erkenntnis bestätigt erneut den Bedarf an einer rechnergestützten, automatisierten Vernetzung der unterschiedlichen Systemmodelle, die bislang vonseiten der kommerziellen Toolhersteller nur unzureichend vorhanden ist⁵⁷⁹.

Der Zeitanteil **Modellierungsmethode** umfasst die (mentale oder explizierte) Transformation des zu modellierenden technischen Sachverhalts in die Darstellungsform der Modellierungsmethode, sprich die eigentliche Modellbildung durch Anwendung von Sprache und Methode. Dies entspricht der Bildung des (mentalen) Zielsystems und dem Aufspannen des (mentalen) Lösungsraums

⁵⁷⁹ Siehe Kapitel 2.5.4

(Abbildung 5.15). Dieser Zeitanteil sinkt mit steigender Anzahl modellierter Sachverhalte aufgrund der zunehmenden Erfahrung des Modellerstellers, wie der Vergleich des Zeitanteils der Sachverhalte 6 bis 11 von durchschnittlich 23 % und des Zeitanteils der Sachverhalte 26 bis 31 von durchschnittlich 15 % zeigt.

Der Zeitanteil **Tool** umfasst diejenigen Zeiten, die für die Bedienung und zum Verständnis des eingesetzten Modellierungswerkzeugs angefallen sind. Er fällt mit ca. einem Drittel der Gesamt-Modellierungszeit überraschend hoch aus. Eine nähere Analyse ergibt, dass sich der Zeitanteil auch hier aufgrund der zunehmenden Übung im Umgang mit dem Tool von 36 % (Sachverhalte 6 bis 11) auf 30 % (Sachverhalte 26 bis 31) reduziert. Der Rückgang fällt aber nicht so deutlich aus wie beim Zeitanteil der Modellierungsmethode. Das kann als Indikator dafür gewertet werden, dass die Bedienung des Tools wenig komfortabel und intuitiv ist.

Natürlich ließen sich Probleme, die der Modellersteller mit der Toolbedienung hat (z. B. das Finden spezieller Befehle), mit Schulungen und einem ebenfalls geschulten unternehmenseigenen IT-Support schneller lösen. Beides war im untersuchten Unternehmen aufgrund der geringen Verbreitung von SysML nicht vorhanden⁵⁸⁰. Im Praxistest konnten aber auch Zeittreiber beobachtet werden, die zu einem wesentlichen Anteil auf den Reifegrad des Modellierungstools zurückzuführen sind und von denen hier einige exemplarisch beschrieben werden: Beispielsweise gab es mehrfach Probleme beim Anlegen von Hyperlinks in die Windows-Ordnerstruktur (vgl. Abbildung 5.17). Außerdem wurde das Modell mit zunehmendem Umfang instabil; lange Ladezeiten und Programmabstürze waren die Folge⁵⁸¹. Darüber hinaus wurden Funktionen des Tools vermisst, um Modellelemente intelligent anzuordnen und so die Übersicht zu steigern. Stattdessen musste die Anordnung von Hand erfolgen. Vor allem das Zurechtrücken der Verbindungslinien, die in SysML die Relationen darstellen, nahm viel Zeit in Anspruch. Speziell Diagramme mit vielen Blöcken und Relationen konnten optisch trotzdem nicht zur Zufriedenheit der befragten Entwickler aufbereitet werden (s. o.).

Der Zeitanteil der **Kern-Modellierungszeit** schließlich enthält den Syntheseschritt zur Anreicherung des bestehenden SysML-Modells mit den Blöcken und Relationen des zu modellierenden Sachverhalts (vgl. Abbildung 5.15), den zugehörigen Abbildungen des Wirknetzes und den Kontextinformationen (vgl. Abbildung 5.17). Die Kern-Modellierungszeit macht mit ca. einem Drittel ebenfalls einen großen Anteil aus. Dieser könnte ebenfalls durch eine bessere Integration des SysML-Tools in die

⁵⁸⁰ Siehe Kapitel 3

⁵⁸¹ Jantoß 2015, betreute Abschlussarbeit

bestehende Toollandschaft reduziert werden, denn dann könnten beispielsweise alle Bauteile und womöglich die gesamte Baustruktur über eine automatisierte Schnittstelle aus dem PLM- oder CAD-System importiert werden und müssten nicht vom Modellersteller erneut manuell in SysML erzeugt werden. Ansätze zur Reduzierung der Kern-Modellierungszeit sind ferner in der Weiterentwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsmethode⁵⁸² zu suchen. Beispielsweise fällt auf, dass die teils parallele Verwendung mehrerer Relationstypen (so definiert in der Methode, Abbildung 5.4) Aufwand in der Modellierung verursacht. Unter Umständen ließe sich an dieser Stelle die Modellierung vereinfachen, indem die SysML-Spezifikation oder das Tool um Relationen erweitert würde, die sowohl die Darstellung von Existenzabhängigkeiten (Komposition) als auch einer Vererbungsfunktionalität (Generalisierung) ermöglichen.

5.5 Diskussion und Zwischenfazit

Aus den Validierungsergebnissen geht hervor, dass in der vorliegenden Arbeit eine **Modellierungsmethode entwickelt** werden konnte, die eine Vielzahl technischer Sachverhalte unterschiedlicher Komplexität und Flussart (Energie, Stoff, Information) abbilden kann. Ein wichtiges Merkmal der durchgeführten Untersuchung ist, dass die **Praxistauglichkeit** der entwickelten Modellierungsmethode nicht nur zu einem Zeitpunkt, sondern **während einer Zeitspanne** validiert werden konnte. Dazu wurde das SysML-Modell über ein halbes Jahr begleitend zur Serienentwicklung von Hybridbaukästen genutzt. In diesem Zeitraum wurden die Lessons Learned und Best Practices aus über vier Jahren Entwicklungsarbeit modelliert. Die Koexistenz von SysML- und CAD-Modell als Charakteristikum der Serienentwicklung wurde dabei näher beleuchtet. Die **Feedbackgespräche** mit Mitgliedern eines interdisziplinären Baukasten-Entwicklerteams konnte **wertvolle Aufschlüsse zum Nutzen** der entwickelten Methode liefern. Außerdem ist es gelungen, den **entstehenden Aufwand** in Form der Modellierungszeit zu quantifizieren und diese anteilig auf die unterschiedlichen Zeittreiber zurückzuführen.

Das **Impact Model** liefert einen detaillierten Aufschluss über die komplexe Untersuchungsumgebung der vorliegenden Arbeit. Es soll aber auch für nachfolgende Forschungsarbeiten als Referenz und als Anregung dienen. Die **Experteninterviews** als wichtiger Baustein der menschenzentrierten Methodenentwicklung geben Einblick in die Wünsche und Bedürfnisse der Entwickler. Sie haben so die Identifikation der Schlüsselfaktoren für die Validierung der Akzeptanz der Methode im darauffolgenden Praxistest ermöglicht. Dieser hat

⁵⁸² Siehe Kapitel 5.2

ergeben, dass die Entwickler **vom Nutzen des SysML-Modells überzeugt** sind, denn sie konnten ihr Systemverständnis steigern und wurden in die Lage versetzt, aufgenommene Informationen aus den SysML-Modellen in Folgeprojekten anzuwenden. Auch die Darstellungweise und Bedienbarkeit wurden als verständlich bzw. nachvollziehbar beurteilt.

Ebenso ist es gelungen, den **anfallenden Aufwand** zu evaluieren. Der geringen Bereitschaft der Entwickler, Zeit für die Modellerstellung und -pflege aufzuwenden, stehen – gemessen an der Komplexität der modellierten Sachverhalte – **relativ hohe Modellierungszeiten** gegenüber. Eine der Hauptursachen dieser langen Zeiten sind Defizite des Softwaretools, beispielsweise lange Ladezeiten oder instabiles Verhalten bei umfangreichen Modellen. Eine enge **Kopplung von SysML- und CAD-Modell** könnte folgende **Verbesserungen** herbeiführen:

- Der Wunsch der Entwickler nach **mehr grafischer Veranschaulichung** könnte durch Kombination von CAD-3D-Ansichten mit modellierten Funktionen und Wirkstrukturen erfüllt werden.
- Der Import der Baustuktur könnte zwecks **Reduzierung der Modellierungszeit** automatisiert erfolgen.
- Das **Systemverständnis des Modellerstellers** würde stärker gefördert, wodurch sich die Modellierungszeit ebenfalls reduzieren ließe.
- Die **Sicherstellung der Konsistenz** beider Modelle könnte rechnergestützt erfolgen.

Da eine adäquate Toolumsetzung aus Sicht des Anwenders eine Kern-Anforderung und somit ein wichtiges Erfolgskriterium für seine Akzeptanz ist⁵⁸³, herrscht hier noch Verbesserungspotenzial.

⁵⁸³ Broy et al. 2010

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neue Modellierungsmethoden im Kontext der Modellbasierten Systementwicklung (MBSE) zur Unterstützung der Baukasten-Serienentwicklung vorgestellt und in der Baukastenentwicklung von Hybrid-Triebstrangsystemen eingesetzt. Dazu werden zunächst die Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung ermittelt: Die **inhaltlichen Abhängigkeiten** sorgen für technische Wechselwirkungen im Objektsystem sowie für ein komplexes Baukasten-Zielsystem. Der **Zeitversatz** führt zu erhöhter Unsicherheit im Baukasten-Zielsystem sowie zu Herausforderungen im Wissensmanagement. Die so entstehende Komplexität soll durch einen baukastengerechten modellbasierten Ansatz handhabbar gemacht werden. Überdies soll die Wiederverwendbarkeit von Baukasten-Zielen, -Anforderungen, und -Randbedingungen sowie von Erfahrungswissen zu Funktion und Gestalt der Bausteine ermöglicht werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, die die beiden Schwerpunkte **Baukasten-Zielsysteme** (Anforderungsmanagement) und **Funktions-Gestalt-Zusammenhang** (Weitergabe von Lösungswissen) enthält, zusammengefasst.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wird eine baukastengerechte **Modellierungsmethode für Zielsysteme** entwickelt. Die Komplexitätstreiber der Baukastenentwicklung sowie vier weitere Kern-Herausforderungen des Anforderungsmanagements werden von der Methode aufgegriffen und mit Lösungsansätzen versehen. Unter Einsatz der Modellierungsmethode wird ein **Zielsystem-Referenzmodell** für Hybridtriebstrang-Baukästen im Tool *Rational DOORS* des Herstellers IBM erstellt. Aus diesem Referenzmodell können projektspezifische Baukasten-Zielsystemmodelle für mehrere unterschiedliche Hybridtriebstrang-Topologien abgeleitet werden. Der Anteil der Zielsystem-Elemente, der topologieübergreifend einsetzbar ist, beträgt ca. 80 %. Wiederum ca. 81 % dieser Menge können aus dem Referenzmodell unverändert ins projektspezifische Zielsystemmodell übernommen werden. Die restlichen 19 % benötigen lediglich eine geringfügige Anpassung. Auf diesem Weg kann eine hohe Wiederverwendbarkeit von Zielen, Anforderungen und Randbedingungen umgesetzt werden.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird ein kombiniertes Referenz- und Systemmodell eingesetzt, das den **Funktions-Gestalt-Zusammenhang** mithilfe des Contact- und Channel-Ansatzes (C&C²-Ansatz) nach ALBERS ET AL.⁵⁸⁴ in der Modellierungssprache Systems Modeling Language (SysML) darstellen kann. In der Literatur wird SysML für die Entwicklung von mechatronischen Systemen mit hohem Software- und Elektronik-Anteil bereits hoher Nutzen und Akzeptanz bescheinigt⁵⁸⁵. Dieses Modell soll die **Weitergabe von Lösungswissen** über den Verlauf einer zeitlich ausgedehnten Baukasten-Serienentwicklung unterstützen. Dazu wird zunächst eine Modellierungsmethode entwickelt, die daraufhin zur Modellierung eines Hybridmoduls⁵⁸⁶ eingesetzt wird. Hierbei stellt sich heraus, dass sämtliche betrachteten Wirkzusammenhänge (einschließlich Bauteilen, Funktionen, Wirkflächen und Leitstützstrukturen) modelliert werden können. Weiterhin kann die Fähigkeit der Methode zur Durchgängigkeit (d. h. der Erweiterbarkeit, Detaillierung und Konsistenzerhaltung des SysML-Modells) im zeitlichen Verlauf der Modellnutzung gezeigt werden. Weil bislang nur wenige Erfahrungen zur Anwendung von SysML in der Serienentwicklung von überwiegend mechanischen Systemen vorliegen, wird die **Akzeptanz** der neuen Modellierungsmethode in einem Praxistest empirisch ermittelt und evaluiert. Dazu wird zum einen der Nutzen der Modelle durch Entwickler-Feedback in den drei Kategorien Darstellungsweise, Bedienbarkeit sowie Tauglichkeit der Modelle für die Weitergabe von Lösungswissen beurteilt. In allen Kategorien schneidet die Methode überwiegend positiv ab. Zum anderen wird der Aufwand, der im Zuge der Modellerstellung und -nutzung entsteht, in Form der angefallenen Modellierungszeiten beziffert. Diese fallen, bezogen auf die Komplexität der modellierten technischen Sachverhalte, vergleichsweise hoch aus. Eine der Ursachen dafür kann in den Defiziten der Toollandschaft ausfindig gemacht werden (z. B. instabiles Verhalten bei umfangreichen Modellen, fehlende Kopplung von SysML- und CAD-Modell). Der daraus entstehende weiterführende Forschungsbedarf wird im folgenden Ausblick näher erläutert.

Zusammengefasst stellt die vorliegende Arbeit Entwicklungsmethoden als Beitrag zur Karlsruher Schule zur Verfügung, mit denen die komplexen Aktivitäten des Anforderungsmanagements und des Wissensmanagements in der Baukastenentwicklung unterstützt werden können. Hiermit leistet sie einen Beitrag im bislang noch wenig erforschten Feld der Serienentwicklung von Baukästen. Die Produktgenerationsentwicklung als neues Erklärungsmodell für die Produkt-

⁵⁸⁴ Albers & Wintergerst 2014

⁵⁸⁵ Eigner, Roubanov & Zafirov 2014

⁵⁸⁶ Siehe Kapitel 2.1

entwicklung hat sich dabei in der industriellen Praxis bewährt, mehr noch: Sie kann die Grundlage bilden für den effizienten Einsatz modellbasierter Ansätze (z. B. bei der Verzahnung von Referenz- und Systemmodell) in der Entwicklung komplexer Systeme. Überdies hat sich bestätigt, wie wichtig der menschenzentrierte Ansatz ist, um Anwendbarkeit und Akzeptanz als Kernziele der entwickelten Methoden im industriellen Umfeld in den Vordergrund zu stellen. Damit der modellbasierte Ansatz gewinnbringend eingesetzt werden kann, muss zum einen der Nutzen der Methoden den entstehenden Aufwand merklich übersteigen. Zum anderen kann das Management (z. B. die Unternehmensleitung) die Verbreitung der Methoden fördern, indem es die notwendigen Ressourcen zu deren Anwendung zur Verfügung stellt.

Die Methoden wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Unterstützung von Hybridtriebstrang-Baukästen eingesetzt. Dennoch ist zu erwarten, dass die gewonnenen Erkenntnisse auch auf die Entwicklung anderer Systembaukästen der Fahrzeugtechnik (z. B. Getriebekästen) sowie auf Baukastenentwicklungen in anderen Branchen übertragbar sind. Diese und weitere Themenfelder erfordern auch über die vorliegende Arbeit hinaus Aufmerksamkeit in der Forschung. Hierauf geht der folgende Ausblick ein.

6.2 Ausblick

Dieses Kapitel stellt einige **weiterführende Forschungsthemen** im Kontext der vorliegenden Arbeit vor, die besonders relevant erscheinen. Nach der Entwicklung von Modellierungsmethoden für Baukasten-Zielsysteme und für den Funktions-Gestalt-Zusammenhang von Modulen sollten in Folgearbeiten Ansätze gefunden werden, mit denen das **Handlungssystem einer Baukastenentwicklung** mit seinen Aktivitäten, Ressourcen und Prozessen beschrieben werden kann. Diese Ansätze könnten dabei helfen, die Entwicklungsaktivitäten für Baukästen weniger nach zeitlichen, sondern mehr nach inhaltlichen Gesichtspunkten zu koordinieren (z. B. mithilfe des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM⁵⁸⁷). Als Beispiel sei die frühzeitige Validierung der Baukasten-Einhüllenden genannt, also die Menge der jeweils technisch anspruchsvollsten Anforderungen eines Baukastens⁵⁸⁸. Außerdem sollten bereits bestehende Baukasten-Entwicklungsmethoden, die bislang in der Automobilindustrie eingesetzt werden (wie in der vorliegenden Arbeit geschehen), auch in anderen Branchen (z. B. Gerätebranche, Maschinen- und Anlagenbau) auf ihre Tauglichkeit untersucht werden. Dabei dürfte die Betrachtung der Bausteine mit ihrem komplexen Zusammenspiel nicht isoliert aus der Sicht der Software, Elektronik

⁵⁸⁷ Siehe Kapitel 2.2.4

⁵⁸⁸ Siehe Kapitel 4.3.1

oder Mechanik erfolgen. Vielmehr sollten baukastengerechte Entwicklungsmethoden künftig eine ganzheitliche mechatronische Systembetrachtung ermöglichen. Hierbei ist die Beschreibung der Baukastenentwicklung mithilfe der Produktgenerationsentwicklung ein vielversprechender Ansatz, der in kommenden Forschungsarbeiten weitergeführt werden kann.

Auf dem Gebiet des **Anforderungsmanagements** wird in der vorliegenden Arbeit eine baukastengerechte Modellierungsmethode für Zielsysteme eingeführt, die mehrere Lösungsansätze in sich vereint. Ein Großteil dieser Ansätze konnte durch die Implementierung im Tool *DOORS* und die Anwendung im Unternehmen unmittelbar in der Entwicklungspraxis eingesetzt werden. Ob einzelne Lösungsansätze, die bislang im industriellen Umfeld eher weniger gebräuchlich sind (z. B. die Vergabe von Reife- und Härtegrad), tatsächlich intensiv genutzt werden, kann erst nach einer gewissen Zeit der Anwendung ermittelt werden. Dies sollte zu einem späteren Zeitpunkt gemeinsam mit anderen Erfahrungen aus der Nutzung untersucht werden. Außerdem kann die bestehende Methode um zusätzliche Aspekte des Anforderungsmanagements erweitert werden, beispielsweise um die systematische Modellierung und Nutzung von Anwendungsfällen zum Ableiten neuer Ziele und Anforderungen. Weiterhin sollte erforscht werden, wie Elemente des Zielsystemmodells mit den korrespondierenden Validierungsaktivitäten verknüpft werden können. Dabei sollten auch bestehende Herangehensweisen zur systematischen Validierung wie der IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz⁵⁸⁹ einfließen.

Schließlich besteht auf dem Forschungsfeld der **Modellbasierten Systementwicklung** Bedarf an weiterführenden Arbeiten. Hierbei sollte die Etablierung des MBSE-Ansatzes im industriellen Umfeld der Produktentwicklung einen Schwerpunkt bilden. Dies erfordert weitere Untersuchungen zur Akzeptanz neuer Entwicklungsmethoden in der Industrie. Jene Akzeptanz hängt von vielen Einflussgrößen ab, von denen nachfolgend die wichtigsten aufgeführt werden. Die Integration neuer Entwicklungsmethoden in die bestehenden Prozesse und Abläufe eines Unternehmens ist für die Erfolgsaussichten einer Methode mindestens genauso wichtig wie ihre Funktionstüchtigkeit⁵⁹⁰. Künftige Forschungsarbeiten sollten also analog der vorliegenden Arbeit anstreben, die Einbindung neuer Methoden als festen Bestandteil der Forschungstätigkeit zu berücksichtigen.

Die soeben geschilderte Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen wurde in der vorliegenden Arbeit – aufgrund des Neuigkeitsgrads der Anwendung von SysML-

⁵⁸⁹ Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

⁵⁹⁰ Repenning & Sterman 2011

Modellen in der Serienentwicklung – in Form eines Praxistests durchgeführt. Aufseiten des Aufwands konnten dabei diverse Zeittreiber bei der Modellerstellung und -pflege ermittelt werden. Die Minimierung dieser Zeittreiber bietet folglich noch Verbesserungspotenzial bei der Anwendung der SysML-Modelle. Ein Ansatzpunkt dazu ist die Vermittlung des MBSE-Ansatzes im Studium technischer Berufe⁵⁹¹. Durch so gesammeltes Grundlagenwissen und erste Praxiserfahrungen aus industrienahen Lehrveranstaltungen kann die Anwendung des MBSE-Ansatzes und der SysML im späteren Berufsleben erleichtert werden. Überdies sollte näher erforscht werden, wie die Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs durch die Kopplung von SysML- und CAD-Modellen unterstützt werden kann. Damit ist nicht die sequenzielle Anwendung der beiden Modelle gemeint (z. B. wie beim einmaligen Übertrag eines SysML-Modells in das CAD-System ab einer gewissen Reife der Daten). Vielmehr müssen Lösungen gefunden werden, die eine Koexistenz beider Modelltypen ermöglicht, denn nur so können sie der iterativen Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten in der Produktentwicklung gerecht werden. Eine weitere Ergänzung des Ansatzes der vorliegenden Arbeit wäre die systematische Versionierung der SysML-Modelle, um deren Änderungshistorie zwecks Nachvollziehbarkeit des Entwicklungsfortschritts sichtbar zu machen. Dazu könnten nach EIGNER PLM-Ansätze verwendet werden, welche dann um Aspekte der MBSE im Rahmen des Systems Lifecycle Managements erweitert werden müssten⁵⁹².

⁵⁹¹ Matthiesen, Schmidt & Moeser 2015

⁵⁹² Eigner, Roubanov & Zafirov 2014; Gilz & Eigner 2013

7 Anhang A: Modellierung von Baukasten-Zielsystemen

7.1 Zielsystemmodellierung nach ALBERS ET AL.

Partial- modelle	Ziele	Anforderungen	Anwendungsfälle
	Funktionen	Gestalt & Implementation	Phasen & Aktivitäten
	Meilensteine & Deliverables	Stakeholder	Tests
Element- Typen	Ziel	Anforderung	Anwendungsfall
	Funktion	Gestalt & Implementation	Phasen & Aktivitäten
	Meilenstein	Deliverable	Stakeholder
	Test	Entscheidung	Begründung
	Dokument & Information	Schnittstelle	
Relations- Typen	Dekomposition	Verfeinerung	Ungerichtete Relation
	Gerichtete Relation	Unterstützung	Konflikt
	Inkonsistenz	Ableitung	Erfüllung
	Verifizierung	Validierung	Verantwortlichkeit
	Treiber		
Attri- bute	Bezeichner	Status	Wichtigkeit
	Autorisation	Änderungsinformation	Freitext

Abbildung 7.1: Partialmodelle, Element- und Relationstypen und Attribute zur Zielsystemmodellierung⁵⁹³

⁵⁹³ Ebel 2015; vgl. auch: Albers, Klingler & Ebel 2013

7.2 Hauptmerkmalliste

Konzept		Produktlebensphasen	
<p>Stoff</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ein- und Ausgangsprodukte: <ul style="list-style-type: none"> • chemische Eigenschaften • physikalische Eigenschaften – Hilfsstoffe – vorgeschriebene Werkstoffe (Nahrungsmittelgesetz u. ä.) – Materialfluss und -transport 	<p>Elektrik / Elektronik</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nennspannung – Nennströme – Netzschwankungen – Sicherung – Schirmung – Filterung – EMV – Anschluss – Verdrahtung – Isolation – Luft-/Kriechstrecken – Stecker – Modulordnung – Funktionsgruppen – SMD-Bauteile – Bauteilverfügbarkeit – Zugänglichkeit – Austausch 	<p>Einkauf</p> <ul style="list-style-type: none"> – Make-or-Buy-Strategie – A-Lieferanten – Local-Content – Katalogbaugruppen – operativer / strategischer Einkauf – Datenaustausch 	<p>Instandhaltung</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wartungsfreiheit bzw. Anzahl und Zeitbedarf der Wartung – Inspektion – Austausch und Instandsetzung – Reinigung – Schmierung – Einsatzort
<p>Energie</p> <ul style="list-style-type: none"> – Leistung – Verlust – Wirkungsgrad – Zustandsgrößen: <ul style="list-style-type: none"> • Druck • Temperatur – Erwärmung – Kühlung – Anschlussenergie – Speicherung – Arbeitsaufnahme – Energieumformung 	<p>Software</p> <ul style="list-style-type: none"> – Integration – Schnittstellen – Updates – Hardware – Testbarkeit – Notbetrieb 	<p>Fertigung</p> <ul style="list-style-type: none"> – Einschränkung durch Produktionsstätte – größte herstellbare Abmessung – bevorzugtes Fertigungsverfahren – Fertigungsmittel – mögliche Qualität und Toleranzen 	<p>Recycling</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wiederverwendung – Entsorgung – Endlagerung – Beseitigung – Schad- und Gefahrstoffe – recyclingkritische Stoffe – Zugänglichkeit – Lösbarkeit
<p>Signal</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ein- und Ausgangssignale – Anzeigart – Betriebsgeräte – Überwachungsgeräte – Signalform 	<p>Sicherheit</p> <ul style="list-style-type: none"> – Unmittelbare Sicherheitstechnik – Mittelbare Sicherheitstechnik – Hinweisende Sicherheitstechnik – Betriebssicherheit – Arbeitssicherheit – Umweltsicherheit – Gefährdungspotential – Grenzkrisiko – Risikobewertung 	<p>Kontrolle</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mess- und Prüfmöglichkeit – besondere Vorschriften (z. B. TÜV, DIN, ISO) 	<p>Transport</p> <ul style="list-style-type: none"> – Begrenzung durch Hebezeuge – Bahnprofil – Transportwege nach Größe und Gewicht – Versandart und -bedingungen – Lieferzeit
<p>Geometrie</p> <ul style="list-style-type: none"> – Abmaße / Dimensionen – Durchmesser – Bauraum – Anzahl – Anordnung – Anschluss – Erweiterung 	<p>Ergonomie</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mensch-Maschine-Beziehung – Anzeige und Bedienelemente: <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung • Bedienungsart • Übersichtlichkeit • Beleuchtung – Anthropometrische Maße – Bedienkräfte – Taktile Kodierung – Haptik 	<p>Montage</p> <ul style="list-style-type: none"> – besondere Montagevorschriften – Zusammenbau – Einbau – Baustellenmontage – Fundamentierung – Werkzeuge – Hilfsstoffe – Sicherheitsdatenblätter 	<p>Gebrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> – Geräuscharmut – Verschleißrate – Anwendung und Absatzgebiet – Einsatzort (z. B. schwefelige Atmosphäre, Tropen, ...) – Feuchtigkeit – Dienstleistung
<p>Mechanik</p> <ul style="list-style-type: none"> – Gewicht – Last – Kräfte: <ul style="list-style-type: none"> • statisch • dynamisch – Reibung – Wärmespannung – Stabilität – Festigkeit: <ul style="list-style-type: none"> • Verformung • Steifigkeit – Kinematik: <ul style="list-style-type: none"> • Bewegungsart und -richtung • Beschleunigung • Geschwindigkeit – Kinetik: <ul style="list-style-type: none"> • Federeigenschaften • Resonanzen 	<p>Industrial Design</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bedeutung – Ästhetische Funktionen – Anzeichenfunktionen – Symbolfunktionen – Produktwiedererkennungswert – Farbgebung – Sinus-Milieu 	<p>Organisation</p>	
		<p>Planung</p> <ul style="list-style-type: none"> – max. zulässige Herstellkosten – Werkzeugkosten – Investition – Amortisation – Ende der Entwicklung – Liefertermin – Netzplan für Zwischenschritte – Pönalen – Unternehmens-Know-how 	<p>Nachhaltigkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> – Öko-Bilanz – Energieeffizienz – Systemkosten
		<p>Markt</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wettbewerber – Kundensegmente – Kundenverhalten und -bedürfnisse – marktüblicher Standard – Verkaufszahlen – Trends 	

Abbildung 7.2: Hauptmerkmalliste⁵⁹⁴

8 Anhang B: Fragebogen zum Anforderungsmanagement

8.1 Fragen

Teil 1: Fragen zur Entwicklung von Hybridtriebsträngen

Bitte beurteilen Sie folgende Aussage zur Komplexität in der Entwicklung von Hybridtriebsträngen!

		...nicht komplex.	...wenig komplex.	...komplex.	...sehr komplex.	...sehr stark komplex.
1.1	Die Entwicklung von Hybridtriebsträngen ist...					

Bitte geben Sie an, was Ihrer Meinung nach – speziell im Vergleich mit der Entwicklung von reinen Verbrenner- oder Elektrofahrzeugen – die Ursachen dafür sind!

		...keiner Komplexität.	...geringer Komplexität.	...Komplexität.	...hoher Komplexität.	...sehr hoher Komplexität.
1.2	Die Beteiligung vieler unterschiedlicher Fachdisziplinen an der Entwicklung führt zu...					
1.3	Die erhöhte Anzahl an Teilsystemen (z.B. Hochvolt-Komponenten) führt zu...					
1.4	Die erhöhte Anzahl an Funktionen (z.B. Boosten) führt zu...					
1.5	Die erhöhte Anzahl an Schnittstellen (technisch & organisatorisch) führt zu...					
1.6	Die angespanntere Bauraum-Situation (z.B. Platzprobleme im Mitteltunnel) führt zu...					

		...nicht komplex.	...wenig komplex.	...komplex.	...sehr komplex.	...sehr stark komplex.
2.1	Die Entwicklung von Baukästen ist...					

Im Folgenden sind einige Charakteristika der Entwicklung von Baukästen aufgeführt. Bitte geben Sie an, welchen Einfluss diese Ihrer Meinung nach auf die Entwicklung von Baukästen haben!

		...keiner Komplexität.	...geringer Komplexität.	...Komplexität.	...hoher Komplexität.	...sehr hoher Komplexität.
2.2	Die technische Abhängigkeit zwischen Fahrzeug-Entwicklungsprojekten, die dieselben Module nutzen, führt zu ...					
2.3	Der Zeitversatz zwischen Fahrzeug-Entwicklungsprojekten, die dieselben Module nutzen, führt zu ...					
2.4	Die Beteiligung vieler Interessenvertreter an der Entwicklung (z.B. Lieferant, Sub-Lieferant, mehrere Konzern-Marken) führt zu ...					
2.5	Die Varianz der unterschiedlichen Module innerhalb eines Baukastens (z.B. Unterschiede zwischen verschiedenen Hybridmodul-Varianten) führt zu ...					

Teil 2: Fragen zu Zielen und Anforderungen in der Baukastenentwicklung

		Trifft gar nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft teilweise zu	Trifft eher zu	Trifft voll und ganz zu
3.1	In der Baukastenentwicklung ist es wichtig, dass alle wesentlichen Ziele und Anforderungen sicher identifiziert sind.					
3.2	In der Baukastenentwicklung ist es wichtig, dass alle Interessenvertreter über die aktuell geltenden Ziele und Anforderungen informiert und abgestimmt sind.					
3.3	In der Baukastenentwicklung ist es wichtig, dass alle Interessenvertreter die Tragweite und Auswirkungen von bereits kommunizierten Zielen und Anforderungen verstanden haben.					
3.4	In der Baukastenentwicklung sind Ziele und Anforderungen häufig unsicherheitsbehaftet.					
4.1	In meiner Arbeit in der Baukastenentwicklung bin ich häufig damit beschäftigt, die Auswirkungen von wesentlichen nicht erkannten Zielen und Anforderungen zu beheben.					
4.2	In meiner Arbeit in der Baukastenentwicklung bin ich häufig damit beschäftigt, mich mit den Interessenvertretern über die aktuellen Ziele und Anforderungen abzustimmen.					
4.3	In meiner Arbeit in der Baukastenentwicklung bin ich häufig damit beschäftigt, den Interessenvertretern die Tragweite und Auswirkungen von bereits kommunizierten Zielen und Anforderungen zu erläutern.					
4.4	In meiner Arbeit in der Baukastenentwicklung treffe ich häufig Entscheidungen zu Zielen und Anforderungen, auch wenn diese mit Unsicherheit behaftet sind.					

		Trifft gar nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft teilweise zu	Trifft eher zu	Trifft voll und ganz zu
5.1	Eine Methode, die dabei hilft, Ziele und Anforderungen nicht zu übersehen (z.B. mithilfe von Lessons Learned aus vergangenen Entwicklungen), könnte die Baukastenentwicklung verbessern.					
5.2	Eine Methode, die dabei hilft, alle Interessenvertreter zuverlässig über die aktuellen Ziele und Anforderungen zu informieren (z. B. ein Anforderungsmanagement-System), könnte die Baukastenentwicklung verbessern.					
5.3	Eine Methode, die dabei hilft, die Tragweite und Auswirkungen von Zielen und Anforderungen klar zum Ausdruck zu bringen (z. B. vernetzte Darstellung von Zielen und Anforderungen), könnte die Baukastenentwicklung verbessern.					
5.4	Eine Methode, die dabei hilft, die Unsicherheit von Zielen und Anforderungen besser einschätzen zu können (z. B. Nennung von Entscheidungstermin, ausstehende Validierung), könnte die Baukastenentwicklung verbessern.					
6.1	Eine Methode, die dabei hilft, Ziele und Anforderungen nicht zu übersehen (z. B. mithilfe von Lessons Learned aus vergangenen Entwicklungen), könnte meine Arbeit in der Baukastenentwicklung erleichtern.					
6.2	Eine Methode, die dabei hilft, alle Interessenvertreter über aktuelle Ziele und Anforderungen zu informieren, könnte meine Arbeit in der Baukastenentwicklung erleichtern.					
6.3	Eine Methode, die dabei hilft, die Tragweite und Auswirkungen von Zielen und Anforderungen klar zum Ausdruck zu bringen (z. B. vernetzte Darstellung von Zielen und Anforderungen), könnte meine Arbeit in der Baukastenentwicklung erleichtern.					
6.4	Eine Methode, die dabei hilft, die Unsicherheit von Zielen und Anforderungen besser einschätzen zu können, könnte meine Arbeit in der Baukastenentwicklung erleichtern.					

8.2 Auswertungen

Diskussion der wichtigsten Ergebnisse des Fragebogens siehe Kapitel 4.2.

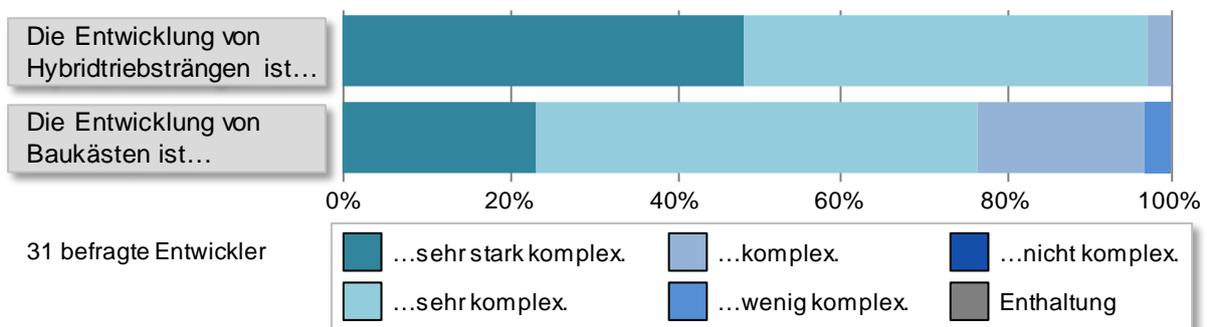


Abbildung 8.1: Auswertung der Fragen 1.1 und 2.1

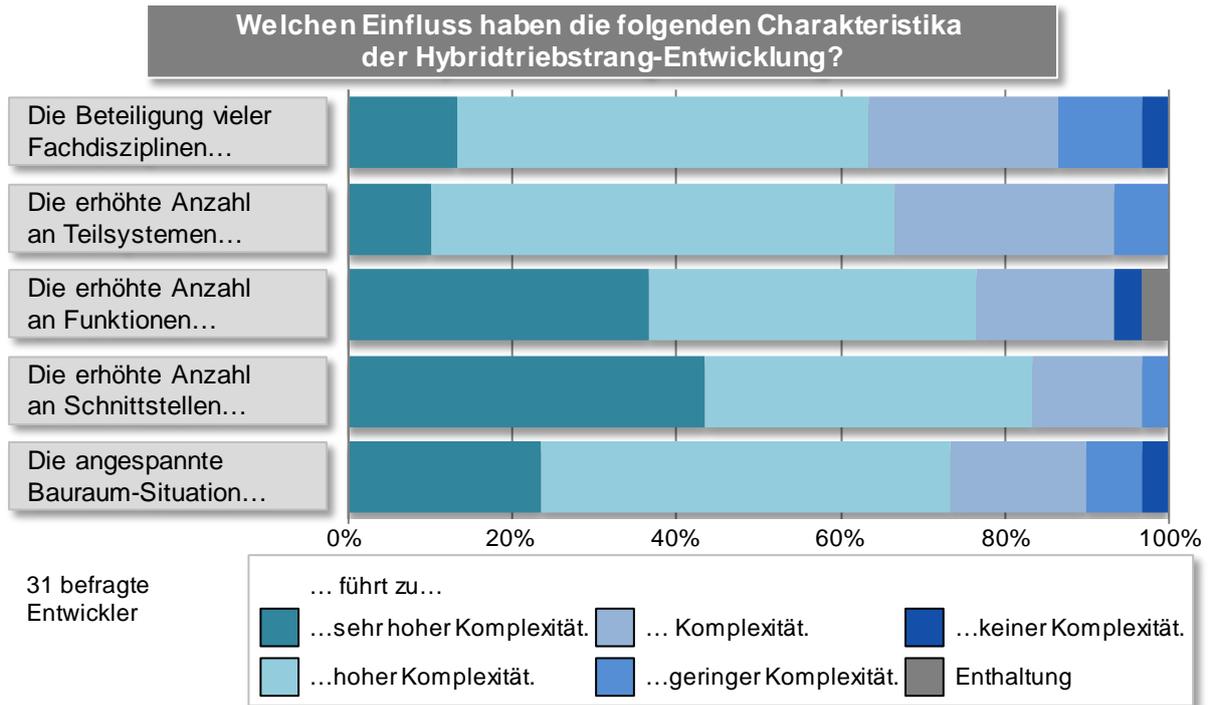


Abbildung 8.2: Auswertung der Fragen 1.2 bis 1.6

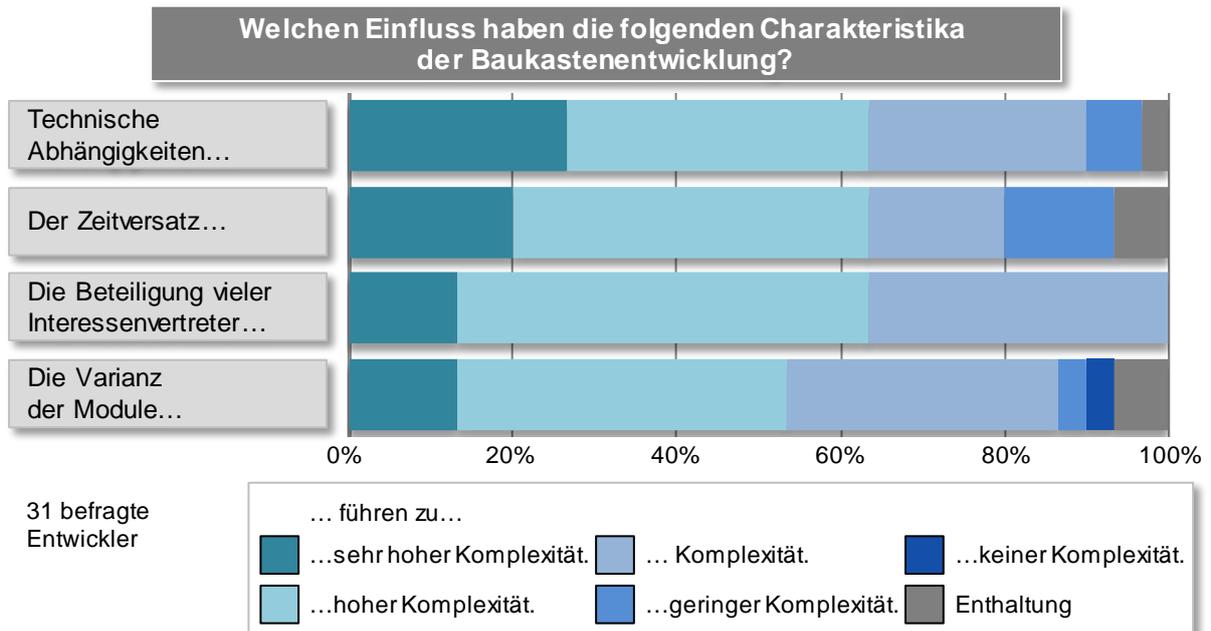


Abbildung 8.3: Auswertung der Fragen 2.2 bis 2.5

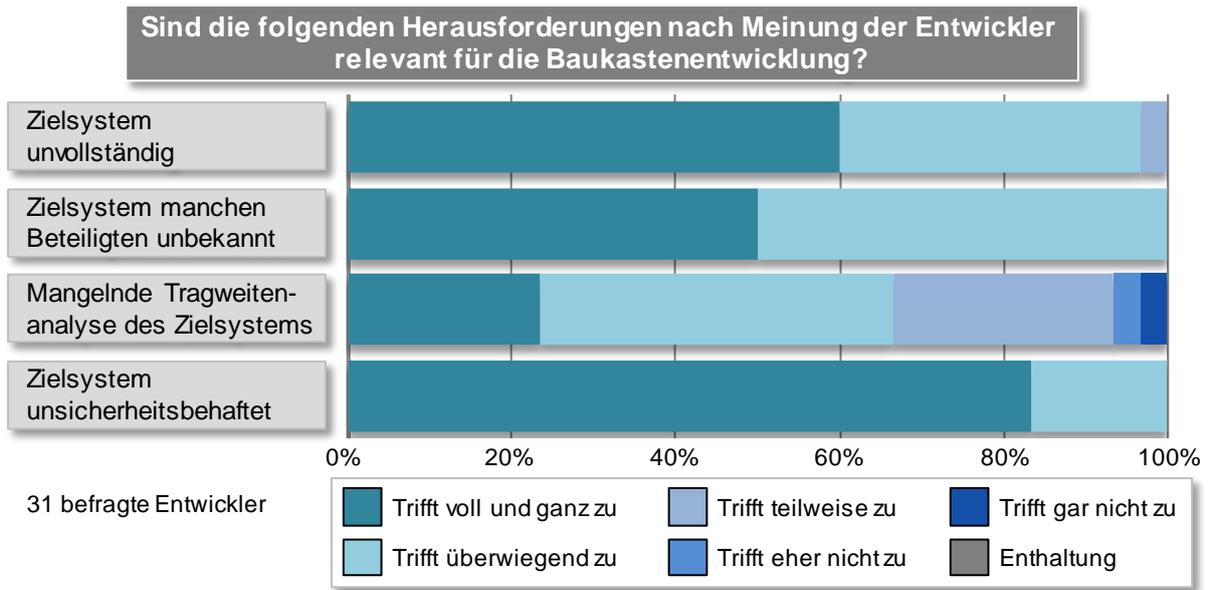


Abbildung 8.4: Auswertung der Fragen 3.1 bis 3.4

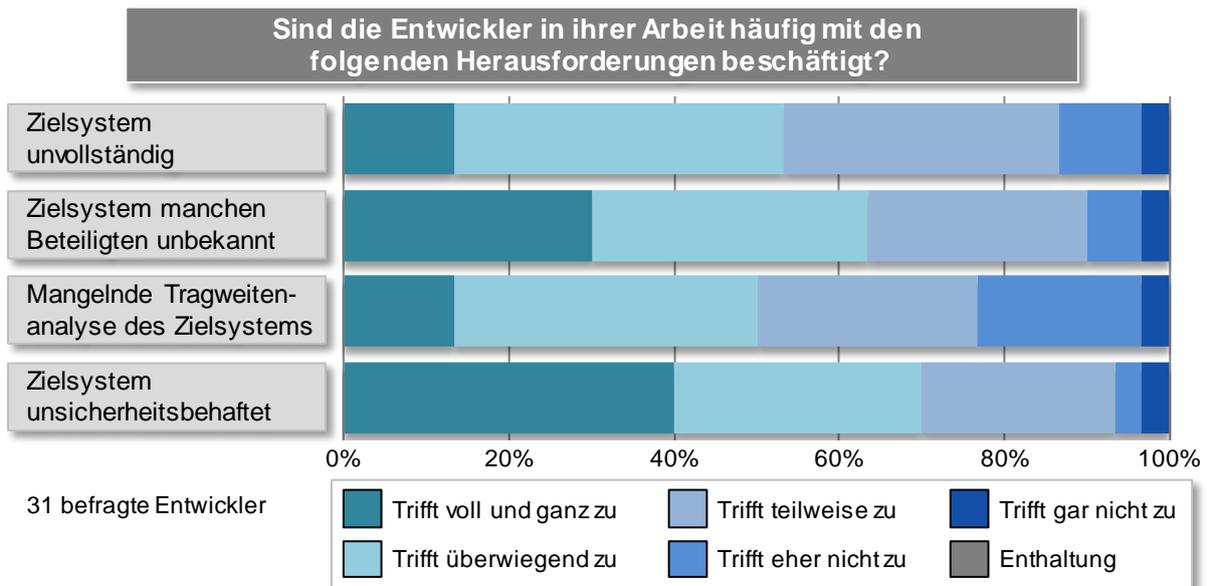


Abbildung 8.5: Auswertung der Fragen 4.1 bis 4.4

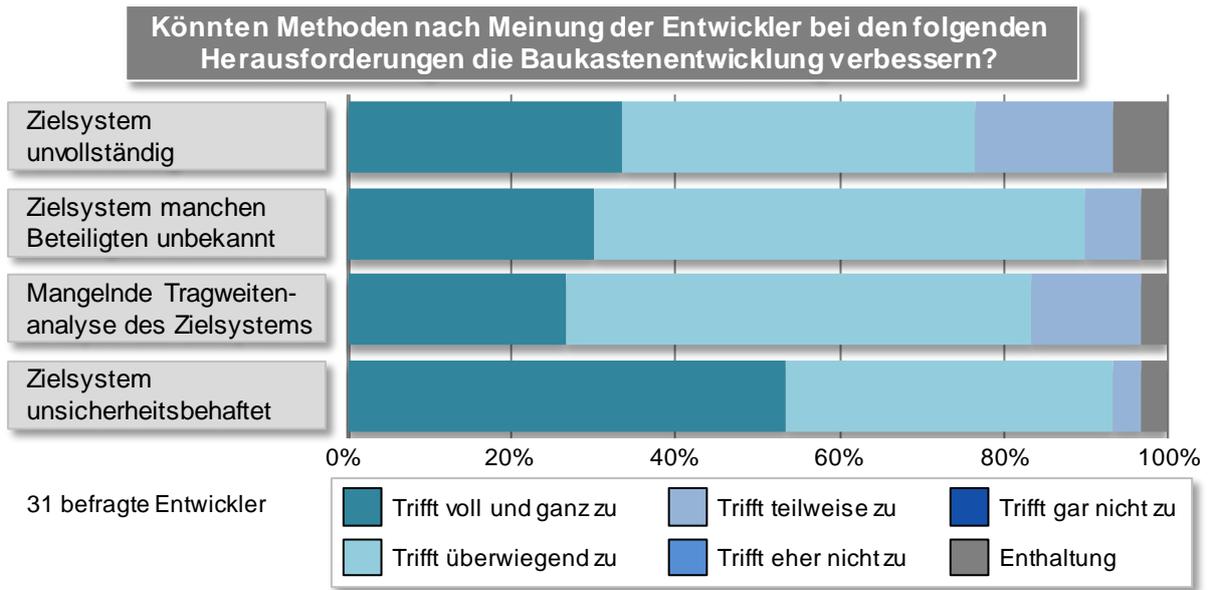


Abbildung 8.6: Auswertung der Fragen 5.1 bis 5.4

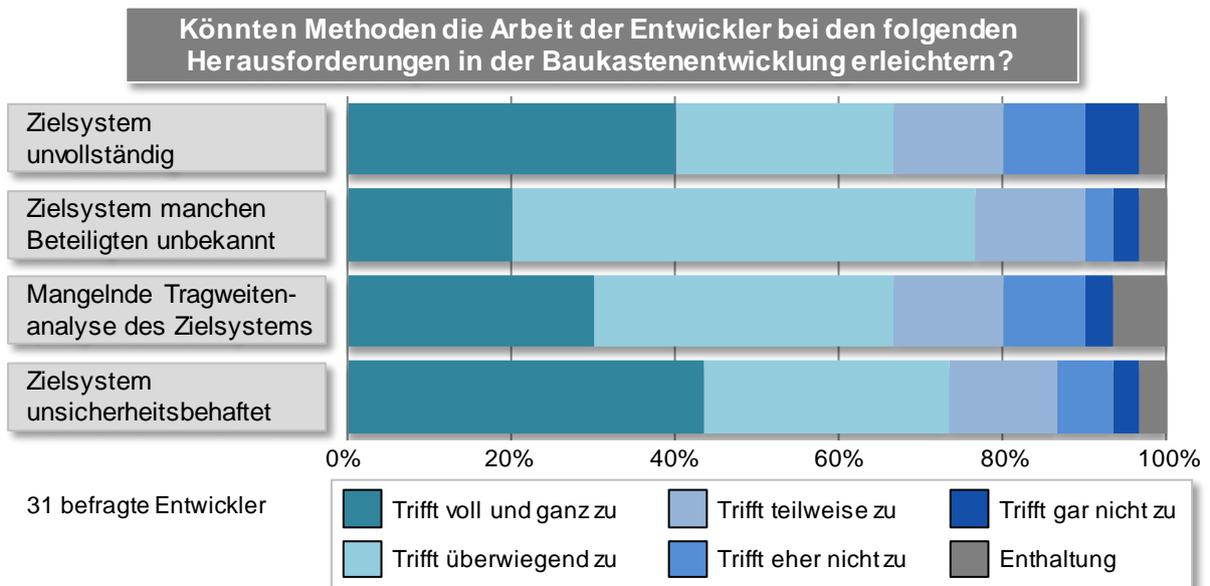


Abbildung 8.7: Auswertung der Fragen 6.1 bis 6.4

9 Anhang C: Ansichten und Beispiele des SysML-Modells

9.1 Auszüge aus Bau- und Funktionsstruktur

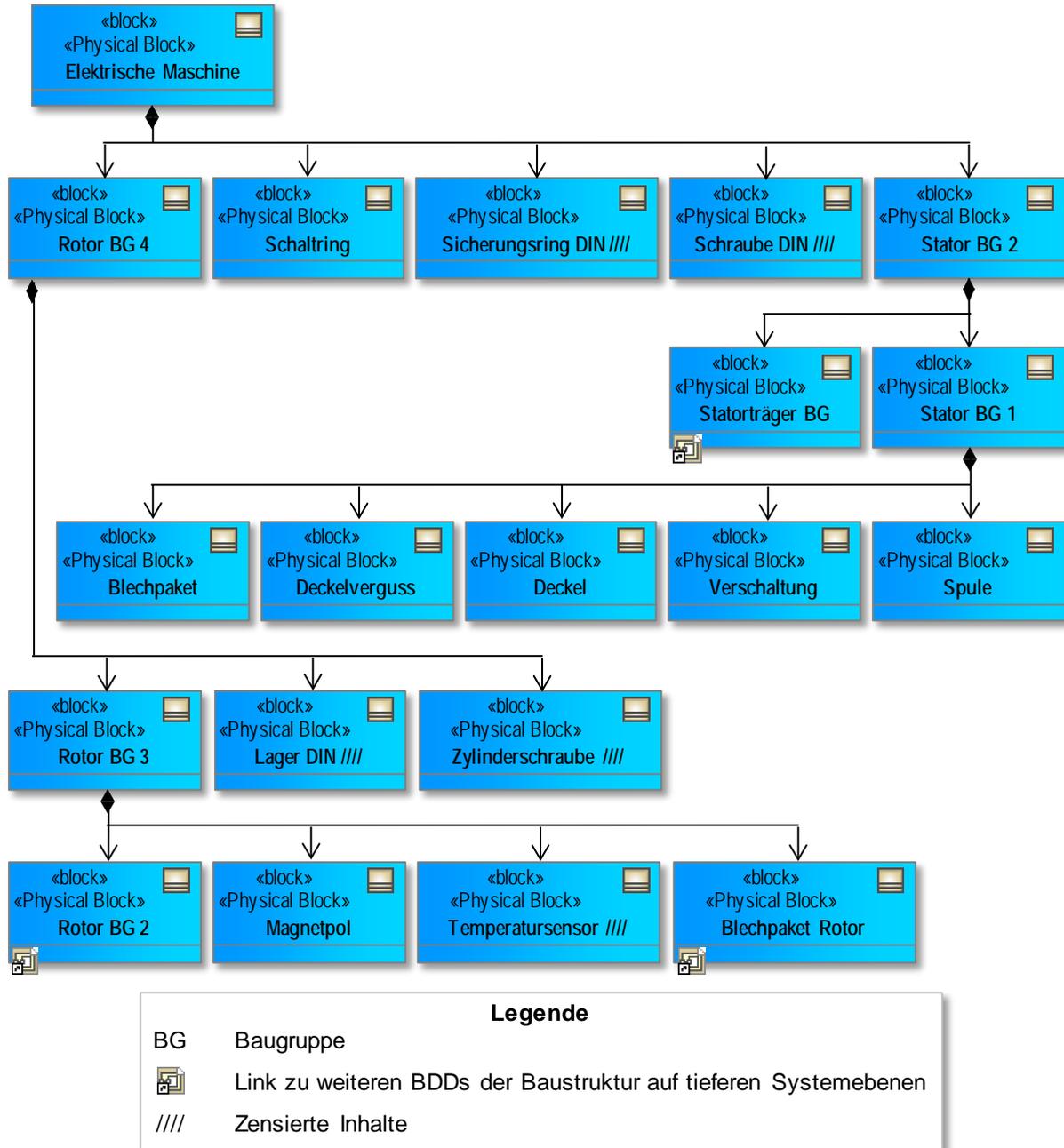


Abbildung 9.1: Exemplarische Ansicht der Baustuktur des Hybridmoduls in SysML: Beispiel Teilsystem E-Maschine

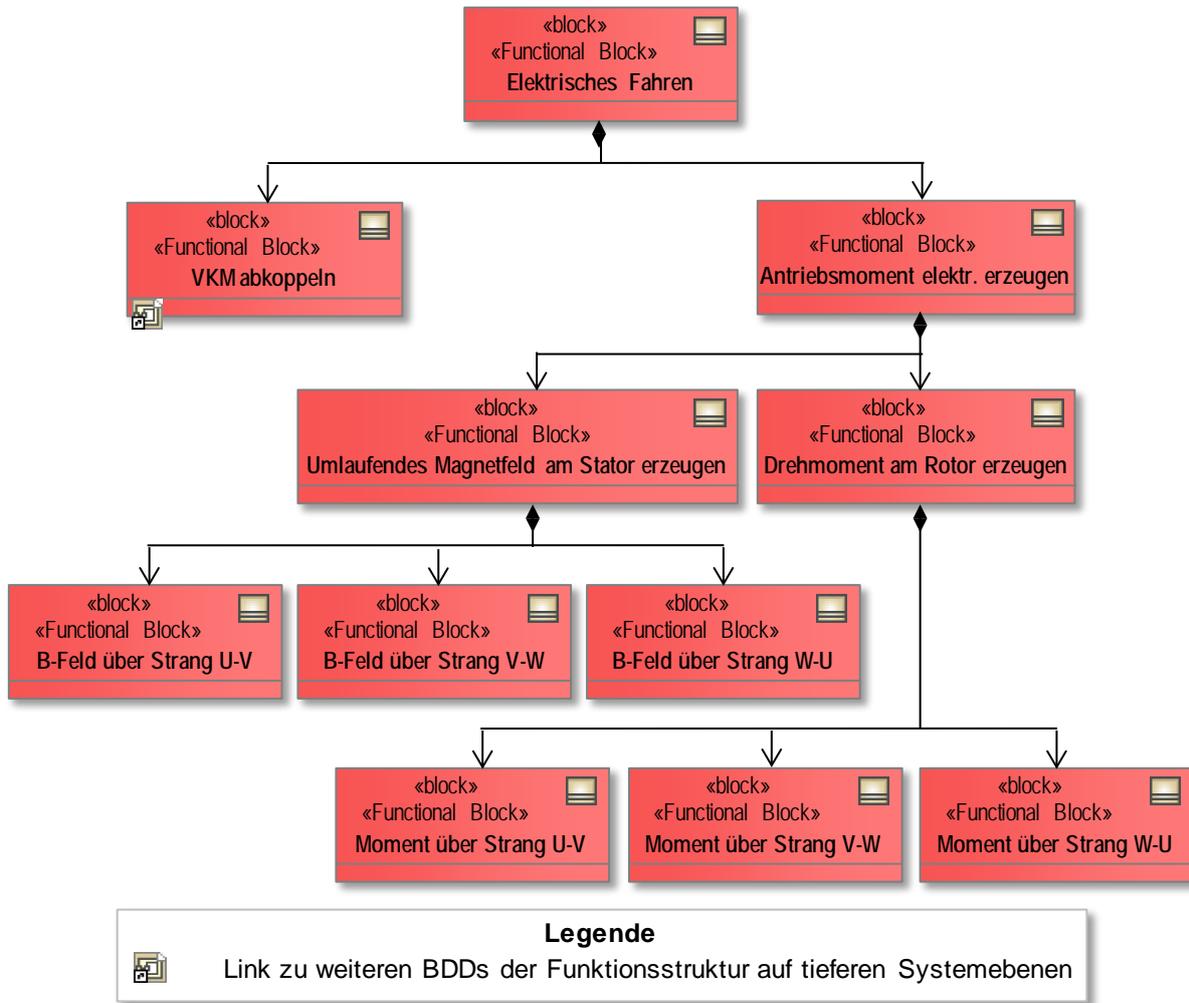


Abbildung 9.2: Exemplarische Ansicht der Funktionsstruktur des Hybridmoduls in SysML: Beispiel elektrisches Fahren

9.2 Beispiele für Funktionen und Lessons Learned in SysML

9.2.1 Fallbeispiel 1: Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten

Die folgenden Abbildungen dienen der ausführlichen Illustration des in Kapitel 5.3.2 und in der Abbildung 5.11 ausgeführten Beispiels.



Abbildung 9.3: IBD der Funktion „Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten“

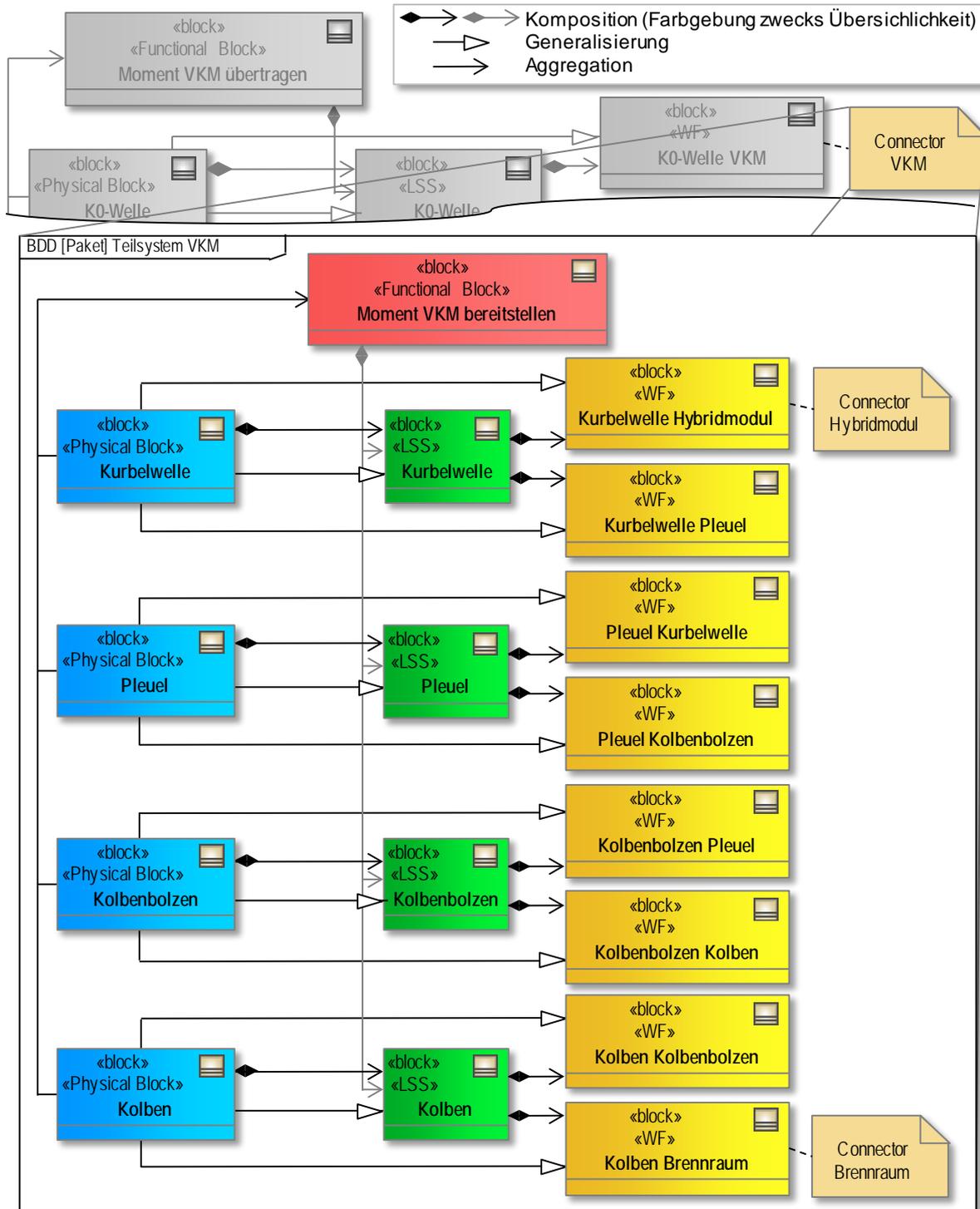
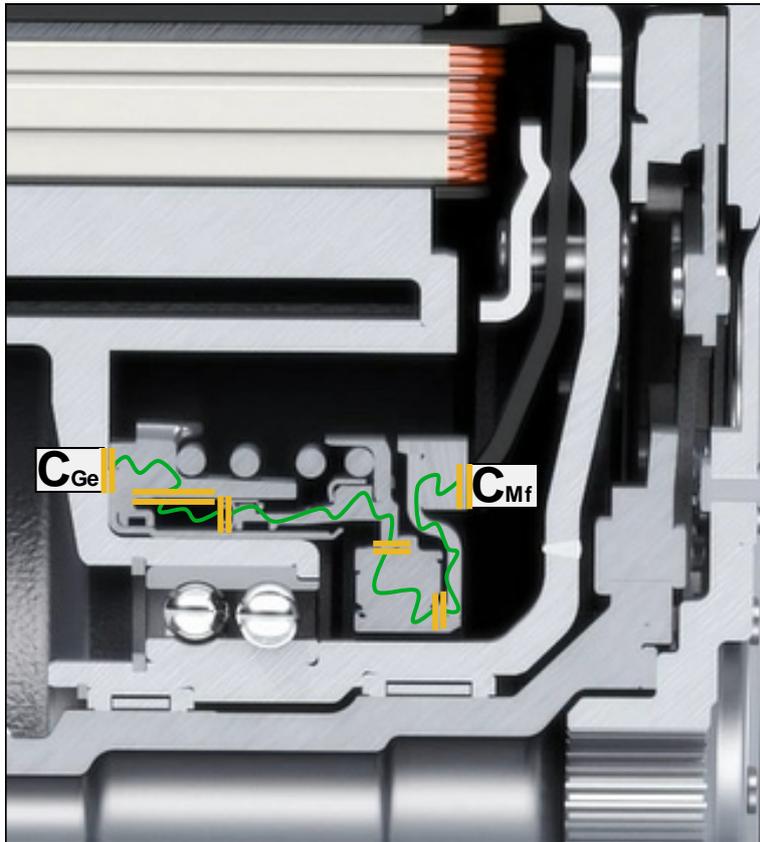


Abbildung 9.4: Connector als Link zu einem Teilsystem der Systemumgebung (hier: Teilsystem „Kurbeltrieb“ der VKM zur Bereitstellung des VKM-Drehmoments)

9.2.2 Fallbeispiel 2: Werkstoffänderung am Trennkupplungs-Aktuator

Vorstellung des aufgeführten Fallbeispiels siehe Kapitel 5.4.3.



Legende	
	Leitstützstruktur (LSS)
	Wirkflächenpaar (WFP)
	Connector (C)
Ge:	Gehäuse
Mf:	Membranfeder

Abbildung entnommen aus:
Richter, Schiek, Stache,
Spiegel & Kerner 2013

Hinweise

Diese Darstellung des Wirknetzes der Funktion „Trennkupplung ausrücken“ mithilfe des C&C²-Ansatzes befindet sich im SysML-Modell im selben BDD wie die in Abbildung 9.6 gezeigten Blöcke. In der vorliegenden Arbeit wurde sie aus Platzgründen auf einer eigenen Seite dargestellt.

Aus Geheimhaltungsgründen wurde der CAD-Screenshot des ursprünglichen SysML-Modells durch eine Abbildung der Vorgänger-Generation des Hybridmoduls ersetzt. Das eingezeichnete Wirknetz ist jedoch identisch.

Abbildung 9.5: Wirknetz der Funktion „Trennkupplung ausrücken“

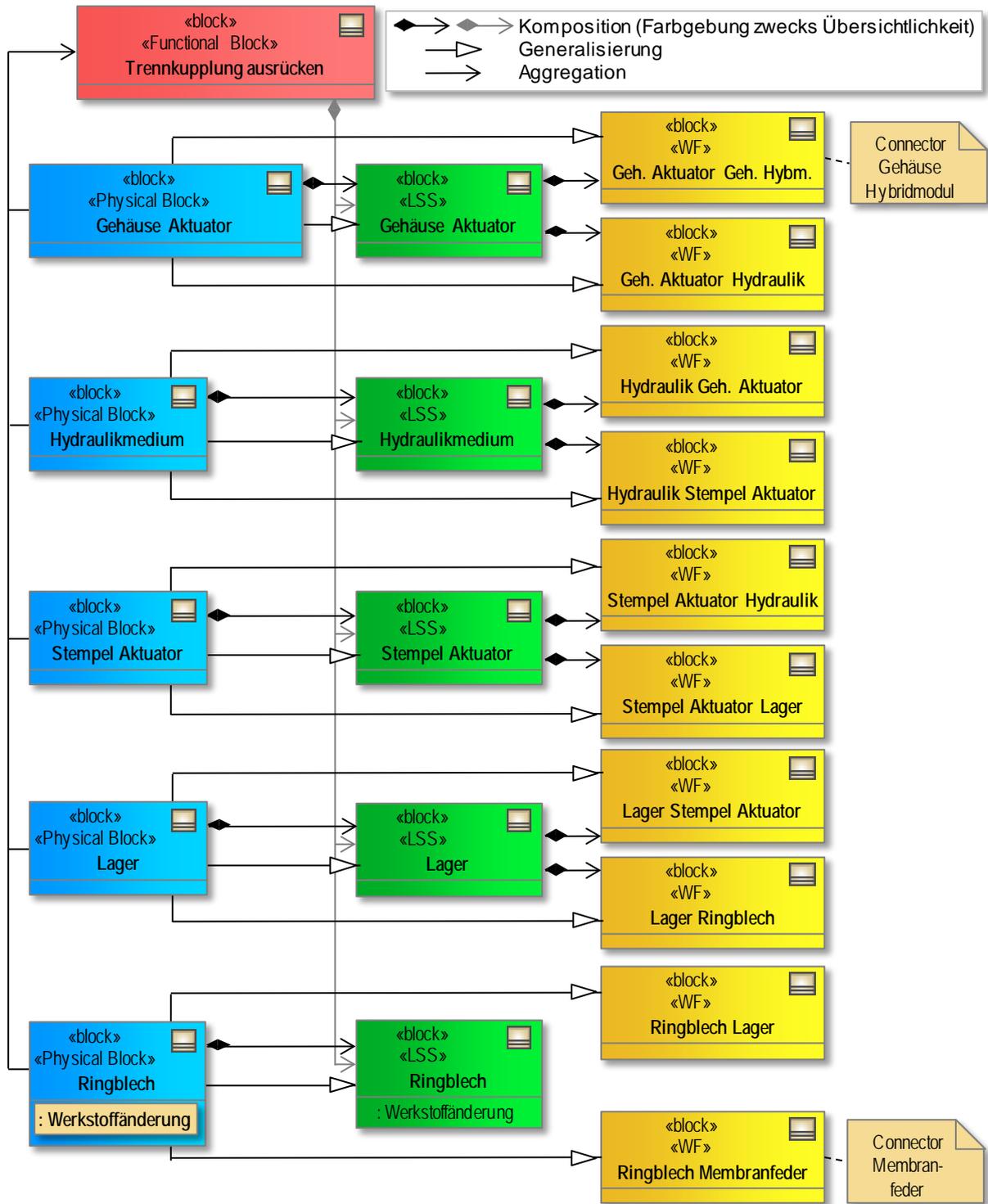


Abbildung 9.6: BDD der Funktion „Trennkupplung ausrücken“

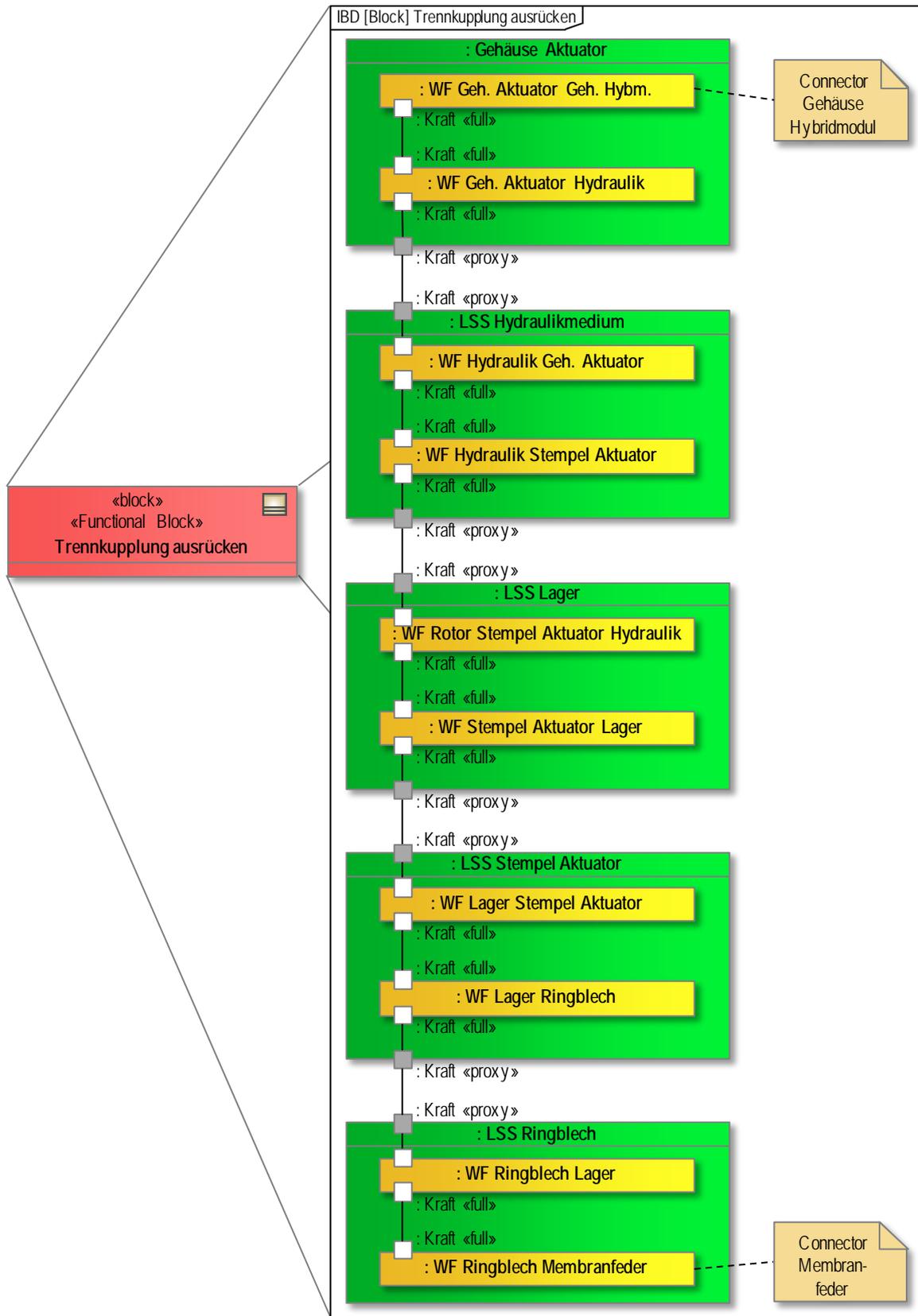


Abbildung 9.7: IBD der Funktion „Trennkupplung ausrücken“

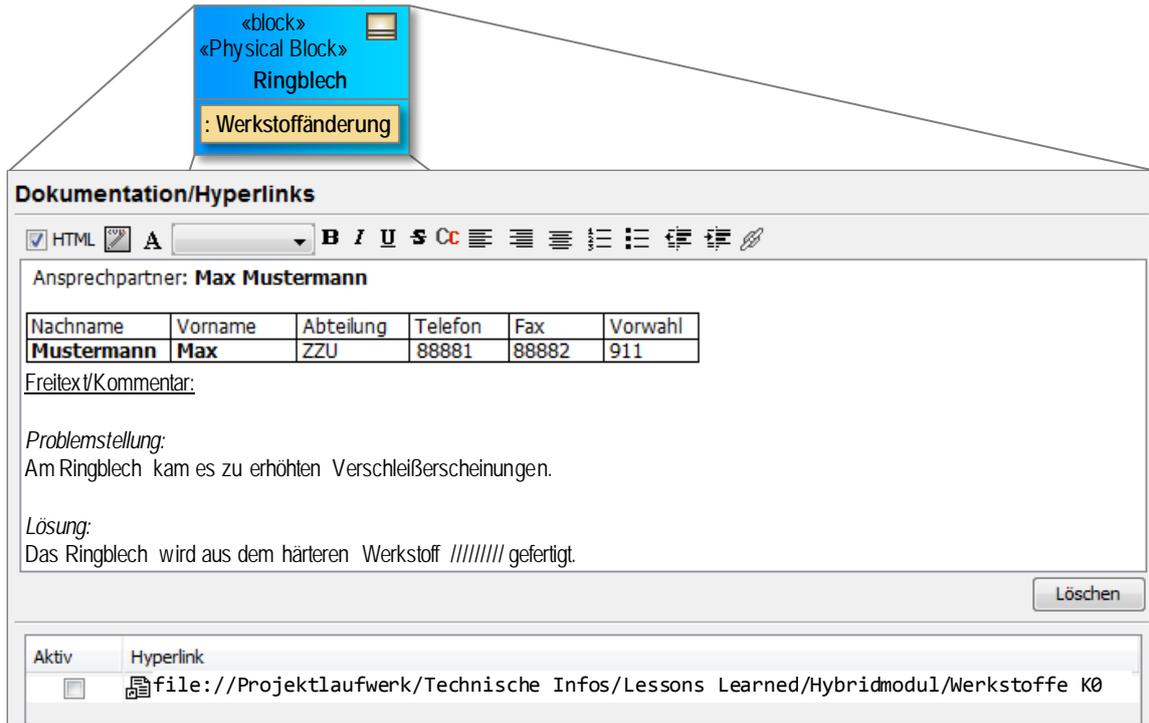


Abbildung 9.8: Kontextmenü eines Bauteils, dessen Werkstoff geändert wurde

9.2.3 Fallbeispiel 3: Optimierung der Entwärmung des Stators der E-Maschine

Vorstellung des aufgeführten Fallbeispiels siehe Kapitel 5.4.3.

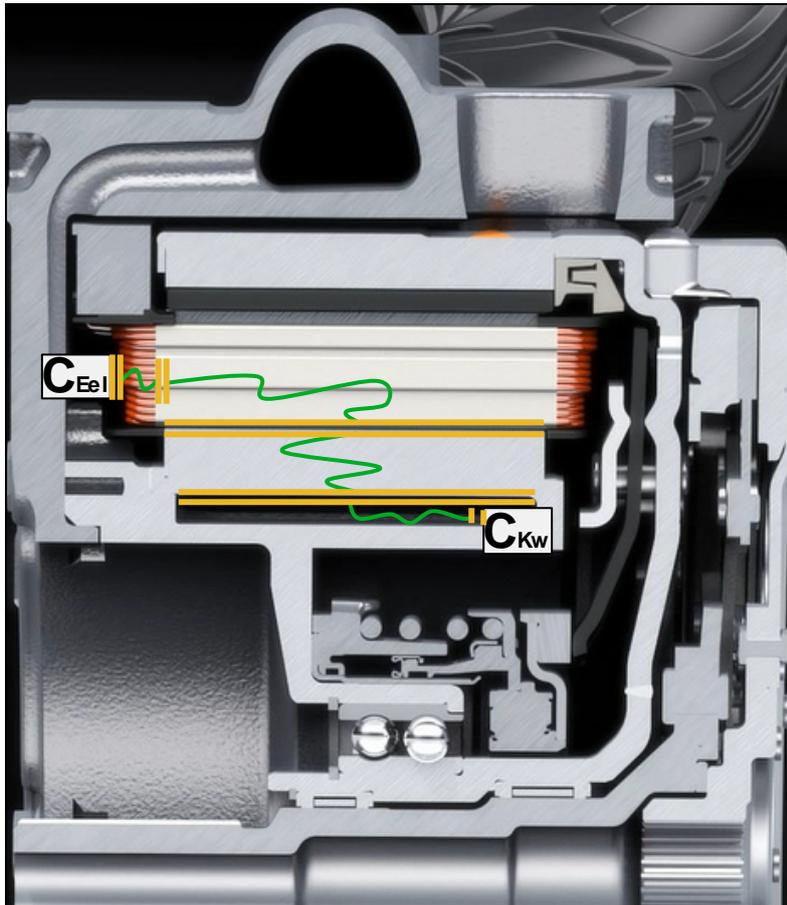


Abbildung entnommen aus:
Richter, Schiek, Stache,
Spiegel & Kerner 2013

Hinweise

Diese Darstellung des Wirknetzes der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“ mithilfe des C&C²-Ansatzes befindet sich im SysML-Modell im selben BDD wie die in Abbildung 9.10 gezeigten Blöcke. In der vorliegenden Arbeit wurde sie aus Platzgründen auf einer eigenen Seite dargestellt.

Aus Geheimhaltungsgründen wurde der CAD-Screenshot des ursprünglichen SysML-Modells durch eine Abbildung der Vorgänger-Generation des Hybridmoduls ersetzt. Das eingezeichnete Wirknetz ist jedoch identisch.

Abbildung 9.9: Wirknetz der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“

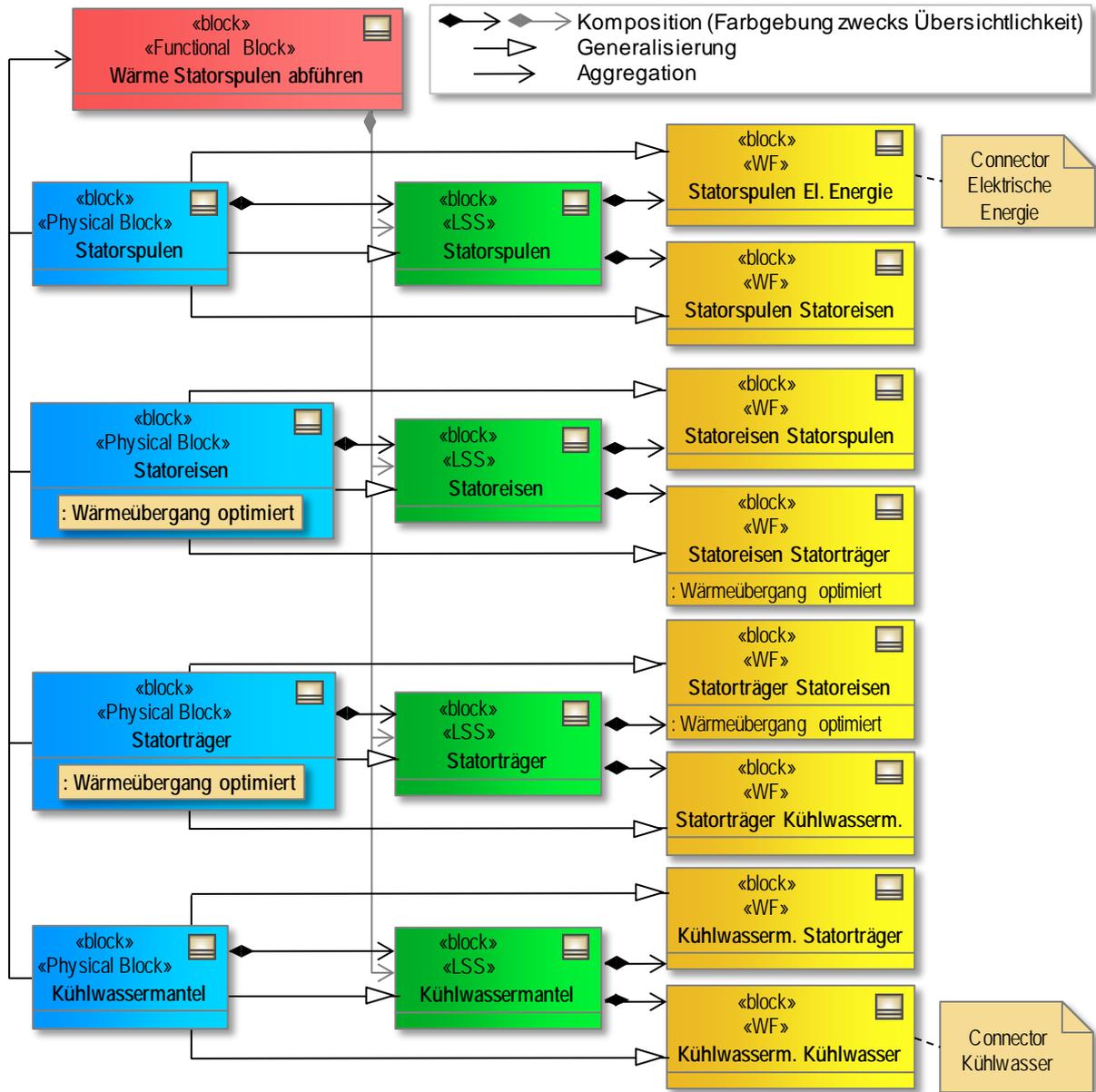


Abbildung 9.10: BDD der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“

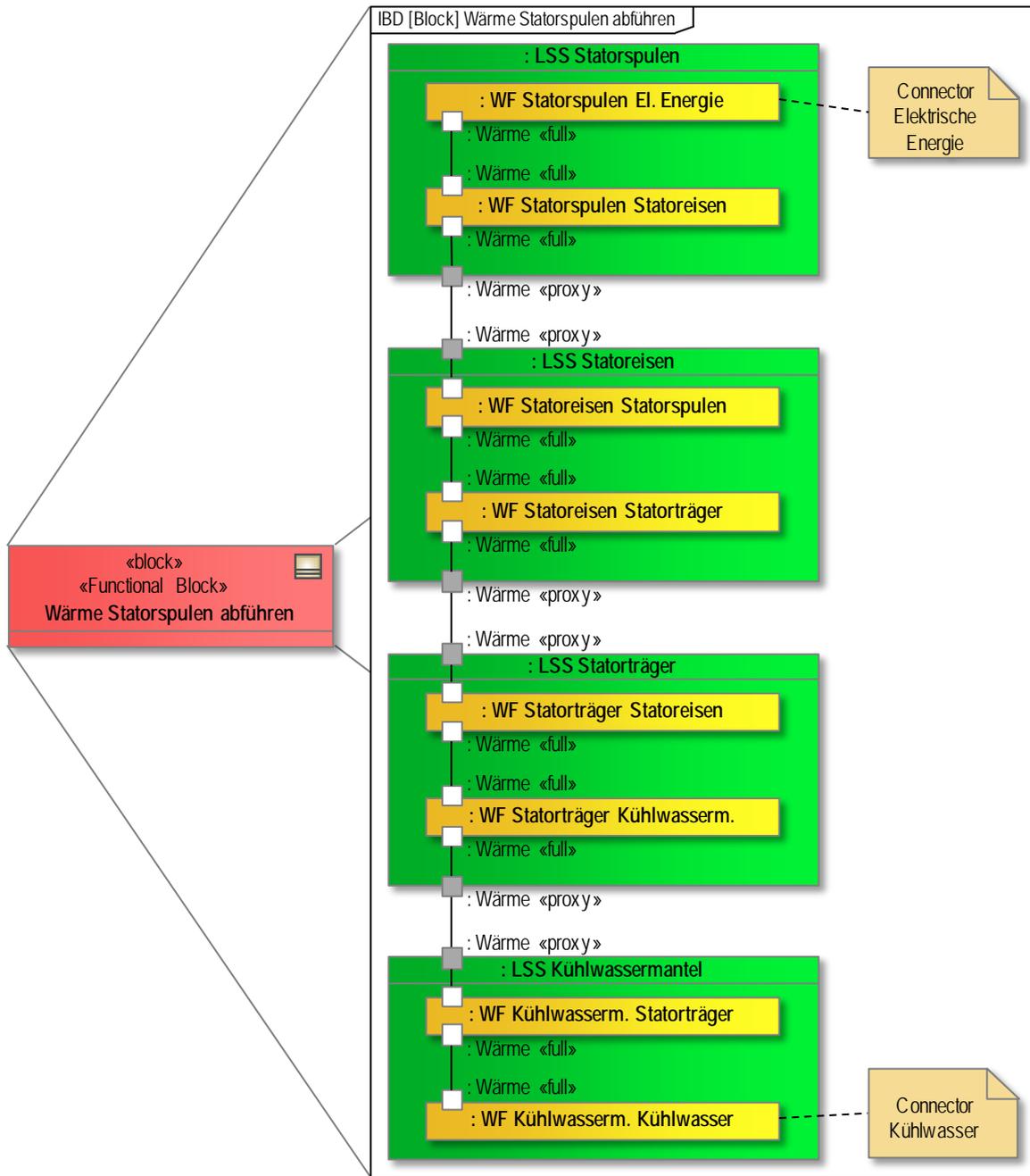
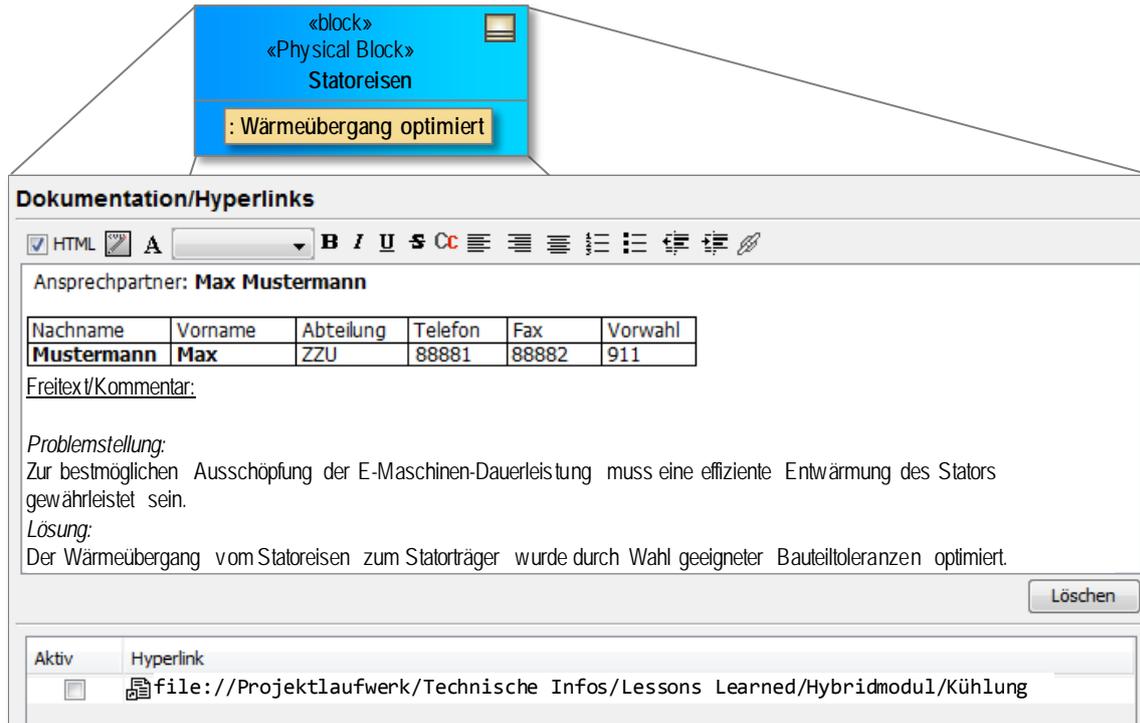


Abbildung 9.11: IBD der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“



Hinweis

Dasselbe Kontextmenü kann durch Anklicken des Physical Blocks „Statorträger“ (Abbildung 9.10) aufgerufen werden.

Abbildung 9.12: Kontextmenü eines Bauteils, das hinsichtlich des Wärmeübergangs an einer seiner Wirkflächen optimiert wurde

Literaturverzeichnis

Achleitner & Döllner 2011

Achleitner, A.; Döllner, G.: *Fahrzeugkonzept und Package*. In: Braess, H. H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

Ahrens 2000

Ahrens, G.: *Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen – Methodische Voraussetzungen und Anwendung in der Praxis*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000.

Akao 2009

Akao, Y.: *QFD – Quality Function Deployment*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/ Lech, 2009.

Albers 1994

Albers, A.: *Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik Werkzeuge zur Effizienzsteigerung*. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI-Berichte Nr. 1120, S. 73-106, Düsseldorf, 1994.

Albers et al. 2009

Albers, A.; Braun, A.; Clarkson, P. J.; Enkler, H. G.; Wynn, D.: *Contact and channel modelling to support early design of technical systems*. In: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED), Vol. 5, Stanford University, 2009.

Albers 2010

Albers, A.: *Five Hypotheses and a Meta Model of Engineering Design Processes*. In: 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE), Ancona, 2010.

Albers et al. 2010

Albers, A.; Braun, A.; Sadowski, E.; Wynn, D. C.; Wyatt D. F.; Clarkson, P. J.: *Contact and Channel Modeling using part and function libraries in a function-based design approach*. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE), Montreal, 2010.

Albers 2011

Albers, A.: *Der Entwickler im Zentrum des Systems der Produktentstehung*. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP), Stuttgart, 2011.

Albers et al. 2011

Albers, A.; Braun, A.; Sadowski, E.; Wynn, D. C.; Wyatt, F.; Clarkson, P. J.: *System Architecture Modeling in a Software Tool Based on the Contact and Channel Approach (C&C-A)*. In: Journal of Mechanical Design, Vol. 133, Nr. 10, DOI: 10.1115/1.4004971, 2011.

Albers 2012

Albers, A.: *Elastische Elemente, Federn*. In: Steinhilper, W.; Sauer, B. (Hrsg.): Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, 8. Auflage, Springer, Heidelberg, 2012.

Albers et al. 2014

Albers, A.; Behrendt, M.; Brezger, F.; Matros, K.; Steiger, B.; Holzer, H.; Bohne, W.: *Definition and implementation of a benchmarking in order to derive success factors of hybrid powertrains*. 14. Internationales Stuttgarter Symposium "Automobil- und Motorenteknik", Stuttgart, 2014.

Albers et al. 2014a

Albers, A.; Behrendt, M.; Matros, K.; Holzer, H.; Bohne, W.: *Development of hybrid-powertrains by means of X-in-the-Loop-Approach*. 11. Symposium „Hybrid- und Elektrofahrzeuge“, Braunschweig, 2014.

Albers et al. 2014b

Albers, A.; Matros, K.; Behrendt, M.; Holzer, H.; Bohne, W.: *Darstellung und Bewertung von Hybridantrieben mithilfe eines Hybrid-Erlebnis-Prototypen*. 16. MTZ-Fachtagung „VPC plus – Simulation und Test für die Antriebsentwicklung“, Hanau, 2014.

Albers et al. 2014c

Albers, A.; Bursac, N.; Urbanec, J.; Lüdcke, R.; Rachenkova, G.: *Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study*. 25. DfX-Symposium, Bamberg, 2014.

Albers et al. 2014d

Albers, A.; Matthiesen, S.; Bursac, N.; Moeser, G.; Schmidt, S.; Lüdcke, R.: *Abstraktionsgrade der Systemmodellierung – von der Sprache zur Anwendung*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Bremen, 2014.

Albers et al. 2016

Albers, A.; Matthiesen, S.; Bursac, N.; Moeser, G.; Klingler, S.; Munker, F.; Schmidt, S.; Scherer, H.; Kurrle, A.: *Model-Based Systems Engineering in der Karlsruher Schule – 5 Jahre Forschung für die Anwendung & Lehre*. In: Kohlhammer, K. (Hrsg.): *develop³*, Ausgabe 01/2016, S. 38-41, Leinfelden-Echterdingen, 2016.

Albers, Alink, Matthiesen & Thau 2008

Albers, A.; Alink, T.; Matthiesen, S.; Thau, S.: *Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design through the Contact & Channel Model*. In: Proceedings of the International DESIGN Conference, Dubrovnik, 2008.

Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: *Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess*. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*, Carl Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-44518-5, München, 2016.

Albers & Braun 2011

Albers, A.; Braun, A.: *A Generalized Framework to Compass and to Support Complex Product Engineering Processes*. In: *International Journal of Product Development*, Vol. 15, Nr. 1/2/3, S. 6-25, 2011.

Albers & Braun 2011a

Albers, A.; Braun, A.: *Der Prozess der Produktentstehung*. In: Henning, F.; Moeller, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*, S. 5-30, Hanser, München, 2011.

Albers & Braun 2012

Albers, A.; Braun, A.: *Towards Handling Complexity - Testing the iPeM Process Modeling Approach*. In: Horváth, I.; Albers, A.; Behrendt, M.; Rusák, Z. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th international symposium on tools and methods of competitive engineering (TMCE)*, Karlsruhe, 2012.

Albers, Braun & Muschik 2010

Albers, A.; Braun, A.; Muschik, S.: *Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes*. In: Heisig, P.; Clarkson P. J.; Vajna, S. (Hrsg.): *Modelling and Management of Engineering Processes*, Springer, London, 2010.

Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005

Albers, A.; Burkardt, N.; Meboldt, M.; Saak, M.: *SPALTEN problem solving methodology in the product development*. Conference on Engineering Design (ICED), Melbourne, 2005.

Albers, Burkardt & Saak 2002

Albers, A.; Burkardt, N.; Saak, M.: *Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode*. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 2002.

Albers, Bursac & Scherer 2014

Albers, A.; Bursac, N.; Scherer, H.: *Modelbased Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung*. In: Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP), Vol. 1/2014, S. 20-21, Stuttgart, 2014.

Albers, Bursac & Wintergerst 2015

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: *Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. 3. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP), Stuttgart, 2015.

Albers, Düser & Ott 2007

Albers, A.; Düser, T.; Ott, S.: *Systematische Driveability Entwicklung von Fahrzeugen mit komplexen Strukturen*. 2. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2007.

Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

Albers, A.; Ebel, B.; Lohmeyer, Q.: *Systems of Objectives in Complex Product Development*. In: 9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE), Karlsruhe, 2012.

Albers, Ebel & Sauter 2010

Albers, A.; Ebel, B.; Sauter, C.: *Combining Process Model and Semantic Wiki*. In: 11th International Design Conference (DESIGN), Dubrovnik, 2010.

Albers, Enkler & Ottnad 2011

Albers, A.; Enkler, H. G.; Ottnad, J.: *Managing complex simulation processes: the generalised contact and channel model*. In: International Journal of Product Development, Vol. 13, Nr. 3, Inderscience Enterprises, Genf, 2011.

Albers, Klingler & Ebel 2013

Albers, A.; Klingler, S.; Ebel, B.: *Modeling Systems of Objectives in Engineering Design Practice*. In: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED), Seoul, 2013.

Albers & Lohmeyer 2012

Albers, A.; Lohmeyer, Q.: *Advanced Systems Engineering – Towards A Model-Based and Human-Centered Methodology*. In: Proceedings of the Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE), Karlsruhe, 2012.

Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

Albers, A.; Lohmeyer, Q.; Ebel, B.: *Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Development Projects*. In: Proceedings International Conference of Engineering Design (ICED), Kopenhagen, 2011.

Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012

Albers, A.; Lohmeyer, Q.; Radimersky, A.: *Individuelle und organisatorische Akzeptanz von Methoden des Systems Engineering*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Paderborn, 2012.

Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger 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: Konstruktion, Vol. 6/2015, Springer-VDI, Düsseldorf, 2015.

Albers & Matthiesen 2002

Albers, A.; Matthiesen, S.: *Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme*. In: Konstruktion, Vol. 54, Nr. 7/8/2002, Springer-VDI, Düsseldorf, 2002.

Albers, Matthiesen, Thau & Alink 2008

Albers, A.; Matthiesen, S.; Thau, S.; Alink, T.: *Support of engineering design activity through C&CM – temporal decomposition of design problems*. Proceedings of the TMCE, Izmir, 2008.

Albers & Meboldt 2007

Albers, A.; Meboldt, M.: *iPeMM. Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving*. In: Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED), Paris, 2007.

Albers, Munker, Zingel & Behrendt 2013

Albers, A.; Munker, F.; Zingel, C.; Behrendt, M.: *Integrative Systemmodellierung von Hardware- und Softwarekomponenten in SysML am Beispiel eines innovativen Datengateways*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Stuttgart, 2013.

Albers & Muschik 2010

Albers, A.; Muschik, S.: *Development of Systems of Objectives in early Activities of Product Development Processes*. In: Proceedings of the TMCE, Ancona, 2010.

Albers & Muschik 2010a

Albers, A.; Muschik, S.: *The Role and Application of Activities in the Integrated Product Engineering Model (iPeM)*. In: International Design Conference (DESIGN), Dubrovnik, 2010.

Albers, Muschik & Ebel 2010

Albers, A.; Muschik, S.; Ebel, B.: *Einflüsse auf Entscheidungsprozesse in frühen Aktivitäten der Produktentstehung*. In: Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Berlin, 2010.

Albers & Ott 2011

Albers, A.; Ott, S.: *Systemansätze und interdisziplinäre Forschung an wegweisenden Mobilitätssystemen – Forschungsansätze und Forschungsstrukturen im KIT*. Vortrag KIT-Zentrum Mobilitätssysteme, Karlsruhe, 2011.

Albers, Reiß & Bursac 2016

Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.: *15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development*. In: Proceedings NordDesign 2016, Trondheim, 2016.

Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016

Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Richter, T.: *The integrated Product engineering Model (iPeM) in context of the product generation engineering*. In: Proceedings 26th CIRP Design Conference, Stockholm (Schweden), 2016.

Albers, Sadowski & Marxen 2011

Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.: *A new perspective on product engineering – overcoming sequential process models*. In: Birkhofer, H. (Hrsg.): *The Future of Design Methodology*, Springer, London, 2011.

Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

Albers, A.; Scherer, H.; Bursac, N.; Rachenkova, G.: *Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies*. In: Proceedings 25th Design Conference Innovative Product Creation (CIRP), S. 129-134, Haifa, 2015.

Albers & Turki 2014

Albers, A.; Turki, T.: *Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung*. In: *Konstruktion*, Vol. 66, Nr. 3, S. 85-90, 2014.

Albers & Wintergerst 2014

Albers, A.; Wintergerst, E.: *The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality*. In: Chakrabarti, A.; Blessing, L. (Hrsg.): *An Anthology of Theories and Models of Design*, S. 151-171, Springer, London, 2014.

Albers & Zingel 2011

Albers, A.; Zingel, C.: *Interdisciplinary Systems Modeling Using the Contact & Channel-Model for SysML*. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Kopenhagen, 2011.

Albers, Zingel & Maletz 2011

Albers, A.; Zingel, C.; Maletz, M.: *Interdisciplinary Functional Systems Modeling Approach Applied for Hybrid Powertrain Development*. In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011 (WCECS), San Francisco, 2011.

Albers & Zingel 2013

Albers, A.; Zingel, C.: *Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel-Approach (C&C²-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems*. In: Proceedings of the Conference on Systems Engineering Research, Atlanta, 2013.

Albers & Zingel 2013a

Albers, A.; Zingel, C.: *Challenges of Model-Based Systems Engineering: A Study towards Unified Term Understanding and the State of Usage of SysML*. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): Smart Product Engineering, Buchserie: Lecture Notes in Product Engineering (LNPE), S. 83-92, Springer, Berlin, 2013.

Alink 2010

Alink, T.: *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 48, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2010.

Almefelt, Berglund, Nilsson & Malmqvist 2006

Almefelt, L.; Berglund, F.; Nilsson, P.; Malmqvist, J.: *Requirements management in practice: findings from an empirical study in the automotive industry*. In: Research in Engineering Design, Vol. 17, Nr. 3, S. 113-134, 2006.

Alt 2012

Alt, O.: *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML*. Hanser, München, 2012.

Angermann, Beuschel, Rau & Wohlfarth 2009

Angermann, A.; Beuschel, M.; Rau, M.; Wohlfarth, U.: *MATLAB® – Simulink® – Stateflow®*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2009.

Bader 2007

Bader, J. J.: *Die Hauptstellgrößen des Produktzielmanagements am Beispiel der Automobilentwicklung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007.

Badke-Schaub, Daalhuizen & Roozenburg 2011

Badke-Schaub, P.; Daalhuizen, J.; Roozenburg, N.: *Towards a Designer-Centred Methodology: Descriptive Considerations and Prescriptive Reflections*. In: Birkhofer, H. (Hrsg.): The Future of Design Methodology, S. 181-197, Springer, London, 2011.

Bartuschat 2001

Bartuschat, M.: *Entwicklung und Einsatz eines Konfigurationssystems am Beispiel des Omnibus*. In: Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

van Basshuysen & Schäfer 2015

van Basshuysen, R.; Schäfer, F. (Hrsg.): *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.

Becker, Deynet & Schweiger 2014

Becker, M.; Deynet, M.; Schweiger, U.: *Model-based Engineering of System Families*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Bremen, 2014.

Bertsche 2008

Bertsche, B.: *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Springer, Heidelberg, 2008.

Binder 2012

Binder, A.: *Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten*. Springer, Berlin, 2012.

Birkhold 2013

Birkhold, J. M.: *Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des Wiederstartsystems in parallelen Hybridantrieben*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 59, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Blees 2011

Blees, C.: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. Dissertation, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Band 3/2011, ISSN 1868-6885, Hamburg, 2011.

Blessing & Chakrabarti 2009

Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Springer, London, 2009.

Braun 2013

Braun, A.: *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung – Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 72, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Broy et al. 2010

Broy, M.; Feilkas, M.; Herrmannsdörfer, M.; Merenda, S.; Ratiu, D.: *Seamless Model-Based Development: From Isolated Tools to Integrated Model Engineering Environments*. Proceedings of the IEEE, Vol. 98, Nr. 4, 2010.

Broy, Fuhrmann, Huemer & Webers 2012

Broy, M.; Fuhrmann, S.; Huemer, J.; Webers, K.: *Anforderungsbasierter Funktionsentwurf im automobilen Entwicklungsprozess*. In: ATZ elektronik, Vol. 7, Nr. 6/2012, S. 472-477, 2012.

Brusa et al. 2014

Brusa, E.; Calà, A.; Chiesa, S.; De Vita, F.; Ferretto, D.: *Towards an effective interoperability of models within the 'Systems Engineering' applied to aeronautics*. INCOSE Italian Chapter Conference on Systems Engineering (CIISE2014), Rom, 2014.

Bühne et al. 2004

Bühne, S.; Halmans, G.; Pohl, K.; Weber, M.; Kleinwechter, H.; Wierczoch, T.: *Defining Requirements at Different Levels of Abstraction*. In: Proceedings of the 12th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE), S. 346-347, Kyoto, 2004.

Bühne, Lauenroth & Pohl 2004

Bühne, S.; Lauenroth, K.; Pohl, K.: *Anforderungsmanagement in der Automobilindustrie: Variabilität in Zielen, Szenarien und Anforderungen*. In: 34. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V., S. 23-27, Ulm, 2004.

Bullinger & Warschat 1996

Bullinger, H. J.; Warschat, J.: *Concurrent simultaneous engineering systems*. Springer, London, 1996.

Bursac 2016

Bursac, N.: *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 59, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2016.

Cantamessa 2003

Cantamessa, M.: *An empirical perspective upon design research*. In: Journal of Engineering Design, Vol. 14, Nr. 1, 2003.

Carr 2000

Carr, J. J.: *Requirements engineering and management: the key to designing quality complex systems*. The TQM Magazine, Vol. 12, Nr. 6, S. 400-407, 2000.

Chalupnik, Wynn & Clarkson 2009

Chalupnik, M. J.; Wynn, D. C.; Clarkson, P. J.: *Approaches to mitigate the impact of uncertainty in development processes*. In: International Conference on Engineering Design (ICED), S. 459-470, 2009.

Cheng & Atlee 2007

Cheng, B. H. C.; Atlee, J. M.: *Research Directions in Requirements Engineering*. In: Proceedings Future of Software Engineering, S. 285-303, Minneapolis, 2007.

Cloutier & Bone 2010

Cloutier, R.; Bone, M.: *Compilation of SysML Request for Information – Final Report*. Stevens Institute of Technology and School of Systems & Enterprises, Hoboken, 2010.

Cooper 1990

Cooper, R. G.: *Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products*. In: Business Horizons, Vol. 33, Nr. 3, S. 44-54, 1990.

Cornet 2002

Cornet, A.: *Plattformkonzepte in der Automobilindustrie*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2002.

Cromberg 2007

Cromberg, C.: *Selbstorganisation bei Koordination komplexer Produktentwicklungsprozesse*. Dissertation, Universität Stuttgart, Reihe: Schriften zur Unternehmensplanung, Band 77, Peter Lang, Frankfurt am Main, 2007.

Danisch 2011

Danisch, R.: *Technik im Alltag: Porsche 911 Turbo und Audi R8 5.2*. Internetportal der ATZ: ATZonline.de, Artikel vom 02.01.2011, zuletzt abgerufen am 13.07.2016.

Dänzer et al. 2014

Dänzer, M.; Kleiner, S.; Lamm, J. G.; Moeser, G.; Morant, F.; Munker, F.; Weilkiens, T.: *Funktionale Systemmodellierung nach der FAS-Methode: Auswertung von vier Industrieprojekten*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Bremen, 2014.

Dassault 2015

N. N.: *Reqtify*. Datenblatt, Internetseite des Herstellers Dassault Systems: www.3ds.com/reqtify, zuletzt abgerufen am 13.07.2016.

Denger et al. 2012

Denger, A.; Fritz, J.; Kissel, M.; Parvan, M.; Zingel, C.: *Potentiale einer funktionsorientierten Lenkung mechatronischer Produkte in der Automobilindustrie*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Paderborn, 2012.

Deubzer & Lindemann 2009

Deubzer, F.; Lindemann, U.: *Networked Product Modelling – Use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis*. Proceedings of the ICED, Stanford, 2009.

Denger et al. 2013

Denger, A.; Fritz, J.; Denger, D.; Zingel, C.; Ölmez, M.; Kissel, M.: *Modellbasierter Ansatz zur funktionsorientierten Lenkung von Produkten*. In: ProduktDaten Journal, Vol. 20, Nr. 1, Darmstadt, 2013.

Dietrich 2011

Dietrich, S.: *Modularisierung und Funktionsintegration am Beispiel der Automobilkarosserie*. Dissertation, Technische Universität München, 2011.

Domann, Juergens & Streit 2009

Domann, C.; Juergens, E.; Streit, J.: *The Curse of Copy&Paste – Cloning in Requirements Specifications*. 3rd International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, Lake Buena Vista, 2009.

Droste 2012

Droste, M.: Bauhaus. Bauhaus-Archiv Museum für Gestaltung Berlin (Hrsg.), Taschen, Köln, 2012.

Düser 2010

Düser, T.: *X-in-the-Loop – Ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrassistenzsystemen*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 47, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2010.

Earl, Johnson & Eckert 2005

Earl, C.; Johnson, J.; Eckert, C.: *Complexity*. In: Clarkson, J.; Eckert, C. (Hrsg.): *Design Process Improvement - A Review of Current Practice*. S. 174-197, Springer, London, 2005.

Ebel 2015

Ebel, B.: *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 85, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2015.

Ebert 2012

Ebert, C.: *Systematisches Requirements Engineering*. 4. Auflage, dpunkt, Heidelberg, 2012.

Eckstein 2010

Eckstein, L.: *Unkonventionelle Fahrzeugantriebe*. Vorlesungsumdruck, Neuauflage. Institut für Kraftfahrwesen (IKA), RWTH Aachen, 2010.

Eigner 2013

Eigner, M.: *Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung auf einer Plattform für System Lifecycle Management*. In: Sandler, U. (Hrsg.): *Industrie 4.0*, S. 91-110, Springer Vieweg, Berlin, 2013.

Eigner, Dickopf, Schulte & Schneider 2013

Eigner, M.; Dickopf, T.; Schulte, T.; Schneider, M.: *mecPro² - Entwurf einer Beschreibungssystematik zur Entwicklung cybertronischer Systeme mit SysML*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Ulm, 2015.

Eigner, Gilz & Zafirov 2012

Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R.: *Proposal for Functional Product Description as Part of a PLM Solution in Interdisciplinary Product Development*. In: Proceedings of the 12th International Design Conference (DESIGN), Dubrovnik, 2012.

Eigner, Roubanov & Zafirov 2014

Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Springer Vieweg, Berlin, 2014.

Eiletz 1999

Eiletz, R.: *Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Beispiel PKW-Entwicklung*. Dissertation, Reihe Konstruktionstechnik München, Technische Universität München, Band 32, Shaker, Aachen, 1999.

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser, München, 2009.

Endler, Steffen, Lohberg & Munker 2013

Endler, D.; Steffen, D.; Lohberg, A.; Munker, F.: *Systems Engineering Return on Investment*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Stuttgart, 2013.

Enkler 2010

Enkler, H. G.: *Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 44, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2010.

Estefan 2007

Estefan, J. A.: *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies*. INCOSE MBSE Focus Group, 2007.

EU-Richtlinie 2007/46/EG

N. N.: *Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates*. Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2007.

Eversheim, Schernikau & Goeman 1996

Eversheim, W.; Schernikau, J.; Goeman, D.: *Module und Systeme: Die Kunst liegt in der Strukturierung*. In: VDI-Z, Vol. 138, Nr. 11/12, S. 44-48, 1996.

Feldhusen & Grote 2013

Feldhusen, J.; Grote, K. H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 8. Auflage, Springer, Berlin, 2013.

Fink & Siebe 2011

Fink, A.; Siebe, A.: *Handbuch Zukunftsmanagement*. Campus, Frankfurt am Main, 2011.

Frank 2006

Frank, U.: *Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme*. Dissertation, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, 2006.

Friedenthal, Moore & Steiner 2012

Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: *A Practical Guide to SysML*. Morgan Kaufmann, Waltham, 2012.

Gallego, Alvarez-Rodríguez, Llorens 2015

Gallego, E.; Álvarez-Rodríguez, J.M.; Llorens, J.: *Reuse of Physical System Models by means of Semantic Knowledge Representation: A Case Study applied to Modelica*. In: Proceedings 11th International Modelica Conference, S. 747-757, Versailles, 2015.

Gausemeier, Plass & Wenzelmann 2009

Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. Hanser, München, 2009.

Gausemeier et al. 2013

Gausemeier, J.; Czaja, A.; Wiederkehr, O.; Dumitrescu, R.; Tschirner, C.; Steffen, D.: *Studie: Systems Engineering in der industriellen Praxis*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Stuttgart, 2013.

Gebauer 2001

Gebauer, M.: *Kooperative Produktentwicklung auf der Basis verteilter Anforderungen*. Dissertation, Forschungsberichte aus dem Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion, Universität Karlsruhe, Band 3/2001, Shaker, Aachen, 2001.

Gilz 2014

Gilz, T.: *PLM Integrated Interdisciplinary System Models in the Conceptual Design Phase based on Model-Based Systems Engineering*. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2014.

Gilz & Eigner 2013

Gilz, T.; Eigner, M.: *Ansatz zur integrierten Verwendung von SysML Modellen in PLM zur Beschreibung der funktionalen Produktarchitektur*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Stuttgart, 2013.

Gönüldinc & Hölzel 2014

Gönüldinc, O.; Hölzel, S.: *Adaptive Aerodynamik – Innovation des Porsche 911 Turbo*. In: Tecklenburg, G. (Hrsg.): Proceedings 13. ATZ-Fachtagung Karosseriebautage Hamburg, S. 159-174, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.

Gonzalez-Zugasti, Otto & Baker 1999

Gonzalez-Zugasti, J.; Otto, K.; Baker, J. D.: *Assesing Value for Product Family Design and Selection*. In: Proceedings of the 25th Design Automation Conference, ASME Engineering Technical Conferences, Las Vegas, 1999.

Göpfert 1999

Göpfert, J.: *Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Gabler, Wiesbaden, 1999.

Grande 2014

Grande, M.: *100 Minuten für Anforderungsmanagement*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.

Grässler 2001

Grässler, I.: *Warum Variantenbeherrschung alleine nicht mehr ausreicht – der neue Umgang mit gewollter Varianz in der Automobilindustrie*. In: Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen, Erfahrungen, Methoden und Instrumente, VDI-Berichte Nr. 1645, S. 89-102, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

Grimm 2003

Grimm, K.: *Software Technology in an Automotive Company – Major Challenges*. Proceedings of the 25th International Conference on Software Engineering (ICSE), S. 498-503, Portland, 2003.

Grundel et al. 2014

Grundel, M.; Abulawi, J.; Moeser, G.; Weilkiens, T.; Scheithauer, A.; Kleiner, S.; Kramer, C.; Neubert, M.; Kümpel, S.; Albers, A.: *FAS4M – No more: "Please mind the gap!"*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE). Bremen, 2014.

Gülke, Rumpe, Jansen & Axmann 2012

Gülke, T.; Rumpe, B.; Jansen, M.; Axmann, J.: *High-Level Requirements Management and Complexity Costs in Automotive Development Projects: A Problem Statement*. In: Proceedings 18th International Working Conference on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality (REFSQ), Essen, 2012.

Haberfellner & Daenzer 1999

Haberfellner, R.; Daenzer, W. F.: *Systems engineering: Methodik und Praxis*. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1999.

Haberfellner, de Weck, Fricke & Vössner 2012

Haberfellner, R.; de Weck, O.; Fricke, E.; Vössner, S.: *Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung*. Orell Füssli, Zürich, 2012.

Hacker 2002

Hacker, W.: *Denken in der Produktentwicklung*. VDF Hochschulverlag, Zürich, 2002.

Hannah, Joshi & Summers 2012

Hannah, R.; Joshi, S.; Summers, J. D.: *A user study of interpretability of engineering design representations*. In: *Journal of Engineering Design*, Vol. 23, Nr. 6, S. 443-468, 2012.

Hansen & Andreasen 2007

Hansen, C. T.; Andreasen M. M.: *Specifications in Early Conceptual Design Work*. In: *Proceedings 16th International Conference on Engineering Design (ICED)*, Paris, 2007.

Hansen, Nohria & Tierney 1999

Hansen, M. T.; Nohria, N.; Tierney, T.: *What's your strategy for managing knowledge?* In: *Harvard Business Review*, Vol. 77, S. 106-116, 1999.

Herzig & Brandstätter 2010

Herzig, S.; Brandstätter, M.: *Übertragung von Methodiken des Software Engineering auf Model-Based Systems Engineering*. In: *Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE)*, München, 2010.

Heumesser & Houdek 2003

Heumesser, N.; Houdek, F.: *Towards Systematic Recycling of Systems Requirements*. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, Portland, 2003.

Heumesser & Houdek 2004

Heumesser, N.; Houdek, F.: *Experiences in Managing an Automotive Requirements Engineering Process*. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Requirements Engineering Conference*, S. 322-327, Kyoto, 2004.

Hoffmann 2011

Hoffmann, H.: *Systems Engineering Best Practices with the Rational Solution for Systems and Software Engineering*. Deskbook Release 4.1, IBM Corporation, 2011.

Hoffmann & Vietor 2014

Hoffmann, C. A.; Vietor, T.: *Erklärungsmodell der modularen Baukastensystematik in der Automobilindustrie*. In: *Konstruktion*, Vol. 5/2014, S. 79-82, Springer-VDI, Düsseldorf, 2014.

Hofmann 2014

Hofmann, P.: *Hybridfahrzeuge*. 2. Auflage, Springer, Wien, 2014.

Holt & Perry 2013

Holt, J.; Perry, S.: *SysML for Systems Engineering*. The Institution of Engineering and Technology, London, 2013.

Holt, Perry & Brownsword 2012

Holt, J.; Perry, S. A.; Brownsword, M.: *Model-based requirements engineering*. IET Professional applications of computing series, Vol. 9, Institution of Engineering and Technology, Stevenage, 2012.

Honour 2004

Honour, E. C.: *Understanding the Value of Systems Engineering*. International Council on Systems Engineering INCOSE (Hrsg.), Pensacola, 2004.

Honour 2013

Honour, E. C.: *Systems engineering return on invest*. PHD Thesis, Defence and Systems Institute, School of Electrical and Information Engineering, University of South Australia, Adelaide, 2013.

Hood, Mühlbauer, Rupp & Versteegen 2007

Hood, C.; Mühlbauer, S.; Rupp, C.; Versteegen, G. (Hrsg.): *iX-Studie Anforderungsmanagement*. 2. Auflage, Heise Zeitschriften Verlag, Hannover, 2007.

IBM 2015

N. N.: *Rational DOORS*. Informationen im Internetauftritt des Herstellers IBM: <http://www-03.ibm.com/software/products/de/ratidoor/>, zuletzt abgerufen am: 13.07.2016.

IEEE 610.12 1990

N. N.: *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.), New York, 1990.

IEEE 830 1998

N. N.: *IEEE Standard Recommended Practice for Software Requirements Specifications*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.), New York, 1998.

IEEE 2005

N. N.: *IEEE Standards Style Manual*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.), New York, 2005.

Iwanek, Kaiser, Dumitrescu & Nyßen 2013

Iwanek, P.; Kaiser, L.; Dumitrescu, R.; Nyßen, A.: *Fachdisziplinübergreifende Systemmodellierung mechatronischer Systeme mit SysML und CONSENS*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Stuttgart, 2013.

Jarke 1999

Jarke, M.: *CREWS: Towards Systematic Usage of Scenarios, Use Cases and Scenes*. In: WI (Wirtschaftsinformatik), Vol. 99, Springer Aktuell, Saarbrücken, 1999.

Jarke, Bui & Carroll 1998

Jarke, M.; Bui, X. T.; Carroll, J. M.: *Scenario Management: An Interdisciplinary Approach*. In: Requirements Engineering, Vol. 3/1998, S. 155-173, Springer, London, 1998.

Gero & Kannengiesser 2007

Gero, J.S.; Kannengiesser, U.: *A function-behavior-structure ontology of processes*. In: Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Nr. 21, S. 379-391, Cambridge, 2007.

Jossen & Weydanz 2006

Jossen, A.; Weydanz, W.: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Inge Reichardt Verlag, Untermeitingen, 2006.

Jung 2006

Jung, C.: *Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung*. Dissertation, Technische Universität München, Dr. Hut Verlag, München, 2006.

Jupp, Eckert & Clarkson 2009

Jupp J. R.; Eckert C.; Clarkson P. J.: *Dimensions of Decision Situations in Complex Product Development*. In: International Conference on Engineering Design (ICED), Stanford, Vol. 3, S. 239-250, 2009.

Kaffenberger, Schulze & Weber 2013

Kaffenberger, R.; Schulze, S. O.; Weber, H.: *INCOSE Systems Engineering Handbuch*. Version 3.2.2, Gesellschaft für Systems Engineering e. V. (Hrsg.), GfSE, München, 2013.

Kalawsky 2009

Kalawsky, R. S.: *Grand Challenges for Systems-Engineering Research*. 7th Annual Conference on Systems Engineering Research (CSER), Loughborough, 2009.

Keller, Kahn & Panara 1990

Keller, S. E.; Kahn, L. G.; Panara, R. B.: *Specifying Software Quality Requirements with Metrics*. In: Thayer, R. H.; Dorfman, M. (Hrsg.): *Tutorial System and Software Engineering*, IEEE Computer Society Press, S. 145-163, 1990.

Kano, Seraku, Takahashi & Tsuji 1984

Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji, S.: *Attractive Quality and Must Be Quality*. In: *Quality – Journal of the JSQC*, Vol. 14, S. 165-186, 1984.

Kerner, Spiegel, Hauck & Rüger 2013

Kerner, J.; Spiegel, L.; Hauck, C.; Rüger, S.: *The Innovative High-Performance Plug-In Hybrid Drivetrain in the New Porsche 918 Spyder*. 22. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2013.

Kerr, Roy & Sackett 2006

Kerr, C. I. V.; Roy, R.; Sackett, P. J.: *Requirements management: An enabler for concurrent engineering in the automotive industry*. In: *International Journal of Production Research*, Vol. 44, Nr. 9, S. 1703-1717, 2006.

Kieser & Blessing 2010

Kieser, J.; Blessing, U.: *From Concept to Democar – the GETRAG BOSCH Hybrid Cooperation*. Getrag Drivetrain Forum, Untergruppenbach, 2010.

Kipp, Blees & Krause, 2010

Kipp, T., Blees, C., Krause, D.: *Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. In: *Proceedings of the 21st Symposium on Design for X*, Buchholz, Hamburg, 2010.

Kieser & Blessing 2010

Kieser, J.; Blessing, U.: *From Concept to Democar – the GETRAG BOSCH Hybrid Cooperation*. Getrag Drivetrain Forum, Untergruppenbach, 2010.

Kirchmayr et al. 2009

Kirchmayr, M.; Müller, M.; Penzenstadler, B.; Sikora, E.; Weyer, T.: *Essenzieller REMsES-Leitfaden*. REMsES-Konsortium, Essen, 2009.

Kirchner 2007

Kirchner, E.: *Leistungsübertragung in Fahrzeugen*. Springer, Heidelberg, 2007.

Kleiner & Kramer 2013

Kleiner, S.; Kramer, C.: *Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6*. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): *Smart Product Engineering*, S. 93-102, Springer, Heidelberg, 2013.

Kleiner, Krastel & Langlotz 2013

Kleiner, S.; Krastel, M.; Langlotz, M.: *Vorgehensmodell zur modularen Einführung von Systems Engineering*. In: *Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE)*. Stuttgart, 2013.

Köck & Willfort 2007

Köck, A. M.; Willfort, R.: *Creative Knowledge Work for Innovation*. ÖGAI Journal, Vol. 26, S. 9-13, 2007.

Kopenhagen 2004

Kopenhagen, F.: *Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen*. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Shaker, Aachen, 2004.

Korff, Lamm & Weilkiens 2011

Korff, A.; Lamm, J. G.; Weilkiens, T.: *Werkzeuge für den Schmied funktionaler Architekturen*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE). Hamburg, 2011.

Korff & Weilkiens 2010

Korff, A.; Weilkiens, T.: *Toolgestützte Kombination von Modellierungsnotation und Prozess anhand von SysML und SYSMOD*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), München, 2010.

Krause, Kipp & Blees, 2012

Krause, D., Kipp, T., Blees, C.: *Modulare Produktstrukturierung*. In: Steinhilper, R.; Rieg, F. (Hrsg.): *Handbuch Konstruktion*, S. 657-678, Hanser, München 2012.

Krull & Mattfeld 2012

Krull, D.; Mattfeld, D. K. (Hrsg.): *Terminmanagement in Fahrzeugentwicklungsprojekten der Automobilindustrie*. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, Braunschweig, 2012.

Krusche 2000

Krusche, T.: *Strukturierung von Anforderungen für eine effiziente und effektive Produktentwicklung*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Mainz Verlag, Aachen, 2000.

Kubalczyk & Kilian 2008

Kubalczyk, R.; Kilian, S.: *Der neue 8-Gang-Hybridgetriebe-Baukasten von ZF*. VDI-Tagung „Getriebe in Fahrzeugen“, VDI-Berichte Nr. 2029, Friedrichshafen, 2008.

Lamm & Weilkiens 2010

Lamm, J. G.; Weilkiens, T.: *Funktionale Architekturen in SysML*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE). München, 2010.

van Lamsweerde 2001

van Lamsweerde, A.: *Goal-Oriented Requirements Engineering: A Guided Tour*. In: Proceedings 5th IEEE International Symposium on Requirements Engineering, S. 249-262, Toronto, 2001.

Larsson & Steen 2008

Larsson, A.; Steen, O.: *Tool Support for Requirements Management – Quality from a User Perspective*. In: Proceedings of IRIS29, Helsingör, 2008.

Lindemann 2009

Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. 3. Auflage, Springer, Berlin, 2009.

Lohmeyer 2013

Lohmeyer, Q.: *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 59, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Lohmeyer, Meboldt & Matthiesen 2013

Lohmeyer, Q.; Meboldt, M.; Matthiesen, S.: *Analyzing visual strategies of novice and experienced designers by eye tracking application*. International Conference on Engineering and Product Design Education, Dublin, 2013.

Maier et al. 2007

Maier, J. R. A.; Ezhilan, T.; Fadel, G. M.; Summers, J. D.; Mocko, G.: *A hierarchical requirements modeling scheme to support engineering innovation*. International Conference of Engineering Design (ICED), Paris, 2007.

Martin et al. 2013

Martin, J. et al.: *Towards a Common Language for Systems Praxis*. Proceedings of the 23th Annual INCOSE International Symposium, Vol. 23, Nr. 1, S. 739-754, Philadelphia, 2013.

Marxen & Albers 2012

Marxen, L.; Albers, A.: *Supporting Validation in the Development Of Design Methods*. In: Proceedings of the 12th International Design Conference DESIGN. Dubrovnik, 2012.

Marxen 2014

Marxen, L.: *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 74, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2014.

Matros 2016

Matros, K.: *Entwicklung von Hybridantriebssystemen auf Basis des Pull-Prinzips der Validierung und des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 95, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2016.

Matros, Schille, Behrendt & Holzer 2015

Matros, K.; Schille, F.; Behrendt, M.; Holzer, H.: *Manöverbasierte Validierung von Hybridantrieben*. In: Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 117, Nr. 2/2015, S. 64-71, 2015.

Matthiesen 2002

Matthiesen, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Dissertation, Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe, Band 6, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2002.

Matthiesen 2011

Matthiesen, S.: *Seven years of product development in industry – experiences and requirements for supporting engineering design with „thinking tools“*. Proceedings of the International Conference of Engineering Design (ICED), Kopenhagen, 2011.

Matthiesen, Schäfer & Schmidt 2015

Matthiesen, S.; Schaefer, T.; Schmidt, S.: *Zielgerichtete und kundenorientierte Produktentwicklung – von der Anwendungsanalyse zur Validierung*. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, 2015.

Matthiesen, Schmidt & Hölz 2015

Matthiesen, S.; Schmidt, S.; Hölz, K.: *Advanced use case modelling – Modellierung und Analyse von Anwendungsfällen zur Unterstützung der zielgerichteten und kundenorientierten Entwicklung*. In: 26. DfX-Symposium, München, 2015.

Matthiesen, Schmidt & Moeser 2015

Matthiesen, S.; Schmidt, S.; Moeser, G.: *SysKIT 2.0 – Implementation of a SysML teaching approach and observations on systems modeling by mechatronic teams*. International Conference on Engineering and Product Design Education, Loughborough, 2015.

Mayer-Bachmann 2007

Mayer-Bachmann, R.: *Integratives Anforderungsmanagement. Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung*. Dissertation, Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 2, Karlsruhe, 2007.

McManus & Hastings 2005

McManus, H.; Hastings, D.: *A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems*. 15th Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE), Rochester, 2005.

Meboldt 2008

Meboldt, M.: *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 29, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2008.

Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 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 (MMEP), Cambridge, 2012.

Motzer & Rudolph 2013

Motzer, M.; Rudolph, S.: *Über die Rolle der Geometrie im Systems Engineering*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE). Stuttgart, 2013.

Muschik 2011

Muschik, S.: *Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 50, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2011.

Naunheimer, Bertsche & Lechner 2007

Naunheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner G.: *Fahrzeuggetriebe*. Springer, Heidelberg, 2007.

Neubauer 2012

Neubauer, W.: *Trends in der Automobilindustrie*. In: Neubauer, W.; Rudow, B. (Hrsg.): *Trends in der Automobilindustrie*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2012.

Neufeld 2009

Neufeld, M. J.: *Wernher von Braun*. Biografie, Siedler, München, 2009.

de Neufville 2004

de Neufville, R.: *Uncertainty Management for Engineering Systems Planning and Design*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.

Neußner, Kahrstedt, Dorenkamp & Jelden 2013

Neußner, H. J.; Kahrstedt, J.; Dorenkamp, R.; Jelden, H.: *Die Euro-6-Motoren des modularen Dieselmotorkastens von Volkswagen*. *Motortechnische Zeitschrift*, Vol. 74, Nr. 6/2013, S. 440-447, 2013.

No Magic 2015

N. N.: *Cameo Systems Modeler*. Information im Internetauftritt des Herstellers No Magic. URL: <http://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler.html>, zuletzt abgerufen am: 13.07.2016.

Oerding 2009

Oerding, J.: *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung – Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 37, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2009.

OMG UML 2011

N. N.: *Unified Modeling Language (UML)*. Superstructure Specification of Version 2.4.1, Object Management Group (Hrsg.), verfügbar unter: <http://www.omg.org>, 2011.

Ohmer 2008

Ohmer, M.: *Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 32, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2008.

Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 7. Auflage. Springer, Berlin, 2007.

Pflieger 2015

Pflieger, W.: *Ein methodischer Ansatz zur modularen Auslegung von Antriebsstrangkomponenten im Rahmen der Entwicklung von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 84, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2015.

Pitschke 2011

Pitschke, J.: Qualitätssicherung für modellbasierte Entwicklungsansätze. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE). Hamburg, 2011.

Pohl & Rupp 2011

Pohl, K.; Rupp, C.: *Basiswissen Requirements Engineering*. 3. Auflage, dpunkt, Heidelberg, 2011.

Ponn & Lindemann 2008

Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer, Heidelberg, 2008.

Porsche 2014

N. N.: *Der Panamera*. Verkaufsprospekt, Stand 3/2015, Stuttgart, 2014.

Probst & Romhardt 2010

Probst, G.; Romhardt, K.: *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2010.

Ramesh & Jarke 2001

Ramesh, B.; Jarke, M.: *Toward Reference Models for Requirements Traceability*. In: IEEE Transactions on Software Engineering. Vol. 27, Nr. 1, S. 58-93, 2001.

Redtenbacher 1859

Redtenbacher, F.: *Principien der Mechanik und des Maschinenbaues*. Verlagsbuchhandlung von Friedrich Bassermann, Mannheim, 1859.

Reichwein & Paredis 2011

Reichwein, A.; Paredis, C. J. J.: *Overview of Architectural Frameworks and Modeling Languages für Model-Based Systems Engineering*. In: Proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE), Washington, 2011.

Reinmann-Rothmeier & Mandl 2000

Reinmann-Rothmeier, G.; Mandl, H.: *Ein pädagogisch-psychologischer Ansatz zum Wissensmanagement – ein Widerspruch in sich?* Essay, Institut für Pädagogische Psychologie und Empirische Pädagogik, Ludwigs-Maximilians-Universität, München, 2000.

Renner 2007

Renner, I.: *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*. Dissertation, Technische Universität München, 2007.

Repenning & Serman 2011

Repenning, N. P.; Serman, J. D.: *Nobody Ever Gets Credit for Fixing Problems that Never Happened: Creating and Sustaining Process Improvement*. In: California Management Review, Vol. 43, No. 4, 2011.

Richter, Schiek, Stache, Spiegel & Kerner 2013

Richter, B.; Schiek, W.; Stache, I.; Spiegel, L.; Kerner, J.: *The high performance drivetrain of the Porsche 918 Spyder*. 12th International CTI Symposium, Berlin, 2013.

Rodenacker 1991

Rodenacker, W.: *Methodisches Konstruieren*. Springer, Berlin, 1991.

Roozenburg & Dorst 1991

Roozenburg, N. F.; Dorst, M. K.: *Some Guidelines for the Development of Performance Specifications in Product Design*. In: Proceedings of the 8th International Conference on Engineering Design (ICED), S. 359-366, 1991.

Ropohl 1975

Ropohl, G.: *Einleitung in die Systemtechnik*. In: Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung. Hanser, München, S. 1-77, 1975.

Ropohl 2009

Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.

Roth 2000

Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Band I: Konstruktionslehre, 3. Auflage, Springer, Berlin, 2000.

Roth, Binz & Watty 2010

Roth, D.; Binz, H. und Watty, R.: *Generic Structure of Knowledge within the Product Development Process*. International Design Conference (DESIGN), Dubrovnik, 2010.

Rupp 2007

Rupp, C.: *Requirements-Engineering und Management*. Hanser, München, 2007.

Rupp et al. 2013

Rupp, C. et al.: *Systemanalyse kompakt*. 3. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2013.

El Salloum et al. 2013

El Salloum, C.; Ersch, R.; Hamedler, A.; Keis, A.; Loiret, F.: *CRYSTAL - Seamless Life-Cycle Collaboration for Safety-Critical Systems Engineering*. Internetartikel: <http://news.safetrans-de.org/ausgabe-2014-02/eu-research-project-crystal.html>, zuletzt abgerufen am 13.07.2016.

Schäfer 2009

Schäfer, H.: *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Expert-Verlag, Renningen, 2009.

Scherer, Wagner, Naunheimer & Dick 2008

Scherer, H.; Wagner, G.; Naunheimer, H.; Dick, A.: *Das automatische Getriebe 8HP70 von ZF*. VDI-Tagung „Getriebe in Fahrzeugen“, VDI-Berichte Nr. 2029, Friedrichshafen, 2008.

Schmidt-Kretschmer & Blessing 2005

Schmidt-Kretschmer, M.; Blessing, L.: *Design and development capabilities of small and medium sized enterprises in the UK*. In: Samuel, A.; Lewis, W. (Hrsg.): International Conference on Engineering Design (ICED), Melbourne, 2005.

Schmalenbach 2013

Schmalenbach, H.: *Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 68, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Schmidt-Kretschmer, Gericke & Blessing 2007

Schmidt-Kretschmer, M.; Gericke, K.; Blessing, L.: *Managing Requirements or Be Managed by Requirements – Results of an Empirical Study*. International Conference on Engineering Design (ICED), Paris, 2007.

Schneider 2012

Schneider, T.: *Methode zur Erstellung von Problemlösungsmodellen auf Basis des SPALTEN-Prozesses in komplexen Entwicklungsprozessen*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 58, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2012.

Schroda 2000

Schroda, F.: *Über das Ende wird am Anfang entschieden: Zur Analyse der Anforderungen von Konstruktionsaufträgen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2000.

Schuh 2005

Schuh, G.: *Produktkomplexität managen*. Hanser, München, 2005.

Schuh 2015

Schuh, G.: *Leitfaden zur Baukastengestaltung: Ergebnisse des Forschungsprojekts Gestaltung innovativer Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen*. Neue Ausgabe, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V., Frankfurt am Main, 2015.

Schuh, Arnoscht & Schiffer 2012

Schuh, G.; Arnoscht, J.; Schiffer, M.: *Innovationscontrolling*. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Innovationsmanagement*, Springer, Heidelberg, 2012.

Schulze & Strožek 2013

Schulze, S. O.; Adam Strožek, A.: *Nutzen von Systems Engineering – Bewertungsoptionen bei der Einführung von Systems Engineering*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Stuttgart, 2013.

Schumpeter 1939

Schumpeter, J.: *Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung*. Duncker & Humblot, Leipzig, 1939.

Sedchaicharn 2010

Sedchaicharn, K.: *Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 45, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2010.

Seeger 2014

Seeger, H.: *Basiswissen Transportation Design*. Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2014.

Semmler et al. 2013

Semmler, D.; Kerner, J.; Spiegel, L.; Bitsche, O.; Rauner, T.; Stache, I.; Marques, M.: *Der Antriebsstrang des Porsche Panamera S E-Hybrid*. 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2013.

Sendler 2012

Sendler, U.: *Ganzheitliche Strategie: Systems Lifecycle Management (SysLM)*. In: Tagungsband Tag des Systems Engineering (TdSE), Paderborn, 2012.

Spring 2009

Spring, E.: *Elektrische Maschinen. Eine Einführung*. Springer, Berlin, 2009.

Stachowiak 1973

Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, Wien, 1973.

Stechert & Franke 2009

Stechert, C., Franke, H. J.: *Managing requirements as the core of multi-disciplinary product development*. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 1, S. 153-158, 2009.

Stechert 2010

Stechert, C.: *Modellierung komplexer Anforderungen*. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, Bericht Nr. 75, Braunschweig, 2010.

Thau 2013

Thau, S.: *Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C2-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 66, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Theelen & Hooman 2015

Theelen, B.; Hooman, J.: *Uniting Academic Achievements on Performance Analysis with Industrial Needs*. In: Campos, J.; Haverkort, B.R. (Hrsg.): 12th International Conference Quantitative Evaluation of Systems (QEST 2015), Springer, Heidelberg, 2015.

Thomas & Schroder 2002

Thomas, T.; Schroder, C.: *Developing the Interpersonal and Communication Skills Necessary for Effective Requirements Engineering*. In: Proceedings of the 7th Australian Workshop on Requirements Engineering (AWRE), Melbourne, 2002.

Turki 2014

Turki, T.: *Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 76, ISSN 1615 8113, Karlsruhe, 2014.

Ulrich 1995

Ulrich, K.: *The role of product architecture in the manufacturing firm*. Research Policy 24, S. 419-440, 1995.

VDA 2006

N. N.: *Automotive VDA-Standardvorlage Komponentenlastenheft (Gelbdruck)*. Verband der Automobilindustrie (Hrsg.), Heinrich Druck + Medien, Frankfurt, 2006.

VDA 2007

N. N.: *VDA Band „Komponentenlastenheft – Automotive Standardstruktur“*. Verband der Automobilindustrie (Hrsg.), 1. Auflage, 2007.

VDI 2206

N. N.: *VDI-Richtlinie 2206, Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth, Berlin, 2004.

VDI 2221

N. N.: *VDI-Richtlinie 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth, Berlin, 1993.

VDI 2519

N. N.: *VDI-Richtlinie 2519, Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften*. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth, Berlin, 2001.

VDI 5610

N. N.: *VDI-Richtlinie 5610, Wissensmanagement im Ingenieurwesen*. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth, Berlin, 2008.

Vermaas 2010

Vermaas, P: *Technical functions: towards accepting different engineering meanings with one overall account*. In: Proceedings of the TMCE Symposium, Ancona, 2010.

Vicente-Chicote, Moros & Toval 2007

Vicente-Chicote, C.; Moros, B.; Toval, A.: *REMM-Studio: an Integrated Model-Driven Environment for Requirements Specification, Validation and Formatting*. In: Journal of Object Technology (JOT), Vol. 6, No. 9, Special Issue: TOOLS EUROPE 2007, 2007.

Walden et al. 2015

Walden, D. D.; Roedler, G. J.; Forsberg, K. J.; Hamelin, R. D.; Shortell, T. M.: *Systems Engineering Handbook*. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Hoboken (USA), 2015.

Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski 2009

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: *Strategien in der Automobilindustrie*. Vieweg + Teuber, Wiesbaden, 2009.

Weber 2005

Weber, C.: *What is "Complexity"?* In: Samuel, A.; Lewis, W. (Hrsg.): Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED), 2005.

Weber 2008

Weber, C.: *How to Derive Application-specific Design Methodologies*. In: Proceedings of the Design, Dubrovnik, 2008.

Weber 2012

Weber, C.: *Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz*. In: Design for X - Beiträge zum 23. DfX-Symposium in Bamberg, S. 25-62, Hamburg, 2012.

Weber & Weisbrod 2003

Weber, M.; Weisbrod, J.: *Requirements Engineering in Automotive Development: Experiences and Challenges*. In: IEEE Software, Vol. 1/2/2003, S. 16-24, 2003.

Weilkiens 2014

Weilkiens, T.: *Systems Engineering mit SysML/ UML*. 3. Auflage, dpunkt, Heidelberg, 2014.

Widmann 2011

Widmann, U.: *Produktentstehungsprozess*. In: Braess, H. H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Auflage, S. 881-948, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

Wiedner 2013

Wiedner, A.: *Feldstudie zur Identifikation der von Konstrukteuren praktizierten Handlungsmuster bei der Funktion-Gestalt-Synthese*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 65, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Wökl & Shea 2009

Wökl, S.; Shea, K.: *A Computational Product Model for Conceptual Design using SysML*. In: Proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE), San Diego, 2009.

Wintergerst 2015

Wintergerst, E.: *Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 86, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2015.

Woyak 2007

Woyak, S.: *CAD Fusion: Bridging the handoff from Conceptual to Preliminary Design*. White Paper, Phoenix Integration (Hrsg.), 2007.

Wüpping 1998

Wüpping, J.: *Logistikgerechte Produktstrukturen bei marktorientierter Variantenvielfalt – Kundenorientierung dank Produktmodularisierung*. In: *io management*, Nr. 1/2, S. 76-81, 1998.

Zingel 2013

Zingel, J. 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*. Dissertation, Forschungsberichte des IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 70, ISSN 1615-8113, Karlsruhe, 2013.

Zingel, Albers, Matthiesen & Maletz 2012

Zingel, J. C.; Albers, A.; Matthiesen, S.; Maletz, M.: *Experiences and Advancements from One Year of Explorative Application of an Integrated Model-Based Development Technique Using C&C²-A in SysML*. In: *IAENG International Journal of Computer Science*, Vol. 39, No. 2, S. 165-181, 2012.

Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Brandt 2015

Brandt, D.; Scherer, H. (Co-Betreuer); Albers, A. (Betreuer): *Anforderungsmanagement in der Baukasten-Entwicklung für Hybridfahrzeuge*. Masterarbeit, Bd. 2876, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015.

Eberle 2014

Eberle, L.; Scherer, H. (Co-Betreuer); Albers, A. (Betreuer): *Nutzerorientierte Produktarchitekturen in der Serienentwicklung von Hybridfahrzeugen*. Bachelorarbeit, Bd. 2763, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2014.

Jantoß 2015

Jantoß, S.; Scherer, H. (Co-Betreuer); Stiegelmeyr, A. (Betreuer): *Modellierung funktionaler Architekturen von Hybrid-Triebstrangkomponenten*. Diplomarbeit, Hochschule Kempten, Kempten, 2015.

Wäschle 2014

Wäschle, M.; Scherer, H. (Co-Betreuer); Albers, A. (Betreuer): *Anforderungsmanagement in der Entwicklung von Plug-In Hybridfahrzeugen*. Bachelorarbeit, Bd. 2764, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2014.

Weißinger 2014

Weißinger, B.; Scherer, H. (Co-Betreuer); Matthiesen, S. (Betreuer): *Modellierung von Triebstrang-Komponenten in der Serienentwicklung von Hybridfahrzeugen*. Masterarbeit, Bd. 2768, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2014.

Wilhelm 2015

Wilhelm, J.; Scherer, H. (Co-Betreuer); Albers, A. (Betreuer): *Entwicklung einer neuen Methode zur Unterstützung einer FMEA basierend auf SysML-Modellen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen*. Masterarbeit, Bd. 3003, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Übersicht über Aufbau und Struktur der Arbeit	3
Abbildung 2.1: Hybrid-Triebstrangtopologien (Auswahl).....	6
Abbildung 2.2: Mögliche Anbindungsorte der E-Maschine in parallelen Hybridtriebsträngen	7
Abbildung 2.3: Hybridantrieb des Porsche 918 Spyder	8
Abbildung 2.4: Hierarchisches, struktureles und funktionales Systemkonzept	10
Abbildung 2.5: Systemebenen in der Modellbildung eines Fahrzeugs	12
Abbildung 2.6: Produktgenerationsentwicklung der Teilsysteme eines Fahrzeugs ..	16
Abbildung 2.7: Allgemeiner Problemlösungsprozess SPALTEN nach ALBERS	18
Abbildung 2.8: ZHO-Modell nach ALBERS	19
Abbildung 2.9: Erweitertes ZHO-Modell (liegende Acht)	21
Abbildung 2.10: Integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM)	22
Abbildung 2.11: Modellierungsframework nach ALBERS und BURSAC	24
Abbildung 2.12: Fraktaler Charakter der Bauweise eines Hybridfahrzeugs.....	30
Abbildung 2.13: Inhaltliche Abhängigkeiten und Zeitversatz in der Baukastenentwicklung am Beispiel der Hybridfahrzeuge von Porsche	36
Abbildung 2.14: Ziele, Anforderungen und Randbedingungen	41
Abbildung 2.15: Allgemeiner Anforderungsmanagement-Prozess in der Automobilindustrie	50
Abbildung 2.16: Wirknetz, Merkmale und Eigenschaften eines kämmenden Zahnradpaars	65
Abbildung 2.17: Wirkstruktur eines Hybridtriebstrangs	66
Abbildung 2.18: Arbeitsoberfläche des SysML-Tools Cameo Systems Modeler	70
Abbildung 2.19: Diagrammtypen der SysML	70
Abbildung 2.20: Beschreibungssystematik und Modellrahmenwerk nach EIGNER ET AL.....	72
Abbildung 3.1: ZHO-Modell als Forschungsmethodik.....	80
Abbildung 3.2: Modellierungsframework mit Modelltypen der vorliegenden Arbeit...	81

Abbildung 3.3: Evaluierung der Methode in Erstellungs- und Nutzungsphase	83
Abbildung 4.1: Kern-Herausforderungen im Anforderungsmanagement	86
Abbildung 4.2: Komplexität der Entwicklung von Hybridtriebsträngen und Baukästen	89
Abbildung 4.3: Relevanz der Kern-Herausforderungen in der Arbeit der Entwickler	90
Abbildung 4.4: Wunsch nach methodischer Unterstützung	91
Abbildung 4.5: Lösungsansätze zur Modellierung von Baukasten-Zielsystemen	92
Abbildung 4.6: Vernetzungen der Zielsysteme in der Baukastenentwicklung.....	94
Abbildung 4.7: Varianz und Einhüllende des Baukasten-Zielsystems	95
Abbildung 4.8: Baukastengerechte Zielsystemmodellierung mit Varianz und Unsicherheit	96
Abbildung 4.9: Elementtypen mit Unterscheidung nach Herkunft und Inhalt	99
Abbildung 4.10: Skalen für Reifegrad und Härtegrad	105
Abbildung 4.11: Anwendungsfallanalyse mit SPALTEN	107
Abbildung 4.12: Werttypen in Anforderungen	109
Abbildung 4.13: Implementierung der Methode in <i>DOORS</i> (Ausschnitt des Referenzmodells)	113
Abbildung 4.14: Verlinkungstypen zwischen Zielsystemen	115
Abbildung 4.15: Anteile von baukastenübergreifenden und von Übernahme- Elementen	118
Abbildung 4.16: Mengen der Elementtypen des ausgeführten Referenzmodells ...	119
Abbildung 4.17: Pflege des Referenzmodells mit neuen Zielsystem-Elementen	120
Abbildung 5.1: Ziele der Modellierungsmethode.....	123
Abbildung 5.2: Definierte Block-Stereotypen und verwendete Relationen des Metamodells	127
Abbildung 5.3: Kämmdendes Zahnradpaar mit Wirknetz „Zahnnormalkraft übertragen“	128
Abbildung 5.4: Vernetzung der Modellelemente des Zahnradpaars im BDD.....	129
Abbildung 5.5: Wirknetz des Zahnradpaars im IBD und zugehöriger Functional Block	130
Abbildung 5.6: Baustruktur und Funktionsstruktur (Auszüge) des SysML-Modells eines Hybridmoduls.....	131

Abbildung 5.7: BDD und IBD der Hybridmodul-Funktion „elektrisches Fahren“.....	133
Abbildung 5.8: Gemeinsame Darstellung der SysML-Blöcke (links) und des C&C ² -Wirknetzes (rechts) in einem BDD.....	134
Abbildung 5.9: BDD der Funktion „Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten“	135
Abbildung 5.10: Wirknetz der Funktion „Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten“	136
Abbildung 5.11: Funktions-Gestalt-Zusammenhänge zur Funktion „Moment VKM übertragen“	137
Abbildung 5.12: Studien zur Validierung von SysML-Modellen in der Serienentwicklung	139
Abbildung 5.13: Allgemeine Einflussgrößen auf Akzeptanz eines MBSE-Ansatzes	141
Abbildung 5.14: Spezifische Einflussgrößen des MBSE-Ansatzes dieser Arbeit....	143
Abbildung 5.15: Vorgehensweise im Praxistest des SysML-Modells.....	149
Abbildung 5.16: Ablauf des Feedbackgesprächs.....	151
Abbildung 5.17: Ergänzende Angaben zu technischen Sachverhalten	152
Abbildung 5.18: Fähigkeit der Modellierungsmethode zur Durchgängigkeit	155
Abbildung 5.19: Entwicklermeinung zur Praxistauglichkeit des SysML-Modells.....	156
Abbildung 5.20: Zeitanteile zur Modellierung der technischen Sachverhalte.....	159
Abbildung 5.21: Durchschnittliche Zeitanteile der SysML-Modellierung	161
Abbildung 7.1: Partialmodelle, Element- und Relationstypen und Attribute zur Zielsystemmodellierung.....	170
Abbildung 7.2: Hauptmerkmalliste	171
Abbildung 8.1: Auswertung der Fragen 1.1 und 2.1	174
Abbildung 8.2: Auswertung der Fragen 1.2 bis 1.6.....	175
Abbildung 8.3: Auswertung der Fragen 2.2 bis 2.5.....	175
Abbildung 8.4: Auswertung der Fragen 3.1 bis 3.4.....	176
Abbildung 8.5: Auswertung der Fragen 4.1 bis 4.4.....	176
Abbildung 8.6: Auswertung der Fragen 5.1 bis 5.4.....	177
Abbildung 8.7: Auswertung der Fragen 6.1 bis 6.4.....	177
Abbildung 9.1: Exemplarische Ansicht der Baustruktur des Hybridmoduls in SysML: Beispiel Teilsystem E-Maschine.....	178

Abbildung 9.2: Exemplarische Ansicht der Funktionsstruktur des Hybridmoduls in SysML: Beispiel elektrisches Fahren.....	179
Abbildung 9.3: IBD der Funktion „Drehmoment der VKM durch das Hybridmodul leiten“.....	180
Abbildung 9.4: Connector als Link zu einem Teilsystem der Systemumgebung (hier: Teilsystem „Kurbeltrieb“ der VKM zur Bereitstellung des VKM-Drehmoments).....	181
Abbildung 9.5: Wirknetz der Funktion „Trennkupplung ausrücken“	182
Abbildung 9.6: BDD der Funktion „Trennkupplung ausrücken“.....	183
Abbildung 9.7: IBD der Funktion „Trennkupplung ausrücken“	184
Abbildung 9.8: Kontextmenü eines Bauteils, dessen Werkstoff geändert wurde	185
Abbildung 9.9: Wirknetz der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“	186
Abbildung 9.10: BDD der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“	187
Abbildung 9.11: IBD der Funktion „Wärme Statorspulen abführen“	188
Abbildung 9.12: Kontextmenü eines Bauteils, das hinsichtlich des Wärmeübergangs an einer seiner Wirkflächen optimiert wurde.....	189