

Durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Nicholas Schmitt
aus *Nürnberg*

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [SKD+13] SCHMITT, N.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R.; HOFMANN, M.: Von der Anforderungserfassung bis zur Funktionsstruktur – Ein Systems Engineering-Vorgehen für die industrielle Praxis. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [BS14] BRÜCKNER, C.; SCHMITT, N.: Vom Systemmodell zum Prüfstandsmodell. In: NAFEMS DACH-Tagung, 20–21 Mai 2014, Bamberg Deutschland, 2014
- [SD15] SCHMITT, N.; DUMITRESCU, R.: Ein durchgängiges Vorgehen zur Anforderungserfassung und -nachverfolgung. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.J.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015

Zusammenfassung

Die Erfassung aller Anforderung an mechatronische Systeme in der Automobilindustrie ist in frühen Phasen der Entwicklung eine Herausforderung. Unter den aktuellen Rahmenbedingungen, wie einer verkürzten Entwicklungszeit, einer kosteneffizienten Entwicklung und neusten Technologien, wird dies verschärft. Zur Erfassung sämtlicher relevanter Anforderungen an diese interdisziplinären und komplexen Systeme bedarf es daher eines *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung*.

Um alle relevanten Aspekte für ein solches Vorgehensmodell zu erfassen, werden das Entwicklungsvorgehen in der Automobilindustrie beleuchtet und die spezifischen Herausforderungen abgeleitet. Auf dieser Grundlage werden die benötigten Teilergebnisse zur Anforderungserfassung identifiziert und in einem durchgängigen Gesamtverfahren verankert. Basierend auf einer Methode zur Identifizierung der relevanten System-Merkmale werden die Funktionen, die Eigenschaften, die Systemstruktur und die Schnittstellen des Systems erfasst. Aus diesen Teilergebnissen lassen sich sämtliche Anforderungen für ein Lastenheft ableiten und dokumentieren. Das Vorgehensmodell beinhaltet zudem Methoden zur Verifikation der Teilergebnisse. Darüber hinaus wurde ein Vorgehen zur Dokumentation von Lessons Learned definiert, um Erkenntnisse aus späteren Phasen der Entwicklung in die Anforderungserfassung zukünftiger Systeme zu integrieren. Das erarbeitete Vorgehensmodell wurde in einer Vielzahl von Projekten eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Validierung anhand der Beispiele Brennstoffzelle, Thermoelektrischer Generator und Digitales-Matrix-Licht.

Summary

Capture all requirements for mechatronic systems in the automotive industry is a challenge in the early stages of development. This is exacerbated under the current conditions, such as reduced development time, cost-effective development and the latest technologies. In order to record all relevant requirements for these interdisciplinary and complex systems, a *consistent process model for the requirements elicitation* is required.

To cover all relevant aspects of such a process model, the development in the automotive industry is examined and the specific challenges are derived. On this basis, the required partial outcomes for requirement elicitation are identified and embedded in a consistent process model. Based on a method to identify the relevant system-features, the functions, properties, system structure and the interfaces of the system are gathered. With these partial outcomes all needed requirements can be derived and documented in a specification sheet. The process model offers methods for the verification of the partial outcomes. In addition, a procedure for documenting lessons learned has been defined in order to integrate findings from later phases of development into the requirement elicitation of future systems. The developed process model has been used in a wide range of development projects. In the presented work the validation is based on the examples fuel cell, thermoelectric generator and digital matrix light.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	5
1.1 Problematik.....	5
1.2 Zielsetzung.....	7
1.3 Vorgehensweise	8
2 Problemanalyse.....	10
2.1 Begriffsdefinitionen, begriffliche Abgrenzung	10
2.1.1 Artefakt.....	10
2.1.2 Bauelement.....	10
2.1.3 Komponente.....	10
2.1.4 System	10
2.1.5 Wechselwirkung.....	11
2.1.6 Schnittstelle.....	11
2.1.7 Funktion	11
2.1.8 Systemarchitektur	12
2.1.9 Anforderungen	12
2.1.10 Merkmal	14
2.1.11 Eigenschaft	14
2.1.12 Granularität	14
2.1.13 Lessons Learned	14
2.1.14 Requirements Development.....	15
2.2 Mechatronische Systeme.....	15
2.2.1 Aufbau eines mechatronischen Systems	16
2.2.2 Klassen mechatronischer Systeme.....	17
2.3 Entwicklungsvorgehen für die Entwicklung mechatronischer Systeme.....	18
2.3.1 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme nach VDI 2206	18
2.3.2 Systems Engineering	21
2.3.3 Anwenderabhängigkeit beim Einsatz von Systems Engineering Methoden	23
2.3.4 Entwicklungsvorgehen in der Automobilentwicklung.....	23
2.3.5 Darstellung des Gesamtprozesses mit den Entwicklungsphasen Systemdefinition, -entwicklung und -integration	31
2.3.6 Rollen in der Automobil-Systementwicklung	33

2.4	Bedeutung von Anforderungen für mechatronische Systeme im Automobil und Bewertung des industriellen Stands der Technik in der Automobilindustrie.....	37
2.4.1	Bewertung der Entwicklungsphase Systemdefinition in der Automobilentwicklung und des Standard- Vorgehensmodells VDI-Richtlinie 2206.....	37
2.4.2	Ansätze der Anforderungserhebung	43
2.4.3	Ermittlungstechniken für Anforderungen	44
2.4.4	Anforderungsermittlungsfokus	48
2.4.5	Bedeutung von Anforderungen für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil.....	51
2.5	Problemabgrenzung.....	53
2.6	Abgeleitete Anforderungen an ein durchgängiges Entwicklungsvorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobilbereich.....	59
3	Stand der Technik	62
3.1	Rahmenwerke für das Requirements Development.....	62
3.1.1	REM.....	62
3.1.2	REMsES	64
3.1.3	SPES 2020	65
3.1.4	COSMOD-RE.....	68
3.2	Artefakt- und Anforderungserfassung in der Produktentwicklung	70
3.2.1	Vorgehen der Produktentwicklung	70
3.2.2	Münchener Vorgehensmodell	72
3.2.3	3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER	74
3.2.4	QFD	77
3.3	Ansätze und Vorgehen aus dem Umfeld der Automobilindustrie	78
3.3.1	Entwerfen von Fahrzeugkonzepten nach PRINZ.....	78
3.3.2	Model-based Requirements Engineering nach VOGELSSANG	79
3.3.3	Anforderungsmanagement nach ALLMANN	80
3.3.4	Disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten nach DIEHL	82
3.3.5	Funktionale Sicherheit in der Konzeptphase nach Hillenbrand	82
3.3.6	Templategestützte Systementwicklung nach KÖNIGS.....	84
3.3.7	Systematisiertes Ziele- und Anforderungsmanagement nach ILIE.....	84
3.3.8	Methodische Unterstützung der Anforderungsermittlung nach NEHUIS.....	85
3.3.9	Entwicklung von Anforderungen und Architektur nach SIKORA	85
3.4	Verwendete Modellierungssprachen.....	86

3.4.1	SysML	86
3.4.2	Wirkkettenmodellierung.....	88
3.4.3	CONSENS	90
3.5	Vergleich der Ansätze und Identifikation von Lücken.....	93
4	Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für mechatronische Systeme	97
4.1	Das Gesamtverfahren im Überblick	97
4.2	System-Merkmalserfassung	99
4.2.1	Definition	100
4.2.2	Vorgehen	101
4.3	System-Funktionserfassung.....	102
4.3.1	Definition	102
4.3.2	Vorgehen	104
4.3.3	Gütekriterien	106
4.4	System-Eigenschaftserfassung.....	107
4.4.1	Definition	107
4.4.2	Vorgehen	107
4.5	Das Systemmodell und die System-Wirkkettenanalyse	108
4.5.1	Definition des Systemmodells	108
4.5.2	Formale Kriterien für die Wirkkettenerstellung	110
4.5.3	Verknüpfung der Systemeigenschaften zum Systemmodell ..	110
4.5.4	Wirkketten-Dekomposition	112
4.6	Vorgehens- und Artefaktvalidierung.....	114
4.6.1	Validierung Objektfunktionen	115
4.6.2	Inhaltliche Gütekriterien/Spezifikationswürdigkeit	120
4.7	Lessons Learned	124
4.7.1	Quellen von Lessons Learned	124
4.7.2	Vorgehen	124
4.7.3	Einbeziehung der Lessons Learned in den vorgestellten Gesamtansatz.....	126
4.8	Repository.....	126
5	Validierung des Gesamtverfahrens.....	128
5.1	Anwendungsbeispiel: Brennstoffzelle	128
5.1.1	Phase 1: System-Merkmalserfassung	129
5.1.2	Phase 2: System-Funktionserfassung.....	130
5.1.3	Phase 3: System-Eigenschaftserfassung.....	131
5.1.4	Phase 4: System-Wirkkettenanalyse.....	133
5.1.5	Phase 5: Vorgehens- und Artefaktvalidierung.....	134
5.2	Weitere Anwendungsbeispiele.....	135

5.2.1	Thermoelektrischer Generator	135
5.2.2	Digitales-Matrix-Licht.....	136
5.3	Weiterführende Erkenntnisse aus der Validierung des Vorgehens .	138
5.3.1	Die veränderten Rollen durch den Einsatz des Gesamtverfahrens	138
5.3.2	Objektorientierte Lessons Learned	139
5.4	Bewertung der Arbeit gegenüber den Anforderungen.....	140
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	143
7	Abkürzungsverzeichnis.....	147
8	Literaturverzeichnis	149

Anhang

A1	Testlandkarte Volkswagen AG	1
----	-----------------------------------	---

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand in Kooperation der AUDI AG mit dem Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (Fraunhofer IEM). Bei Audi wurde die Arbeit in der Abteilung Robust Design/Komponentenerprobung betreut. Diese hat neben der Thematik Komponentenerprobung die Aufgabe, Entwicklungsprojekte durch Expertensupport zu unterstützen. Eine dieser Expertendisziplinen ist der Bereich Systems Engineering. Die Experten des Bereichs Systems Engineering unterstützen die Entwickler neuer und hochkomplexer mechatronischer Systeme unter anderem bei der Systemauslegung und Anforderungsidentifikation. Die Abteilung Robust Design/Komponentenerprobung ist eine Querschnittsabteilung und arbeitet mit allen Fachbereichen der technischen Entwicklung der AUDI AG zusammen.

Das Fraunhofer IEM besitzt weitreichende Erfahrungen im Bereich der disziplinübergreifenden Konzipierung mechatronischer Systeme. Eine der Kernkompetenzen bildet hierfür der Bereich Systems Engineering. In diesem widmet sich das Fraunhofer-Institut der anwendungsorientierten Forschung in dem Bereich der disziplinübergreifenden Beschreibung mechatronischer Systeme. Basierend auf einer Vielzahl von Projekten in der Industrie und dem Spitzencluster it's OWL¹ kann das Fraunhofer IEM auf weitreichende Erfahrungen im Bereich des industriellen Einsatzes von Methoden zur disziplinübergreifenden Entwicklung mechatronischer Systeme zurückgreifen.

Die Arbeiten beider Institutionen bilden ein solides und weitreichendes Fundament für diese Arbeit. Die Thematik der disziplinübergreifenden Entwicklung mechatronischer Systeme wurde hinsichtlich des Nutzens in einem Großkonzern untersucht. Als vorrangiges Handlungsfeld wurde hierbei das Erfassen und Verwalten von Anforderungen an komplexe mechatronische Systeme identifiziert. Das in dieser Arbeit vorgestellte Gesamtverfahren wurde in zahlreichen Entwicklungsprojekten der AUDI AG eingesetzt und validiert. Nur hierdurch kann ein flächendeckender Einsatz in der Industrie gewährleistet werden. Die vorliegende Arbeit ordnet sich mit dem Schwerpunkt der Anforderungserfassung in die disziplinübergreifende Entwicklung mechatronischer Systeme ein.

1.1 Problematik

Die Automobilindustrie erfährt, wie zahlreiche andere Industriezweige, eine zunehmende Mechatronisierung ihrer Produkte. Das vermehrte Zusammenwachsen der Disziplinen Mechanik, Elektronik und Informatik stellt die Entwicklung dieser Systeme vor eine neue Dimension der Komplexität. Die Entwicklung dieser modernen mechatronischen Systeme kann nicht auf der Ebene der Teildisziplinentwicklung beherrscht werden. In einem modernen Fahrzeug der Premiumklasse lassen sich über 200 mechatronische Systeme

¹ Intelligente technische Systeme OstWestfalenLippe (it's OWL).

identifizieren. Ein Teil dieser Systeme sind Neuentwicklungen mit zunehmender Intelligenz und Vernetzung. Nur durch diese können innovative kundenerlebbare Funktionen realisiert werden. Die aktuellen Trends in der Automobilindustrie sind das autonome Fahren und die durchgängige Vernetzung des Fahrzeuges mit seinem Umfeld. Dies sind aktuell die dominierenden Komplexitätstreiber. Das Gesamtfahrzeug und seine Systeme werden zu intelligenten technischen Systemen². Diese haben die Eigenschaften³ adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [Dum11]. Weitere Komplexitätstreiber in der Entwicklung moderner Fahrzeuge sind steigende Gesetzesanforderungen, eine zunehmende Derivatisierung⁴ [HKD+06], neue Märkte und gestiegene Kundenerwartungen. Grundlage zur Erfüllung all dieser Erwartungen stellen durchgängig entwickelte mechatronische Systeme auf Basis eindeutiger Anforderungen dar.

Neben diesen Komplexitätstreibern gibt es spezielle, industriespezifische Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie. Zunächst wäre hier der hohe Grad der verteilten Entwicklung zu nennen. Die Automobilindustrie weltweit bildet ein symbiotisches Verhältnis von OEMs⁵ und Zulieferern. Der OEM ist der Auftraggeber für die Entwicklung eines mechatronischen Systems und der Zulieferer der Auftragnehmer. Zudem weist die Automobilindustrie einen knappen Entwicklungszeitraum auf. In der Regel werden Fahrzeuge im 4-Jahrestakt in den Markt gebracht.

Das zentrale Vertragsdokument zwischen OEMs und der Zulieferindustrie ist das sogenannte Lastenheft. In diesem müssen sämtliche Anforderungen aller Stakeholder⁶ an ein mechatronisches System dokumentiert sein. Das Lastenheft stellt die vertragliche Grundlage der Zusammenarbeit eines OEMs mit den Zulieferern dar. Aufgrund des knappen Entwicklungszeitraums muss dieses Lastenheft frühzeitig im Entwicklungsprozess vorliegen. Vor dem Hintergrund neuester Technologien, zunehmender Interdisziplinarität und neuer Funktionen bildet dies eine besondere Herausforderung in der Automobilentwicklung. Dies führt dazu, dass eine vergessene Anforderung oder ein Spezifikationsfehler zu den dominierenden Kostentreibern in der Automobilentwicklung werden (Bild 1-1). Ein qualitativ hochwertiges und vollständiges Lastenheft ist daher Grundlage für eine erfolgreiche Entwicklung eines mechatronischen Systems.

² Der Begriff intelligente technische Systeme wird in Kapitel 2.2.2 erläutert.

³ Die Definition des Begriffs Eigenschaft findet sich in Kapitel 2.1.11.

⁴ Ein Derivat beschreibt eine aus einer Fahrzeugplattform abgeleitete Baureihe und die verschiedenen Modellvarianten. Eine Fahrzeugplattform ist beispielsweise der modulare Längsbaukasten des VW-Konzerns. Die abgeleiteten Baureihen sind unter anderem: Audi A4, Audi A5, Audi A6, Audi A7, Audi A8, Audi Q7, Porsche Macan, Porsche Cayenne und VW Phaeton. Die Derivate können sich in Umfängen, die den Aufbau und die Ausstattung betreffen, unterscheiden.

⁵ Original Equipment Manufacturer; deutsch: Erstausrüster.

⁶ Ein Stakeholder ist eine Person oder Gruppe, die ein berechtigtes Interesse am Verlauf oder Ergebnis eines Prozesses oder Projektes hat. [EIL11]

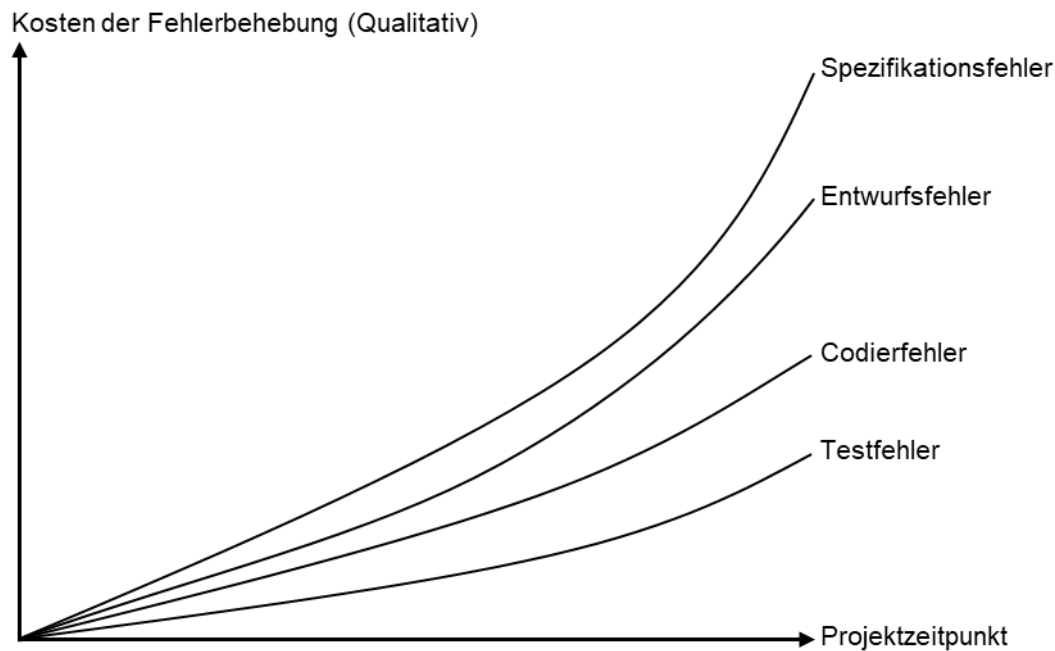


Bild 1-1: Qualitative Kosten für Fehlerbehebung nach KRÜGER [Krü90]

Neben diesem Sachverhalt ist der Faktor Mensch ein zentraler Erfolgsfaktor für ein durchgängiges und methodisches Entwicklungsvorgehen. Nur ein geringer Prozentsatz der Entwickler eines mechatronischen Systems ist mit den Vorgehensweisen und Methoden des Systems Engineering vertraut. Dies ist aber nötig, um ein mechatronisches System disziplinübergreifend zu entwickeln. Insbesondere die Methoden der modellbasierten Systemauslegung und Anforderungsableitung spielen in frühen Entwicklungszeiten hierbei eine zentrale Rolle, sind aber nicht jedem Entwickler geläufig.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist ein Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung an ein mechatronisches System für Neuentwicklungen. Diese Neuentwicklungen zeichnen sich dadurch aus, dass das Lösungsprinzip zur Umsetzung noch nicht bekannt ist. Dadurch grenzen sie sich klar von einer Anpassungskonstruktion, Variantenkonstruktion oder Auswahl ab [Ehr03]. Ein Beispiel für eine solche Neuentwicklung ohne bekanntes Lösungsprinzip ist ein Laserscheinwerfer in einem Fahrzeug. Neben dieser Einordnung lassen sich mechatronische Systeme noch nach ihrer technischen Komplexität klassifizieren. Diese Klassifikation reicht von einer räumlichen Integration von Funktionen bis hin zu vernetzten Systemen mit einer Teilintelligenz [GF06]. Eine Neuentwicklung eines intelligenten, vernetzten, mechatronischen Systems stellt die größte Herausforderung dar. Das zu entwickelnde Vorgehensmodell muss in einer sehr frühen Entwicklungsphase einsetzbar sein und die Anforderungserfassung an derartige Systeme ermöglichen. Aus der industriellen Einsetzbarkeit ergeben sich verschiedene Rahmenbedingungen. Diese reichen von

der Berücksichtigung von Expertenwissen und -erfahrung oder Toolunabhängigkeit bis zu den Herausforderungen der verteilten Entwicklung.

Das Gesamtverfahren gliedert sich in mehrere Schritte, die ein mechatronisches System unter den Aspekten Merkmale, Funktionen, Eigenschaften und Struktur betrachten. Diese sind eindeutig beschrieben und beinhalten Gütekriterien. Anhand dieser lässt sich die Methodendurchführung objektiv bewerten. Die Methoden wurden so gewählt, dass sie neben einer klar technischen Sichtweise auch die Sichtweise von Stakeholdern mit nicht ausgeprägtem technischem Verständnis wie beispielweise Marketing oder Vertrieb beinhalten.

Neben der durchgängigen Erarbeitung von Anforderungen beinhaltet das Gesamtverfahren ein Vorgehen zur Integration von Lessons Learned aus vorherigen Entwicklungsprojekten in die Anforderungserfassung.

1.3 Vorgehensweise

Im Folgenden **Kapitel 2** wird eine Problemanalyse durchgeführt. Hierzu werden zunächst die Begrifflichkeiten definiert. Zunächst wird der Begriff der mechatronischen Systeme und deren Aufbau näher erläutert. Diese sind ein Schwerpunkt der Innovationen im heutigen Automobilbau und finden sich in modernen Automobilen zunehmend. Darüber hinaus wird der Begriff Systems Engineering näher beleuchtet, der die Entwicklung derartiger Systeme zum Kern hat. Darauf aufbauend wird die Anwenderabhängigkeit und Erfahrung beim Einsatz von Systems Engineering thematisiert. Das Kapitel schließt mit einer Analyse und Untergliederung des heute gängigen Vorgehens in der Automobilentwicklung. Abschließend werden die Handlungsfelder und Anforderungen dieser Arbeit abgeleitet.

In **Kapitel 3** wird der Stand der Technik analysiert. Hierbei werden verschiedene Themenblöcke analysiert, die zur Erarbeitung von Anforderungen in einem automobilen Entwicklungsprozess benötigt werden. Zunächst erfolgt eine Analyse gängiger Vorgehensmodelle zur Anforderungserhebung. Darauf basierend werden mehrere Techniken zur Anforderungserarbeitung beleuchtet. Abschließend werden noch die in dieser Arbeit genutzten Modellierungsmethoden vorgestellt. Ein Vergleich der Ansätze mit den in Kapitel 2 festgelegten Anforderungen und Handlungsfeldern zeigt einen Handlungsbedarf hinsichtlich der Thematik Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung in der Automobilentwicklung auf.

Kapitel 4 stellt das Kernstück der vorliegenden Arbeit dar. Hierin wird das Gesamtverfahren zur Erfassung interdisziplinärer Anforderungen erläutert. Dieses Vorgehen besteht aus mehreren Einzelmethoden. Diese werden erläutert und das Vorgehen zur Methodendurchführung dargestellt. Im Kapitel 4 werden zudem mehrere Gütekriterien vorgestellt, die die Methodenanwendung bewertbar machen. Dies ist insbesondere bei der Anwendung methodenunerfahrener Anwender nötig. Darüber hinaus wird die Thematik Lessons

Learned beleuchtet, die es ermöglicht, die Entwicklung von Folgesystemen zielgerichteter und effizienter zu gestalten.

Die Darstellung des erarbeiteten Gesamtverfahrens anhand von Anwendungsbeispielen findet in **Kapitel 5** statt. Hierbei werden die Einzelschritte des Vorgehens anhand eines Beispiels und einzelne Aspekte aus weiteren Projekten dargestellt. Das Kapitel schließt mit weiteren Erkenntnissen aus der Anwendung des Gesamtverfahrens ab, wie zum Beispiel den veränderten Rollen in der Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil.

Eine abschließende Zusammenfassung der Arbeit findet in **Kapitel 6** statt. Zudem wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder gegeben.

2 Problemanalyse

2.1 Begriffsdefinitionen, begriffliche Abgrenzung

2.1.1 Artefakt

Ein Artefakt beschreibt ein Arbeitsergebnis. Dieses kann durch ein methodisches Vorgehen erarbeitet sein oder durch Sammeln vorhandener Informationen entstehen.

2.1.2 Bauelement

Ein Bauelement ist ein Mechanik-, Elektronik- oder Softwareobjekt. Mehrere Bauelemente bilden durch Schnittstellen/Wechselwirkungen eine Komponente. Ein Bauelement ist die kleinste Betrachtungseinheit und kann nicht weiter technisch zerlegt/dekomponiert werden.

2.1.3 Komponente

Eine Komponente ist ein Mechanik-, Elektronik-, Software- oder mechatronisches Objekt. Eine Komponente bildet mit anderen Komponenten und den jeweiligen Schnittstellen/Wechselwirkungen ein System. An der Komponentengrenze lassen sich Schnittstellen und Eigenschaften hin zum System identifizieren. Eine Komponente besitzt eine inhärente Funktion.

2.1.4 System

Ein System ist ein logisch von der Umwelt abgegrenztes Objekt. Es beinhaltet mehrere Komponenten und die Schnittstellen zwischen diesen Komponenten. Ein System ist als mechatronisches Objekt, bestehend aus mechanischen, elektronischen und informationsverarbeitenden/Software-Komponenten und Bauelementen aufgebaut. An der Systemgrenze lassen sich Schnittstellen/Wechselwirkungen und Eigenschaften hin zum Systemumfeld identifizieren (Bild 2-1). Ein System besitzt nach innen (zwischen den einzelnen Subkomponenten) mehr Schnittstellen als nach außen und eine inhärente Funktion. Die Elemente des Systems stehen zueinander in Beziehung. [Pat82]

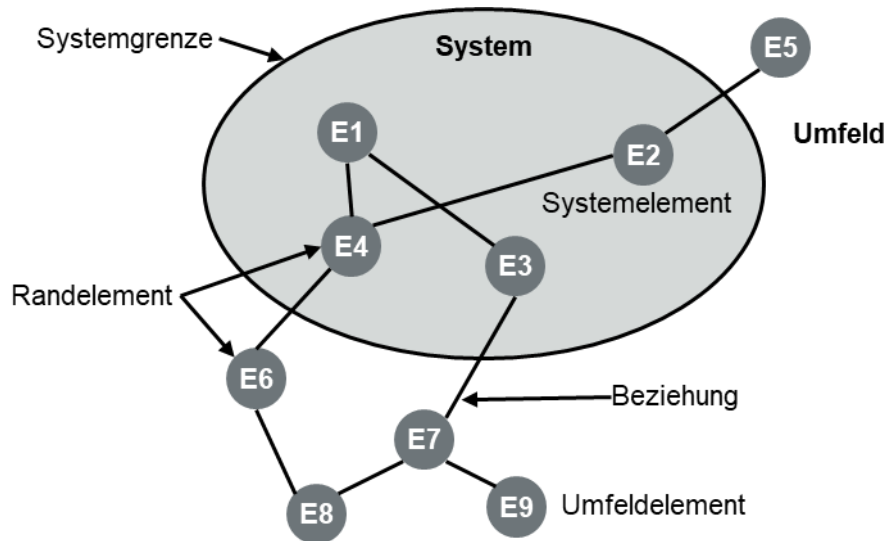


Bild 2-1: Schematische Darstellung eines Systems in sein Umfeld eingebettet nach HABERFELLNER et al. [HWF+12]

2.1.5 Wechselwirkung

Eine Wechselwirkung ist eine Interaktion oder Beeinflussung zwischen Bauelementen, zwischen Komponenten oder einem System mit seiner Umwelt. Im Grundsatz ist zwischen gewollten und ungewollten Wechselwirkungen zu unterscheiden. Gewollte Wechselwirkungen begünstigen oder ermöglichen eine, von einem Objekt bereitzustellende, Funktion. Gewollte Wechselwirkungen sind meist in Form von Schnittstellen repräsentiert. Ungewollte Wechselwirkungen sind eine ungewollte Beeinflussung eines Objektes durch dessen Umwelt. Ungewollte Wechselwirkungen entstehen aufgrund des Vorhandenseins von gewollten Wechselwirkungen. Beispielsweise führt die gewollte Wechselwirkung „Befestigung“ eines Objektes bei mechanischer Anregung an dem befestigten Objekt zu der ungewollten Wechselwirkung „Vibrationsübertragung“. Ungewollte Wechselwirkungen sind nicht als „Nicht-Funktion“ zu verstehen.

2.1.6 Schnittstelle

Eine Schnittstelle ist eine gewünschte oder gewollte Wechselwirkung zwischen Bauelementen, zwischen Komponenten oder einem System mit seiner Umwelt. Schnittstellen stellen eine mechanische, stoffliche, energetische oder informelle Interaktion zwischen zwei oder mehreren Objekten dar.

2.1.7 Funktion

Eine Funktion ist eine funktional beschreibbare Aktion. Die Beschreibung des Zusammenhangs von Input(-Zustand) und Output(-Zustand) erfolgt als mathematische (Übergangs-)Funktion. Zu unterscheiden sind endogene, d. h. von äußeren Eingriffen in

das System unabhängige, und exogene, d. h. auf äußeren Eingriffen beruhende Funktionen.

2.1.8 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur ist eine modellhafte Darstellung einer gestaltbehafteten Systemstruktur. Eine Systemarchitektur bildet die Kopplung technischer Funktionen interagierender physischer oder logischer Komponenten ab [Ulr95]. Sie beinhaltet alle Objekte eines Systems und stellt sämtliche Schnittstellen und Wechselwirkungen des Systems nach innen und zur Umwelt dar. Diese Darstellung beinhaltet durch zunehmende Dekomposition sowohl die Komponenten- als auch die Bauelementstruktur mit all den benötigten Schnittstellen. Die dargestellte Struktur dient der Erfüllung aller Eigenschaften und der Erreichung einer kundenerlebbaren Systemgesamtfunktion in einem vorgegebenen Kontext (Gesamtfahrzeug). Die Systemarchitektur ist so aufzubauen, dass diese die geforderten Anforderungen bestmöglich erfüllt.

2.1.9 Anforderungen

2.1.9.1 Allgemeine Beschreibung

Der Begriff Anforderungen ist in der [IEEE610.12] definiert. Eine Übersetzung der in Englisch verfassten Norm findet sich bei POHL [Poh07]:

Eine Anforderung ist eine Bedingung oder Eigenschaft, die ein System oder eine Person benötigt, um ein Problem zu lösen oder ein Ziel zu erreichen. Des Weiteren ist es eine Bedingung oder Eigenschaft, die ein System, eine Systemkomponente oder ein Bauelement aufweisen muss, um einen Vertrag zu erfüllen oder einem Standard, einer Spezifikation oder einem anderen formell auferlegten Dokument zu genügen. Zudem ist eine Anforderung eine dokumentierte Repräsentation einer wie oben beschriebenen Bedingung oder Eigenschaft. Typischerweise werden Anforderungen in Form von Lastenheften spezifiziert und dokumentiert.

Aus der Definition der IEEE610.12-1990 [IEEE610.12] geht hervor, dass Anforderungen nicht nur das zu lösende Problem und Ziele beschreiben, sondern auch die Bedingungen und geforderten Eigenschaften des Systems. Dies sind die Randbedingungen, unter denen das System im Einsatz operiert.

Die Standards IEEE830 [IEEE830] und IEEE1233 [IEEE1233] definieren mehrere Charakteristika oder Eigenschaften von Anforderungen. Jede spezifizierte Anforderung sollte diese idealen Eigenschaften besitzen:

- **Korrektheit:** Die Anforderung muss die geforderte Eigenschaft richtig beschreiben.

- Eindeutig: Jede Anforderung sollte so beschrieben werden, dass sie nur in einer Weise interpretiert werden kann.
- Vollständig: Jede Anforderung muss vollständig spezifiziert sein.
- Konsistent: Jede Anforderung und deren Beschreibung müssen widerspruchsfrei sein.
- Priorisierung/Stabilität: Anforderungen müssen sich bezüglich ihrer Relevanz beziehungsweise Wichtigkeit und ihrer Stabilität einordnen lassen. Stabilität beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Änderung oder Anpassung der Anforderung im fortschreitenden Entwicklungsprozess.
- Verifizierbarkeit: Jede Anforderung muss testbar sein.
- Verfolgbarkeit⁷: Der Ursprung, die Quelle und der Kontext einer Anforderung müssen ersichtlich und nachvollziehbar sein. Zudem muss die Umsetzung der Anforderung in einem System verfolgbar sein.
- Abstrakt: Jede Anforderung muss lösungsunabhängig sein.

Typischerweise werden Anforderungen in zwei Kategorien unterteilt. Diese unterscheiden zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen [GW89][CNY+00].

2.1.9.2 Funktionale Anforderungen

Funktionale Anforderungen definieren eine von einem Objekt bereitzustellende Funktion, einen bereitzustellenden Service oder eine Reaktion des Objektes auf bestimmte Eingaben. Funktionale Anforderungen stellen zudem das Überführen von Eingangsgrößen (Stoff, Energie, Information) unter Berücksichtigung von Parametern in umgewandelte Ausgangsgrößen dar [Som12]. Funktionale Anforderungen weisen im Allgemeinen einen booleschen Erfüllungscharakter auf.

2.1.9.3 Nicht-funktionale Anforderungen

Nicht-funktionale Anforderungen sind Beschränkungen der durch das System angebotenen Services oder Funktionen. Das schließt Zeitbeschränkungen, Beschränkungen des Entwicklungsprozesses und einzuhaltende Standards ein. Des Weiteren stellen nicht-funktionale Anforderungen Randbedingungen dar, die Einfluss auf die Objekte wie System, Komponenten und Bauelemente haben und beschränkend wirken können. Sie

⁷ In der Literatur findet sich häufig der Begriff *Traceability*. In dieser Arbeit wird der deutsche Begriff der *Verfolgbarkeit* verwendet.

beziehen sich oft auf das ganze System und gewöhnlich nicht auf einzelne Systemfunktionen oder Dienste [Som12]. Nicht-funktionale Anforderungen weisen im Allgemeinen einen messbaren Erfüllungsgrad auf. Dieser ist optimierbar.

2.1.10 Merkmal

Ein Merkmal ist ein „charakteristisches, unterscheidendes Zeichen, an dem eine bestimmte Person, Gruppe oder Sache, auch ein Zustand erkennbar wird“ [Duden]. Ein Merkmal kann sowohl Systeme, Komponenten als auch Bauelemente beschreiben. Ein Merkmal hat einen allgemeingültigen, objektunabhängigen Charakter.

2.1.11 Eigenschaft

Eine Eigenschaft besteht aus einem Merkmal und dessen Ausprägung. Die Ausprägung ist system-, komponenten- oder bauteilspezifisch und repräsentiert die spezifizierte Ausprägung einer Funktionalität zur Erreichung einer kundenerlebbaren Funktion. Eine Eigenschaft kann je nach Granularität und Detaillierungsgrad eine Anforderung sein. Es können sowohl funktionale als auch nicht funktionale/robuste Eigenschaften unterschieden werden. Die Unterscheidung ist analog den funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen (vgl. Kapitel 2.1.9.2 und 2.1.9.3).

2.1.12 Granularität

Granularität ist ein Maß für den Detaillierungsgrad. Je feingranularer eine Betrachtung ist, umso detaillierter ist die Aufgliederung in Unterobjekte. Je feingranularer beispielsweise eine Systemarchitektur aufgebaut ist, umso detaillierter ist das Aufgliedern eines Objektes in seine Unterobjekte und Wechselwirkungen beziehungsweise Schnittstellen. Ebenso unterliegen Eigenschaften einer Granularität. Eine feingranulare Eigenschaft bildet bezüglich einer Anforderung eine 1:1-Beziehung aus, wohingegen eine grobgranulare Eigenschaft eine 1:n-Beziehung darstellt. Für den Einsatz von Entwicklungs- und Modellierungsmethoden ist die Granularität ein wichtiger Rahmenfaktor, da hierdurch eine zielgerichtete Detaillierung, die auf die Bedarfe der Entwicklung mechatronischer Systeme hin angepasst ist, ermöglicht wird.

2.1.13 Lessons Learned

Lessons Learned dienen der Wiederverwendung von dokumentierten Erfahrungen. Als Grundlage dient die Definition nach FÜRSTENAU et al.:

„Lessons Learned haben das Ziel, vergangene Tätigkeiten unter der Perspektive erfolgreicher und weniger erfolgreicher Resultate bzw. Fehler zu dokumentieren und aufzubereiten, um daraus systematisch

zu lernen. Als Ergebnis bündeln Lessons Learned in klarer und knapper Form den Kern der kritischen Erfahrungen, die in einem geschäftsrelevanten Feld oder Projekt gemacht wurden.“ [FLK+05]

Diese dokumentierten, kritischen Erfahrungen können auch technische Ausprägungen oder Umsetzungen in einem Entwicklungsprozess sein. Diese sind insbesondere bei der Anforderungserhebung oder Anforderungsspezifikation relevant. Hierdurch ist es möglich, Probleme bei der Anforderungsumsetzung oder gewonnene Erkenntnisse beim Betrieb eines Fahrzeuges über Lebensdauer in die frühe Phase der Anforderungserhebung und Spezifikation zu integrieren. Lessons Learned dienen folglich der Dokumentation und der Wiederverwendung von technischen Erkenntnissen in der Fahrzeugentwicklung und des Fahrzeugeinsatzes.

2.1.14 Requirements Development

Der Begriff Requirements Development und dessen Einordnung in das Requirements Engineering werden in der wissenschaftlichen Literatur sehr unterschiedlich definiert. Einerseits wird das Erarbeiten einer widerspruchsfreien Spezifikation dem Requirements Engineering zugeordnet [Poh96], andererseits wird das Requirements Engineering in die zwei Teilprozesse Requirements Development und Requirements Management unterteilt [Wie03]. Requirements Management wird hier als die Summe der Aktivitäten Verwaltung, Bereitstellung und Informationsmanagement von Anforderungen definiert. Das Requirements Development beinhaltet die Anforderungserhebung, Anforderungsanalyse und die widerspruchsfreie Anforderungsspezifikation und -definition. HOOD et al. definieren zudem den Begriff Requirements Definition, der alle Aktivitäten von der Anforderungserfassung über die Spezifikation und Analyse und das Anforderungsreview umfasst [HWF+08]. Das Requirements Management wird in [HWF+08] als die Summe aller Schnittstellen zwischen Anforderungserhebung und allen weiteren Teilen des Systems Engineering verstanden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Requirements Development als Prozess aufgefasst, der die Anforderungserhebung, Anforderungsspezifikation und Anforderungsdokumentation beinhaltet. Das Requirements Management ist dem Requirements Development nachgelagert und unterstützt die Umsetzung der dokumentierten Anforderungen im weiteren Entwicklungsprozess.

2.2 Mechatronische Systeme

Heutige Produktinnovationen werden zumeist mittels sogenannter mechatronischer Systeme realisiert. Diese vereinen mehrere Fachdisziplinen in sich und werden durch ein synergetisches Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik realisiert [VDI2206]. Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort und leitet sich aus einer Verknüpfung der Ingenieurdisziplinen Mechanik und Elektronik ab. Nach OBERMANN

sind diese Systeme „ausgeklügelte Maschinen mit einem High Tech-Gerüst aus Mechanik, Sensorik, Aktorik, Mikroelektronik und Software“ [Obe00]. Eine weitreichendere Beschreibung des Begriffs mechatronischen Systems wurde von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA aufgestellt. Diese wurde aus dem englischen Original übersetzt und in die VDI-Richtlinie 2206 übernommen:

„Mechatronik beschreibt das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung.“ [VDI2206]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition der VDI-Richtlinie 2206 verwendet. Ein mechatronisches System entsteht durch das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik.

2.2.1 Aufbau eines mechatronischen Systems

Die Grundbestandteile eines solchen mechatronischen Systems sind das **Grundsystem**, **Sensoren**, **Aktoren** und die **Informationsverarbeitung**. Diese wirken in Form eines Regelkreises zusammen [VDI2206]. Das **Grundsystem** beinhaltet die Gesamtheit aller mechanischen, elektronischen, hydraulischen und pneumatischen Strukturen. Mechatronische Systeme sind in ein Umfeld eingebettet. Dieses Umfeld besteht aus optionalen Einheiten, je nach Art und Zweck des Systems. Da jedes System mit seinem Umfeld in Interaktion und Verbindung steht [HWF+12] bilden sich Schnittstelle, Wechselwirkungen und Flüsse aus (Bild 2-2).

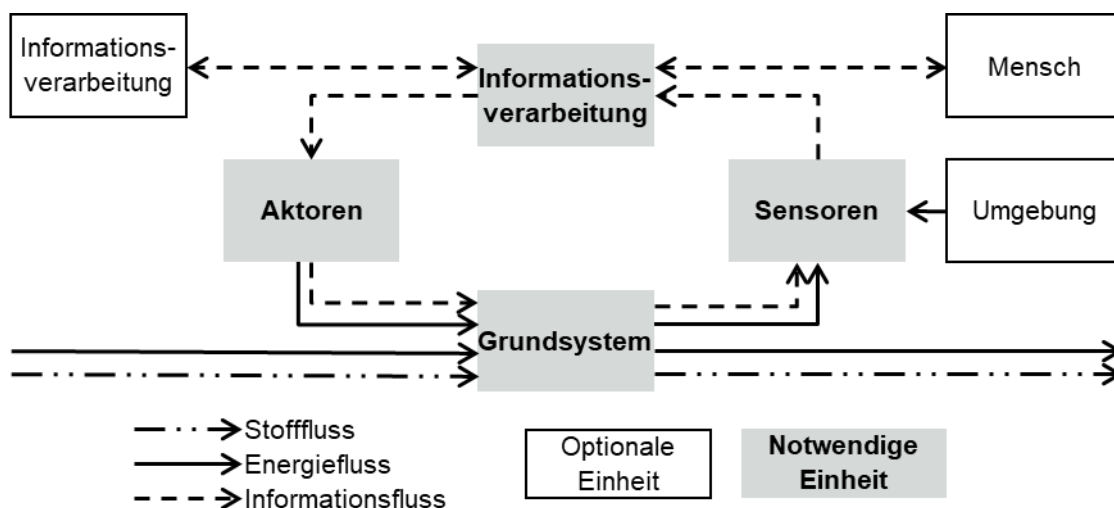


Bild 2-2: Aufbau eines mechatronischen Systems [VDI2206]

Durch **Sensoren** werden Veränderungen oder Zustände der Umgebung registriert und gemessen. Zudem dienen diese dazu, Zustandsgrößen innerhalb des Grundsystems zu

erfassen. Die erfassten Größen werden mittels eines Informationsflusses an die Informationsverarbeitung gesendet. Die **Informationsverarbeitung** stellt die zentrale Logikeinheit eines mechatronischen Systems dar. In dieser werden die Sensorwerte ausgewertet und eine geeignete Beeinflussung des Grundsystems über die Aktorik ermittelt. Mittels der **Aktorik** werden die Zustandsgrößen des Grundsystems beeinflusst. Hierzu wandeln diese den Informationsfluss der Informationseinheit in eine physikalische Stellgröße. Die Flussarten durch die die Elemente des mechatronischen Systems miteinander verbunden sind, lassen sich wie folgt beschreiben [PBF+07]:

- **Energiefluss:** Der Begriff Energie ist in einem physikalischen Sinn zu verstehen. Energieflüsse beschreiben einen Austausch von sowohl mechanischer als auch thermischer oder elektrischer Energie.
- **Informationsfluss:** Durch Informationsflüsse tauschen die Elemente des mechatronischen Systems Informationen in Form von Signalen, Daten oder Nachrichten aus. In Richtung des Menschen ist diese Flussbeziehung häufig als Anzeige oder Betätigungselement zu verstehen.
- **Stofffluss:** Ein Stofffluss beschreibt den Austausch von Stoffen zwischen den Elementen des mechatronischen Systems. Diese Stoffe können Flüssigkeiten, Feststoffe oder Gase sein.

2.2.2 Klassen mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme lassen sich in drei Klassen unterteilen [GF06]. Die Systeme der **Klasse 1** sind gekennzeichnet durch eine räumliche Integration von Mechanik und Elektronik. Ziel dieser räumlichen Integration ist die Realisierung vieler Funktionalitäten auf kleinstem Bauraum. Diese wird durch eine zunehmende Integration von Mechanik und Elektronik realisiert.

Die mechatronischen Systeme der **Klasse 2** sind Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten. Durch einen Regelkreis bestehend aus Sensor, Informationsverarbeitung und Aktor reagieren diese Systeme selbstständig auf Veränderungen der Umwelt. Der Fokus der mechatronischen Systeme der Klasse 2 liegt auf dem Entwurf und der Optimierung der Regelsysteme. [Gau10]

Die dritte Klasse von mechatronischen Systemen beschreibt die intelligenten, vernetzten Systeme. Diese **Klasse 3** Systeme haben nach DUMITRESCU [Dum11] die vier Charaktereigenschaften adaptiv, robust, vorausschauend und benutzerfreundlich. Durch eine inhärente Teilintelligenz ist es den Systemen möglich, sich auf veränderte Umweltbedingungen autonom zu adaptieren. Auch das Anpassen auf Benutzerwünsche ist möglich.

Jedes der mechatronischen Systeme der drei Klassen ist durch eine zunehmende technische Komplexität gekennzeichnet. Aufgrund neuer Technologien und systeminternen und -extern Wechselwirkungen ist es unabdingbar, die Anforderungen der Systeme und deren

Subkomponenten strukturiert zu erfassen. Nur hierdurch kann sichergestellt werden, dass die nachfolgende Entwicklung zielgerichtet durchgeführt werden kann und die Systeme die gewünschten Eigenschaften in der geforderten Qualität besitzen.

2.3 Entwicklungsvorgehen für die Entwicklung mechatronischer Systeme

2.3.1 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme nach VDI 2206

Die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [VDI2206] ist in Wissenschaft und Industrie heutzutage gleichermaßen anerkannt und repräsentiert den Standard für Entwicklungsvorgehen in vielen Unternehmen. Zudem wird die VDI-Richtlinie 2206 häufig als Standard-Vorgehensmodell in der Automobilindustrie beschrieben [SLM07] [Aut10]. Die Richtlinie ordnet sich neben den VDI-Richtlinien VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ [VDI2221] und VDI 2422 „Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik“ [VDI2422] ein und erweitert diese.

Die VDI-Richtlinie 2206 bildet eine allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlage methodischen Entwickelns und stellt einen domänenübergreifenden Leitfaden dar. Die „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ deckt somit das Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik in der Entwicklung ab. Hierbei gliedert sich die VDI-Richtlinie 2206 in drei Bereiche: der Problemlösungszyklus auf der Mikroebene, das V-Modell auf der Makroebene und Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte.

Der Problemlösungszyklus auf der Mikroebene soll den im Prozess stehenden Produktentwickler bei der Bearbeitung vorhersehbarer Teilaufgaben und bei der Lösung unvorhersehbarer Probleme unterstützen. Dies erfolgt auf Grundlage eines allgemeinen Problemlösungszyklus und gliedert sich in ein Ist-Zustandsorientiertes und ein Soll-Zustandsorientiertes Vorgehen. Das Ist-Zustandsorientierte Vorgehen beginnt mit einer Situationsanalyse und der Zielformulierung, wohingegen das Soll-Zustandsorientierte Vorgehen mit einer Zielübernahme und einer Situationsanalyse startet. Anschließend werden beide Ansätze in eine Synthese und Analyse, Bewertung und Entscheidung sowie Planung des weiteren Vorgehens überführt.

Das V-Modell auf der Makroebene dient als Richtschnur für die makroskopische Planung des Vorgehens anhand des V-Modells. Das V-Modell wurde hierbei aus der Softwareentwicklung übernommen, angepasst und erweitert.

Den Beginn des Vorgehens des V-Modells stellt ein konkreter Entwicklungsauftrag dar. Der V-Modell-Durchlauf endet mit einem fertig entwickelten Produkt. Der konkrete Entwicklungsauftrag liegt in Form von konkreten **Anforderungen** vor. Diese Anforderungen bilden zugleich den Maßstab, anhand dessen das spätere Produkt zu bewerten ist. In Form

einer Anforderungsliste werden diese Anforderungen dokumentiert. Die Anforderungsliste sollte zu einem möglichst frühen Zeitpunkt alle Anforderungen und Wünsche an das zukünftige Produkt enthalten, und zwar aus Sicht des potentiellen Kunden, aber auch aus Sicht von Produktion, Vertrieb und Service [PBF+07, S. 135]. Die Anforderungen werden zudem nach funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen klassifiziert.

Die Phase **Systementwurf** beginnt mit dem Abstrahieren der in der Anforderungsliste beschriebenen Angaben (Bild 2-3). Hierbei soll durch beispielsweise der Reduktion der Anforderungsliste die wesentliche und allgemeingültige Problemstellung herausgearbeitet werden. Auf Basis der Problemspezifikation wird die Gesamtfunktion abgeleitet. Diese enthält als Eingangsgrößen die Einsatzbedingungen und als Ausgangsgröße das gewünschte Verhalten. Das methodische Vorgehen sieht vor, die Gesamtfunktion in Form einer Funktionsstruktur in Teilfunktionen zu dekomponieren [PBF+07]. Hierbei sind die einzelnen Teilfunktionen durch Energie-, Stoff und Signalflüsse miteinander verknüpft. Ziel ist es, die Funktionsstruktur so weit zu detaillieren, bis es gelingt, Wirkprinzipien und Lösungselemente zur Erfüllung der Teilfunktionen zu finden. Dies stellt einen iterativen Prozess aus Analyse und Synthese dar.

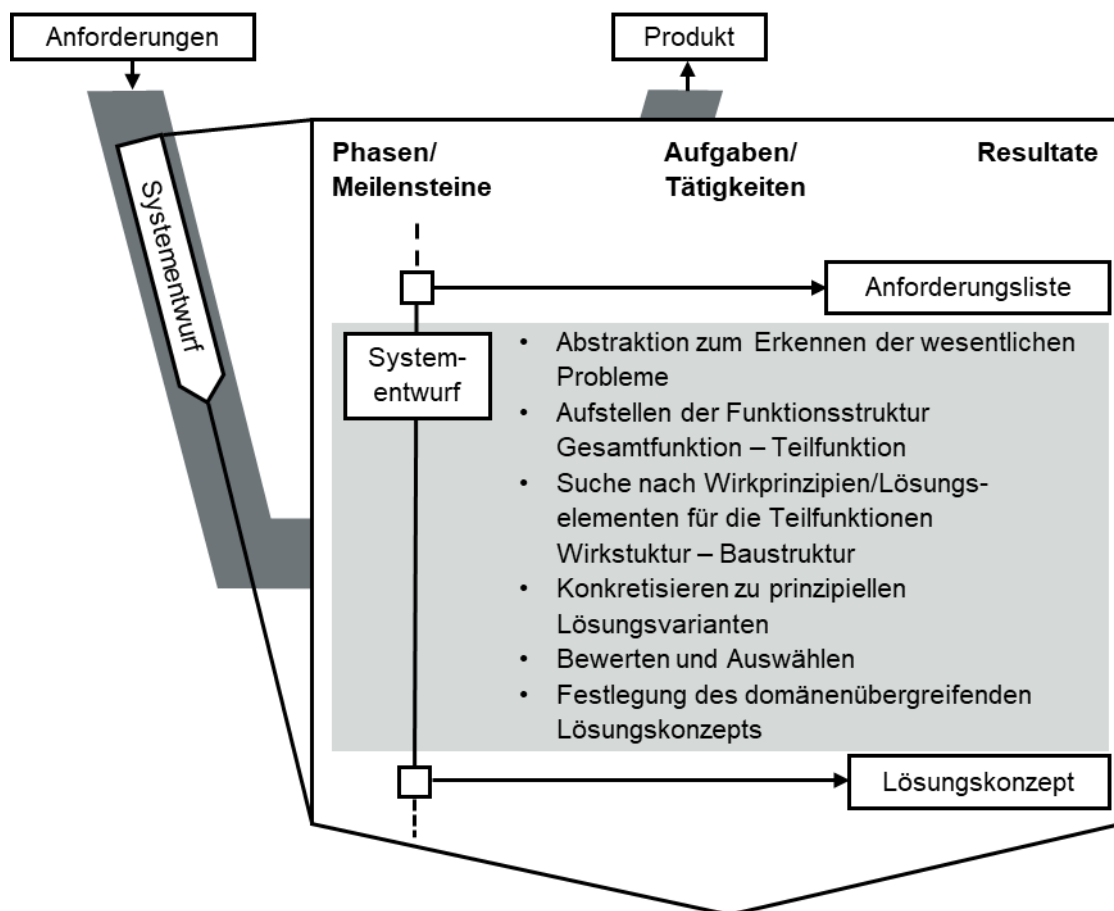


Bild 2-3: Phase Systementwurf [VDI2206]

Basierend auf der Funktionsstruktur werden für die einzelnen Teilfunktionen geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente gesucht. Hierbei bestehen zwischen Lösungselement und Wirkprinzip polyhierarchische Erfüllungsbeziehungen [Rot00]. So können einem Lösungselement mehrere Teilfunktionen inhärent sein. Der Prozess wird so lange fortgesetzt, bis alle Teilfunktionen durch geeignete Wirkprinzipien und/oder Lösungselemente erfüllt werden [KBS97]. Es ergibt sich ein Vorgehen nach BALZERT et al. [BKL+09]. Im Zuge dessen findet ein Wechselspiel zwischen Problem- und Lösungssicht durch zunehmende Konkretisierung des Entwicklungsgegenstandes statt.

Die gefundenen Wirkprinzipien und Lösungselemente werden in einer sogenannten Wirkstruktur dargestellt. Diese verknüpft die einzelnen Elemente über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse. Die Wirkstruktur ist alleinig aber zu unkonkret, um das Lösungsprinzip beurteilen zu können. Die weitere Konkretisierung der Wirkstruktur findet in Form einer sogenannten Baustruktur statt. Mit dieser werden die Verträglichkeiten der einzelnen Wirkprinzipien und Lösungselemente bezüglich der Gestalt überprüft. Zudem werden die einzelnen Lösungselemente in Stütz- und Hüllsysteme eingebettet, die die funktionsgerechte Anordnung der Elemente und ihr Zusammenwirken sicherstellen. Um das domänenübergreifende Konzept final festzulegen und den fachdisziplinspezifischen Entwurf fortsetzen zu können, ist die erarbeitete Vorstellung jedoch nicht konkret genug. Es müssen weitere Aspekte aus dem Bereich der nicht-funktionalen Anforderungen einbezogen werden. Das Ergebnis der Phase Systementwurf ist ein domänenübergreifendes Lösungskonzept.

Anschließend an den Systementwurf findet der **fachdisziplinspezifische Entwurf** statt. Hierbei wird das domänenübergreifende Lösungskonzept in die einzelnen Entwicklungsdomänen aufgeteilt. Es findet eine Aufteilung der Funktionserfüllung unter den beteiligten Domänen statt. Die Entwicklung in den einzelnen Domänen erfolgt auf der Basis etablierter, domänenspezifischer Entwicklungsmethodiken. Das Ergebnis sind Teillösungen der einzelnen Domänen.

In der Phase **Systemintegration** werden die einzelnen Teillösungen der Disziplinen zu einem gesamt-mechatronischen System vereint. Während des domänenspezifischen Entwurfs kann es zur Veränderung der Wirkstruktur und Baustruktur kommen. Dies kann zu Inkompatibilitäten führen. Diese müssen bei der Systemintegration erkannt und eliminiert werden. Hierzu kann ein morphologischer Kasten [PB97] genutzt werden.

Mittels der **Eigenschaftsabsicherung** wird beim Durchlaufen der einzelnen Phasen Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration stets die Lösungsvariante gegen die Anforderungsliste geprüft. Es lassen sich hierbei Validierung und Verifikation unterscheiden. Mittels Validierung wird überprüft, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist. Durch Verifikation wird evaluiert, ob eine Realisierung mit einer Spezifikation übereinstimmt.

Übergreifend findet sich der Bereich **Modellbildung und -analyse**. Mittels der Modellbildung und -analyse findet eine fortlaufende virtuelle oder rechnergestützte Entwicklung statt. Dies geschieht mittels rechnerverarbeitbaren Modellen.

Den letzten Bereich der VDI-Richtlinie 2206 stellen die sogenannten **Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte** dar. Hierbei wird der auf Mikroebene definierte Problemlösungszyklus in konkretere vordefinierte Prozessbausteine aufgegliedert. Diese orientieren sich an wiederkehrenden Aufgabengestaltungen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme.

2.3.2 Systems Engineering

Die zunehmend ansteigende Komplexität und die voranschreitende Interdisziplinarität moderner technischer Produkte benötigen neue Wege in der Entwicklung und der Produktentstehung. Daher entstand Mitte des 20. Jahrhunderts ein neues Wissenschaftsgebiet, das Systems Engineering. Eine der ersten größeren Veröffentlichungen wurde im Jahr 1962 durch Arthur Hall herausgebracht. Sein Buch trägt den Titel „*a methodology for Systems Engineering*“. Im Vorwort schreibt HALL, dass die wachsende Notwendigkeit nach Systems Engineering die Definition philosophischer Grundsätze nötig macht. In seinem Buch beschreibt er einige dieser Grundsätze und weitere Prozesse zur Systementwicklung [Hal62].

Im Zentrum der heutigen Definitionen von Systems Engineering steht das Systemdenken. Dies fokussiert auf das System als Ganzes und dessen Verständnis. Eine der verbreitetsten Definitionen liefert die INCOSE⁸. Diese wurde von der GfSE⁹ ins Deutsche übersetzt:

„Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz und soll die Entwicklung von Systemen methodisch ermöglichen. SE fokussiert ein ganzheitliches und zusammenwirkendes Verständnis der Stakeholder Anforderungen, der Entdeckung von Lösungsmöglichkeiten und der Dokumentation von Anforderungen sowie das Synthetisieren, Verifizieren, Validieren und die Entwicklung von Lösungen. Das gesamte Problem wird während der Konzeptentwicklung bis zur Systementwicklung betrachtet. Das Systems Engineering stellt hierfür geeignete Methoden, Prozesse und Best Practices bereit.“ [INC12]

Als methodische Komponente bei der Problemlösung wird Systems Engineering von HABERFELLNER et al. gesehen [HWF+12]. Hier werden zwei Bereiche unterscheiden, die

⁸ INCOSE: International Council on Systems Engineering.

⁹ GfSE: Gesellschaft für Systems-Engineering e.V., German Chapter of INCOSE.

verbunden sind. Zum einen der Bereich der SE-Philosophie mit der Unterteilung in Systemdenken und Vorgehensmodell, zum anderen gibt es den Problemlösungsprozess (Bild 2-4).

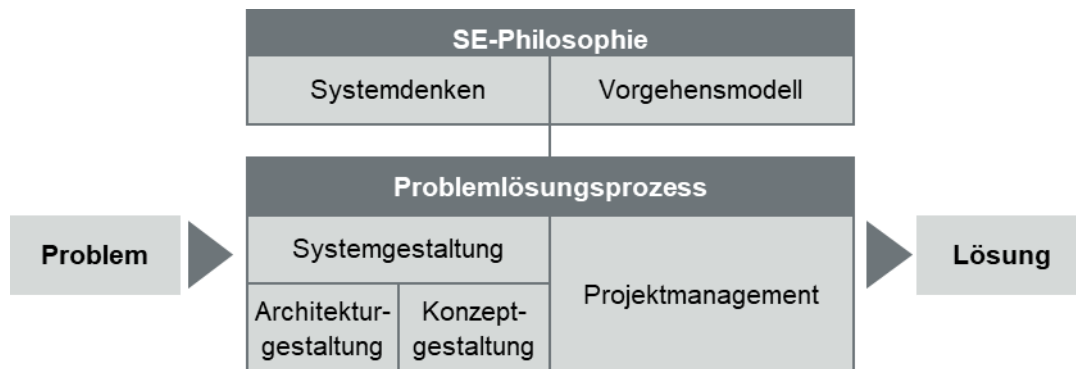


Bild 2-4: Konzept des Systems Engineering nach HABERFELLNER et al. [HWF+12]

Das **Systemdenken** der SE-Philosophie beinhaltet Denkweisen und -ansätze. Mit deren Hilfe ist es möglich komplexe Systeme verstehen und gestalten zu können. Dies geschieht mittels Betrachtung eines ganzheitlichen Systems vor verschiedenen Problemstellungen oder Situationen. HABERFELLNER et al. unterscheiden die umfeldorientierte, die wirkungsorientierte und die strukturorientierte Betrachtungsweise. Darüber hinaus können durch sogenannte Aspekte¹⁰ verschiedene Sichtweisen auf die Systemstruktur erzeugt werden. Hierdurch ist es möglich, gezielt Eigenschaften, Elemente und deren Verknüpfungen abzubilden. Der zweite Teil der SE-Philosophie, das **Vorgehensmodell**, beschreibt einen Leitfaden. Dieser untergliedert die Systementwicklung in beherrschbare Teilprozesse. Hierbei existieren vier Grundgedanken. Diese sind vom *Groben zum Detail*, *Denken in Varianten*, der *Phasenablauf* und der *Problemlösungszyklus*. Durch den Grundgedanken vom *Groben zum Detail* bildet sich ein durchgängiges Top-Down-Vorgehen aus. Mittels *Denken in Varianten* wird sichergestellt, dass verschiedene Lösungsmöglichkeiten in Form von Konzepten beleuchtet werden. Der *Phasenablauf* garantiert eine zeitliche Abfolge der Einzelschritte der Systementwicklung. Der *Problemlösungszyklus* ist ein Vorgehen, das beim Lösen von Problemen unterstützt.

Der **Problemlösungsprozess** ist in zwei Teile untergliedert. Das *Projektmanagement* stellt den organisatorischen Rahmen zur Problemlösung bereit. Hierunter fallen verschiedene koordinierende Aufgaben wie das Aufstellen der organisatorischen Struktur, Durchführen von Auftragsverhandlung etc. Das Erarbeiten von inhaltlichen Lösungen geschieht in der *Systemgestaltung*. Eines der Ergebnisse ist eine fachdisziplinübergreifende Systemarchitektur.

¹⁰ Aspekte stellen durch gezieltes Anzeigen oder Verbergen von Modellinhalten eine gewünschte Sichtweise auf das Modell dar [Neg06].

2.3.3 Anwenderabhängigkeit beim Einsatz von Systems Engineering Methoden

GAUSEMEIER und ALBERS beschreiben mehrere Barrieren bei der systemorientierten Produktentstehung:

„Es wird fachdisziplinenorientiert und nicht ganzheitlich gedacht; bereits erarbeitetes Wissen ist nicht ohne Weiteres verfügbar; es mangelt an interdisziplinär ausgebildeten Ingenieuren; der Transfer von Forschungsergebnissen in die industrielle Praxis gelingt nur teilweise; die zur Verfügung stehenden Methoden und Entwicklungswerkzeuge sind nur unzureichend in den Produktentstehungsprozess integriert.“
[AG12]

Die größte Herausforderung beim industriellen Einsatz von Systems Engineering und dessen Methoden besteht folglich darin, dass das Wissen (fachdisziplinspezifisch) des einzelnen Entwicklers angeleitet (Prozess und Methoden) in einer ganzheitlichen Systembetrachtung dokumentiert wird (Externalisierung von Wissen). Dies wird in den etablierten Systems Engineering Ansätzen durch die Rolle des Systems Engineers oder Systems Engineering Experten umgesetzt.

Folglich ist es unerlässlich, um Systems Engineering Methoden in der industriellen Praxis zu etablieren und anzuwenden, einen Fachexperten in diesem Bereich in das Entwicklungsteam zu integrieren. Diese Systems Engineering Experten unterstützen durch geeignete Methoden und Prozesse die disziplinübergreifende Systementwicklung. Hierbei ist die Erfahrung dieser Experten beim Einsatz von Systems Engineering entscheidend, da nur hierdurch eine hohe Güte der erarbeiteten Ergebnisse sichergestellt werden kann. Die INCOSE stellt beispielsweise verschiedene Zertifizierungsstufen für einen Systems Engineer bereit (Entry Level, Foundation Level, Senior Level).

Bei der seit den späten 1990ern stark steigenden Anzahl von komplexen mechatronischen Systemen in den Automobilen, hätte ein gleichzeitiger Aufbau dieser Fachexperten stattfinden müssen. Dies wurde seitens der Industrie nur unzureichend durchgeführt. Die Rolle Systems Engineer ist in der Automobilindustrie auf OEM-Ebene teils unbekannt.

Aus diesen Gründen ist ein rein auf Expertentum gestützter Einsatz von Systems Engineering in der industriellen Praxis nicht kurzfristig und flächendeckend umsetzbar. Die Methoden und Vorgehensweisen des Systems Engineering müssen daher allgemein verständlich und einsetzbar ausgelegt werden.

2.3.4 Entwicklungsvorgehen in der Automobilentwicklung

Im Folgenden wird zunächst auf den Entwicklungsgegenstand der mechatronischen Systeme im Automobilbau eingegangen. Anschließend wird der Gesamt-

Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie mit seinen unterschiedlichen Ausprägungen erläutert. Abschließend werden die drei Phasen der Automobilentwicklung und deren beteiligte Rollen vorgestellt.

2.3.4.1 Mechatronik im Automobilbau

Die Automobilindustrie ist durch eine zunehmende Mechatronisierung der Systeme im Fahrzeug gekennzeichnet [Sch03]. Durch eine enge Verzahnung von Mechanik, Elektronik und Software werden neue kundenerlebbare Funktionen realisiert. Diese Funktionen müssen den stetig steigenden Wünschen der Kunden nach Sicherheit, Effizienz und Komfort gerecht werden. Neben den Ansprüchen der Kunden ergeben sich durch zunehmende Anforderungen seitens der Gesetzgeber und Zulassungsbehörden weltweit neue und komplexe Anforderungen an die mechatronischen Systeme im Automobil.

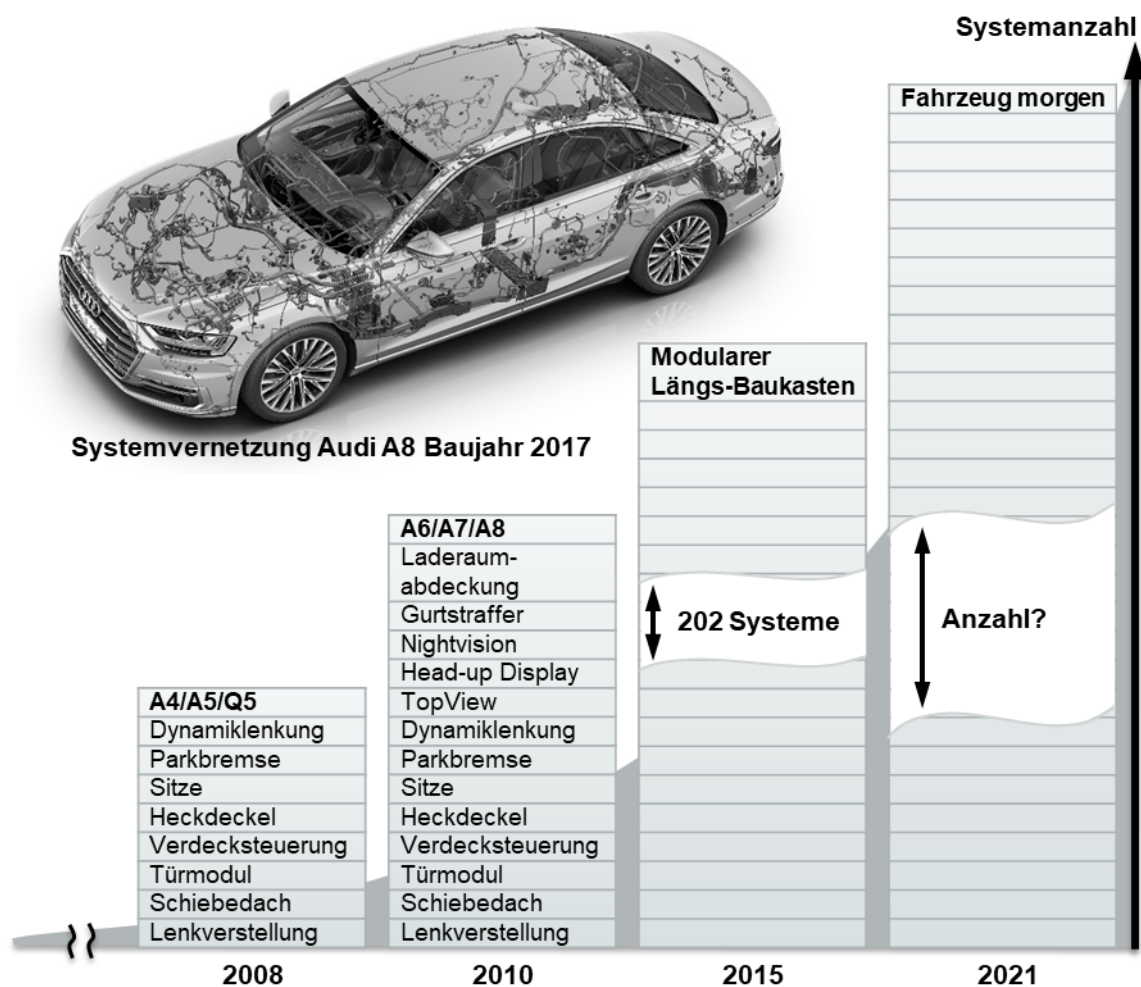


Bild 2-5: Entwicklung der Anzahl mechatronischer Systeme in der Automobilindustrie am Beispiel der AUDI AG

In modernen Fahrzeugen lassen sich über 200 mechatronische Systeme identifizieren (Bild 2-5). Diese Systeme sind von unterschiedlicher Komplexität und über alle Klassen

der mechatronischen Systeme verteilt (vgl. Kapitel 2.2.2). Systeme der Klasse 1 befinden sich unter anderem in Türsteuergeräten oder Antennensystemen. Bestehende Systeme werden durch die zunehmende räumliche Integration optimiert. Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhältnis finden sich vornehmlich im Fahrwerkbereich. Moderne Achssysteme adaptieren sich beispielsweise nahtlos an die Gegebenheiten des Untergrundes und der Reifen. Dies kann nur durch neue und hochkomplexe Regelalgorithmen realisiert werden. Die Systeme der Klasse 3 finden sich ebenfalls in heutigen Automobilen. Moderne Motorsteuergeräte sind Systeme dieser Klasse. Durch das aktuelle Bestreben in Richtung autonomes Fahren nimmt deren Anzahl stetig zu. Nur die Systeme der Klasse 3 ermöglichen dies. Ein Fahrerassistenzsystem muss sich an verändernde Umgebungsbedingungen adaptieren. Dies muss das System sowohl vorrausschauend als auch robust vollziehen. Die Benutzungsfreundlichkeit ist ein zusätzliches Charakteristikum moderner Fahrerassistenzsysteme. Um den Fahrer eines Fahrzeuges bei Eingriffen ins Fahrverhalten nicht zu verunsichern und eine eventuelle Fehlreaktion zu provozieren, muss sich ein solches System an das Benutzerverhalten adaptieren. Insbesondere muss das Verhalten des Systems für einen Benutzer durchweg transparent sein. Nur durch die Integration einer Adaptierbarkeit an das Benutzerverhalten in die Regelung eines mechatronischen Systems der Klasse 3 ist eine unterstützende Wirkung realisierbar.

Ein weiterer Trend in der Automobilindustrie und eine zusätzliche Herausforderung ist die durchgängige Vernetzung eines Fahrzeuges mit der Umwelt. Hieraus ergeben sich neue Möglichkeiten für kundenrelevante Funktionen. Neue und zunehmend komplexere mechatronische Systeme in einem Fahrzeug sind nötig, um diese Funktionen robust zu realisieren. Diese setzen neueste und (in der Automobilindustrie) unbekannte Technologien ein. Nur durch eine durchgängige Anforderungserfassung vom Gesamtsystem über dessen Subkomponenten bis hin zu Bauteilen und deren Technologien kann ein solches System entwickelt und abgesichert werden. Die Anforderungen müssen hierzu disziplinübergreifend sein und frühzeitig vollständig erfasst und spezifiziert sein.

2.3.4.2 Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie

Die Entwicklung moderner Fahrzeuge stellt eine komplexe Aufgabe dar. Diese Aufgabe kann durch eine konsequente Hierarchisierung und Partitionierung des Gesamtfahrzeuges beherrscht werden. Es wird ein Vorgehen angewandt, das sich in einer schrittweisen Detaillierung vom Groben zum Feinen hin ausdetailliert [SG08][Wal05]. Basierend auf den unternehmerischen Zielen und Werten werden zunächst Fahrzeuggrobkonzepte entwickelt. Diese Grobkonzepte orientieren sich an Kundenzielgruppen und Märkten. In der fortschreitenden Entwicklung werden diese Konzepte weiter ausdetailliert. Das Ergebnis dieses Konzeptionierungsprozesses sind Fahrzeugfeinkonzepte. Diese beinhalten unter anderem das Fahrzeugdesign inklusive verfügbarem Bauraum für Systeme und abzubildende Eigenschaften auf Gesamtfahrzeugebene.

Die Fahrzeugfeinkonzepte werden anschließend in die Fahrzeugentwicklung überführt. In dieser findet die Umsetzung der abzubildenden Eigenschaften und Anforderungen durch real existierende Systeme und Fahrzeuge statt. Die Fahrzeugentwicklung ist abgeschlossen, sobald das Gesamtfahrzeug und dessen Systeme abgesichert sind und die Produktion von Fahrzeugen anläuft. Die Serienentwicklung erstreckt sich über eine Zeitdauer von 2 Jahren [BS13].

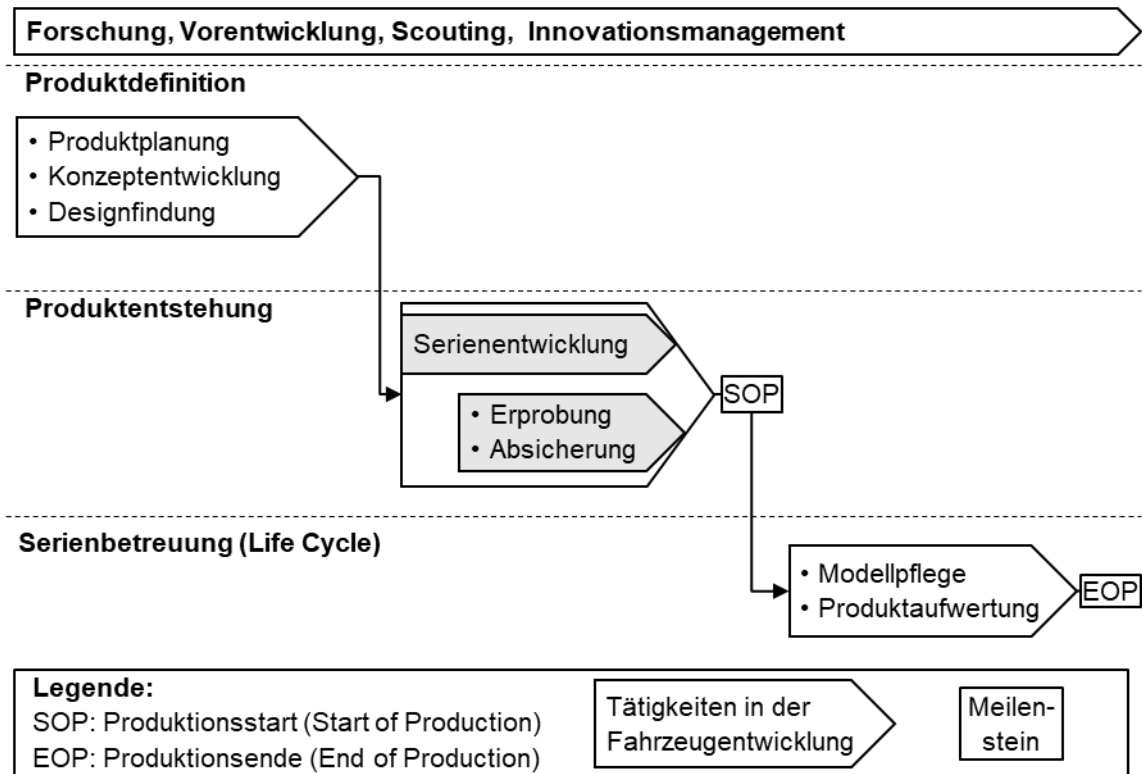


Bild 2-6: Produktentstehungsprozess: Von der Forschung bis zur Serienbetreuung [BS13]

Die gesamte Fahrzeugserienentwicklung von der Konzeption hin zum Produktionsstart wird in einem übergeordneten Prozess abgebildet, dem sogenannten Produktentstehungsprozess (PEP) (Bild 2-6). Dieser Prozess ist meilensteingesteuert und synchronisiert die Fahrzeugserienentwicklung über alle beteiligten Fachbereiche.

Neben der im PEP definierten Fahrzeugentwicklung gibt es prozessunabhängige Tätigkeiten. Zu diesen zählen unter anderem das Innovationsmanagement, die Forschung und die Vorentwicklung.

2.3.4.3 Vor- und Serienentwicklung

Die Entwicklung von mechatronischen Systemen im Automobil kann in zwei unterschiedliche Prozesse unterteilt werden. Ziel der Serienentwicklung ist Konzeptionierung, Entwicklung und Absicherung eines mechatronischen Systems für ein spezifisches Serien-Fahrzeug. Daher ist die Serienentwicklung in den Idealprozess dem PEP eingebettet.

Die Vorentwicklung ist produktentstehungsprozessunabhängig. Ziel der Vorentwicklung ist die Entwicklung technischer Konzepte. Die Vorentwicklung übernimmt hierfür Erkenntnisse aus der Forschung und setzt diese in ersten Funktionsmustern um. Diese Funktionsmuster sind bezüglich ihrer Kosten und Robustheit nicht für die Serieneinsatz geeignet. Zudem sind die vorentwickelten Systeme fahrzeugunabhängig¹¹. Die Funktionsmuster und Erkenntnisse der Vorentwicklung werden anschließend in die Serienentwicklung überführt. Hierbei werden aus den fahrzeugunabhängigen Lösungskonzepten fahrzeugspezifische Systeme entwickelt.

Die Vor- und Serienentwicklung unterscheidet sich auch in der Entwicklungsstruktur und der Einbeziehung von Lieferanten. Ist in der Vorentwicklung ein Lieferant meist reiner Entwicklungsdienstleister, wird in der Serienentwicklung ein Lieferant neben der Entwicklungsdienstleistung auch zum Produzenten und Zulieferer eines Systems oder einer Komponente für einen OEM.

2.3.4.4 Lieferanten/OEM – Struktur und Entwicklungsszenarien

In der Entwicklung von mechatronischen Systemen in der Automobilindustrie lassen sich verschiedene Entwicklungsszenarien unterscheiden. Diese sind davon abhängig, wie und wann ein Lieferant in die Entwicklung integriert wird und was sein konkreter Entwicklungsauftrag ist. Es lassen sich insgesamt drei Szenarien unterscheiden: der Systemlieferant, der OEM als Systemintegrator und die Eigenentwicklung eines OEM. Die einzelnen Szenarien lassen sich mit Hilfe des V-Modells¹² [VDI2206] übersichtlich darstellen. Neben den Entwicklungsszenarien wird die Modulbaukastenentwicklung erläutert

2.3.4.5 Der Systemlieferant

Von einem Systemlieferanten wird gesprochen, wenn ein Lieferant einen Entwicklungsauftrag für ein komplettes mechatronisches System hat (Bild 2-7). Hierzu werden vom OEM auf Systemebene Anforderungen spezifiziert und dokumentiert. Dieses Lastenheft beschreibt eine Black-Box¹³ eines mechatronischen Systems. Die Systemauslegung und die Anforderungsdekomposition in die Bauteilebene und Fachdisziplinen obliegen dem

¹¹ Fahrzeugunabhängig bedeutet, dass die Systeme nicht für ein spezifisches Fahrzeug und dessen Anforderungen entwickelt wurden. Diese Anforderungen sind unter anderem verfügbarer Bauraum und Kommunikations-/Busstruktur.

¹² Das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 wird in dieser Arbeit erweitert. Es wird die Fahrzeugebene als oberste Ebene des V-Modells hinzugefügt.

¹³ Bei einer Black-Box-Betrachtung eines Systems werden die äußeren Schnittstellen und die nach außen sichtbaren Eigenschaften dargestellt. Ebenfalls finden sich Randbedingungen und Umgebungsumstände in dieser Betrachtung. Die genaue interne Struktur des Systems bleibt verborgen [Fra09].

Systemlieferanten. Der Systemlieferant kann seinerseits wieder Unterlieferanten für die disziplinspezifische Entwicklung beauftragen.

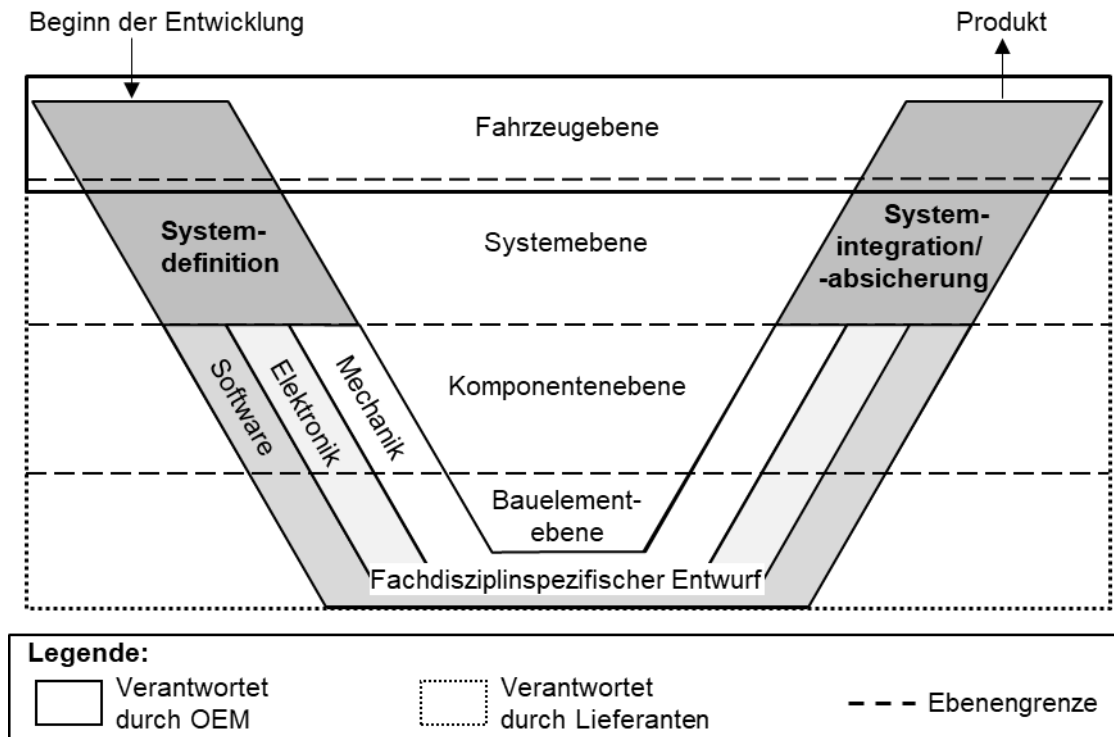


Bild 2-7: Ebenen der Systementwicklung in der Automobilindustrie und deren Verantwortlichkeiten am Beispiel Systemlieferant

Am Ende der Entwicklung erhält der OEM ein fertig abgesichertes und funktionierendes mechatronisches Gesamtsystem, das ins Gesamtfahrzeug integriert und appliziert wird.

2.3.4.6 Der OEM als Systemintegrator

Befindet sich ein OEM in der Rolle eines Systemintegrators, müssen die Systemauslegung und Anforderungsdekomposition beim OEM stattfinden. Für die Entwicklung in den einzelnen Fachdisziplinen werden meist mehrere Lieferanten beauftragt (Bild 2-8). Die Beauftragung erfolgt mittels Komponentenlastenheften. In diesen sind die Anforderungen des Gesamtsystems auf einzelne Komponenten oder Disziplinen dekomponiert. Für ein System entstehen so mehrere Komponentenlastenhefte. Basierend hierauf entwickeln die Lieferanten einzelne Komponenten. Am Ende der Entwicklung enthält der OEM einzeln abgesicherte Komponenten. Diese werden vom OEM zum Gesamtsystem und anschließend ins Fahrzeug integriert. Dieses Entwicklungsszenario nimmt mit der steigenden Häufigkeit der Modulbaukastenentwicklung eine zunehmend dominierende Rolle ein. Bereits entwickelte Komponenten oder Disziplinteillösungen des Baukastens werden mit Neuentwicklungen zu einem mechatronischen Gesamtsystem kombiniert.

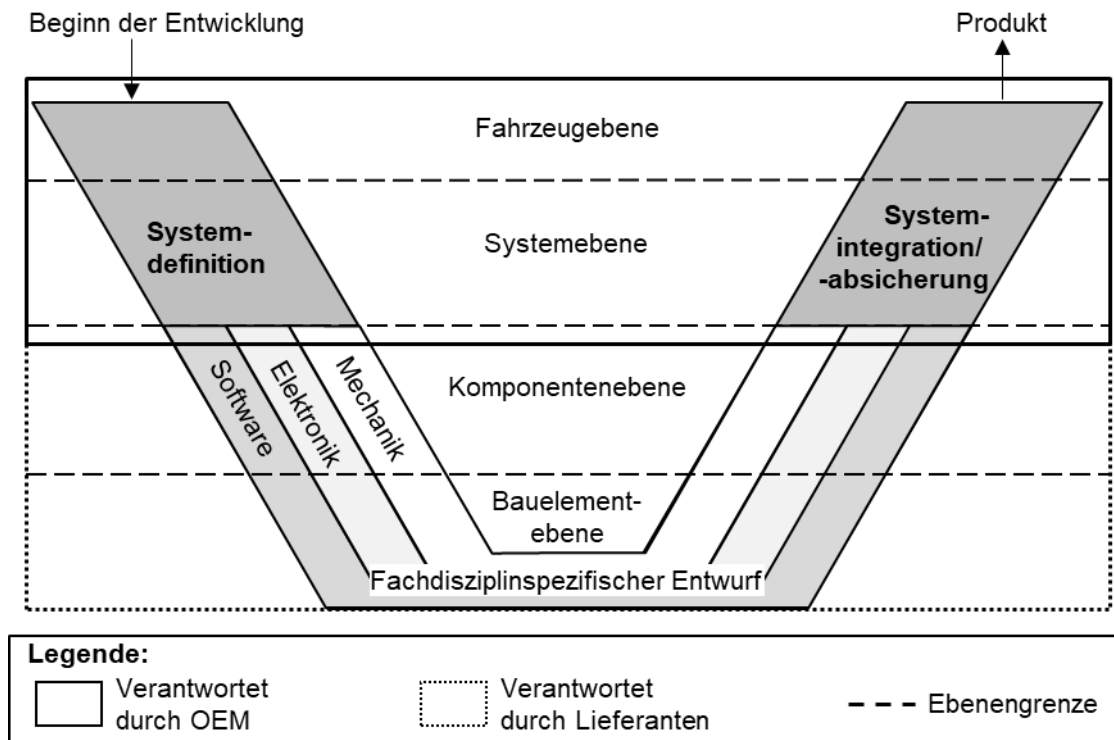


Bild 2-8: Ebenen der Systementwicklung in der Automobilindustrie und deren Verantwortlichkeiten am Beispiel OEM als Systemintegrator

2.3.4.7 Eigenentwicklung eines OEM

Von der Eigenentwicklung eines OEM wird gesprochen, wenn er die Entwicklung vom System bis hin zu allen oder einzelnen Disziplinen oder Komponenten selbst durchführt. Die Informatik ist die Fachdisziplin, die am häufigsten von einem OEM selbst umgesetzt wird. Hierbei kommen die Elektronik und die Mechanik weiterhin von Zulieferern [Rei08]. Auch Systeme von Fahrzeugkleinserien wie Sonderschutzfahrzeuge¹⁴ können beim OEM selbst entwickelt werden. Die Eigenentwicklung wird häufig vor dem Hintergrund des Know-how-Schutzes und der Entwicklung von Innovationen als Szenario gewählt.

2.3.4.8 Modulbaukastenentwicklung

Mechatronische Systeme werden heutzutage aufgrund der steigenden Variantenvielfalt und aus Kostengründen für sogenannte modulare Fahrzeugbaukästen entwickelt. Dies bedeutet, dass alle Marken eines Automobilkonzerns die Systeme in ihre Fahrzeuge integrieren können müssen.

¹⁴ Sonderschutzfahrzeuge sind Fahrzeuge, die durch eine Panzerung oder Sicherheitseinrichtungen die Insassen oder die Ladung vor Angriffen schützen.

In Verbindung mit dem Szenario Systemlieferant ergibt sich eine hierarchische Darstellung (Bild 2-9). Bei der Modulbaukastenentwicklung wird eine Marke eines Automobilkonzerns zum Leadentwickler. Diese Marke verantwortet die Systementwicklung auf OEM-Seite. Neben der vertikalen Anforderungsumsetzung in der Lieferantenebene lässt sich eine weitere Ebene, die sogenannte horizontale Anforderungserfassung, identifizieren. In dieser Ebene ist der Haupt- oder Leadentwickler dafür verantwortlich, sämtliche Anforderungen der späteren System- und Modulnutzer zu erfassen, zu konsolidieren und in einem Lastenheft an einen Systemlieferanten zu dokumentieren.

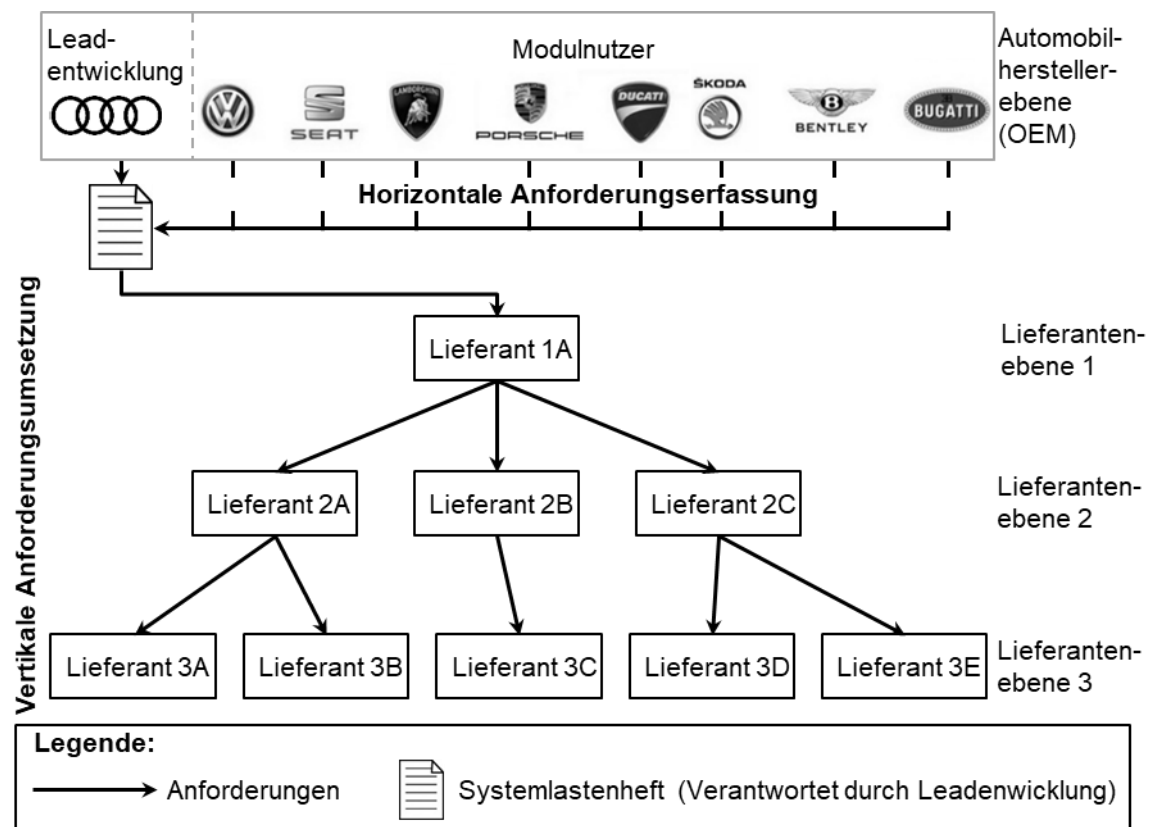


Bild 2-9: Modulbaukastenentwicklung am Beispiel Entwicklung Modularer Längsbaukasten der Volkswagen AG und den angeschlossenen Marken

Dem hohen Nutzen der Modulbaukastenentwicklung stehen unternehmerische Risiken gegenüber. Diese ergeben sich aus der erhöhten Verbauhäufigkeit eines Systems. Der Ausfall eines solchen Systems würde eine Vielzahl von Fahrzeugen betreffen. Ein solcher Systemausfall kann aus einer fehlerhaften Auslegung oder der Entwicklung gegen falsche Anforderungen resultieren.

2.3.5 Darstellung des Gesamtprozesses mit den Entwicklungsphasen Systemdefinition, -entwicklung und -integration

Der gesamte Produktentstehungsprozess in der Automobilentwicklung kann anhand der jeweiligen Hauptaufgaben und Ergebnisse in drei Phasen unterteilt werden. Diese Phasen lassen sich in das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] einordnen. Die drei Phasen sind Systemdefinition, Komponenten-/Bauelemententwicklung und Systemintegration und -absicherung (Bild 2-10). Die Phasen sind unabhängig von den in Kapitel 2.3.4.4 aufgeführten Entwicklungsszenarien. Im Rahmen dieser Arbeit ist ausschließlich die Phase der Systemdefinition relevant. Die anderen beiden Phasen Systementwicklung und Systemintegration werden nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, um ein Gesamtbild des Entwicklungsvorgehens zu geben.

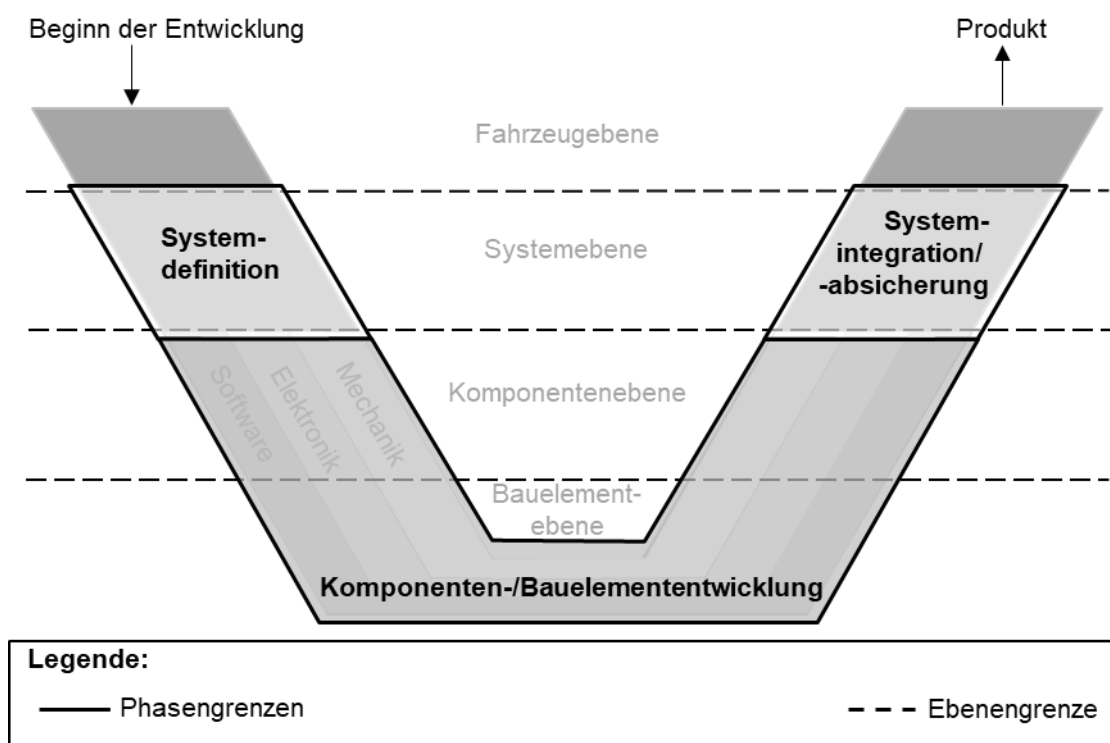


Bild 2-10: Entwicklungsphasen in der Automobilentwicklung

2.3.5.1 Systemdefinition

In der Phase Systemdefinition müssen alle Anforderungen an ein System erarbeitet und dokumentiert werden. Die Phase überlappt mit der Komponentenebene, da die Systemanforderungen in die Subkomponenten und Disziplinen abgeleitet werden müssen. Die Systemdefinition endet mit der Dokumentation der Anforderungen in Form von Lastenheften.

Aus der Fahrzeugebene werden übergeordnete Anforderungen in meist nicht-technischer Form an die Entwicklung übergeben. Diese Anforderungen sind aus dem Bereich Marketing, Vertrieb und Fahrzeugkonzept. Die Anforderungen liegen in Form von User

Stories¹⁵ und Gesamtfahrzeugeigenschaften, wie beispielsweise Beschleunigungsverhalten, vor. Am Ende der Phase müssen diese in konkrete technische Anforderungen mittels eines grundlegenden und interdisziplinären Systemkonzeptes umgewandelt sein. Zur Gewinnung weiterer Anforderungen müssen alle relevanten Stakeholder in die Systemdefinition mit einbezogen werden. Je nach Entwicklungsszenarios (vgl. Kapitel 2.3.4.4) ist es die Aufgabe des OEM oder eines Lieferanten, diese Anforderungen zu dekomponieren und in Form von Komponentenlastenheften zu dokumentieren.

2.3.5.2 Systementwicklung

Das Ergebnis der Systementwicklung sind Komponenten und Einzeldisziplinlösungen. Diese sind für sich jeweils einzeln abgesichert. Die Entwicklung erfolgt in verteilten Teams über mehrere Unternehmen und Standorte hinweg. Je nach Entwicklungsszenario hat entweder der OEM oder ein Systemlieferant die zentrale Verantwortung für die Entwicklung und muss sämtliche Lieferanten und Unterlieferanten aussteuern.

Die Entwicklung durchläuft mehrere Musterphasen. In jeder der Musterphasen steigt der Reifegrad des Entwicklungsgegenstandes. Zudem sieht der idealtypische Produktentwicklungsprozess mehrere Meilensteine für die Einzeldisziplinen vor. Durch diese Meilensteine wird eine Steuerung und Überwachung der Entwicklung angestrebt.

2.3.5.3 Systemintegration und -absicherung

Unter Integration wird das Vereinen der Lösungen der Fachdisziplinen oder von mehreren Komponenten zu einem Gesamtsystemkontext verstanden. Dieses Gesamtsystem realisiert eine oder mehrere kundenrelevante Funktionen. Die Verantwortung für die Realisierung der Funktionen liegt je nach Entwicklungsszenario bei einem OEM oder einem Systemlieferanten.

Nach Abschluss der Systemintegration und -absicherung liegt ein System vor, das innerhalb seines Umfeldes seine Funktionen und spezifizierten Anforderungen erfüllt. Das Umfeld des Systems ist hierbei in erster Linie das Gesamtfahrzeug.

In dieser Phase werden mehrere Test- und Absicherungsfraktionen eingesetzt. Diese reichen von Systemtest-HILs¹⁶ und Systemprüfständen über Vernetzungs-HILs bis hin zur Gesamtfahrzeugerprobung. Der gesamte Absicherungsprozess wird über Freigaben gesteuert. Diese Freigaben dokumentieren die erfolgreiche Testerfüllung auf mehreren

¹⁵ User Stories sind Anwendungsfälle durch einen Benutzer. Diese sind situativ und stellen einen Weg durch einen Use Case (vgl. Kapitel 4.3) dar. [AM04].

¹⁶ Ein HIL ist ein Hardware-in-the-Loop-Prüfstand. An einem solchen Prüfstand werden die funktionalen Anforderungen einzelner oder mehrerer vernetzte Systeme automatisiert abgesichert.

Ebenen. Angefangen von Robustheits- und Funktionstests auf Komponenten und Systemebene bis hin zu Vernetzungs- und Belastungstests¹⁷ auf Gesamtfahrzeugebene. Die Gesamtheit aller Systemfreigaben erbringt den Nachweis der korrekten Funktionsweise des Gesamtfahrzeuges gegenüber Gesetzgebern und Zulassungsbehörden.

2.3.6 Rollen in der Automobil-Systementwicklung

Für die Entwicklung von mechatronischen Systemen in der Automobilbranche werden mehrere entwicklungsbegleitende Rollen benötigt. Diese werden im Folgenden vorgestellt und bezüglich ihrer Umsetzung und Verfügbarkeit bewertet. Die hier vorgestellten Rollen sind die zentralen Rollen der Entwicklung. Darüber hinaus existieren weitere Rollen mit steuerndem und administrativem Aufgabenfokus.

2.3.6.1 Systemarchitekt

Der Systemarchitekt ist verantwortlich für die disziplinübergreifende Architektur eines Systems und übersetzt die Anforderungen eines Produktmanagers in konkrete messbare Zielindikatoren [MT14]. Zudem verwaltet er die Systemarchitektur. Die Erstellung erfolgt durch Einbindung aller Projektbeteiligten. Durch gezielten Einsatz von Methoden des Entscheidungsmanagements entsteht die optimale Auslegung des Systems. Basierend auf der Architektur werden Analysen und Ableitungen durchgeführt. Dies können unter anderem die Identifikation von Systemvarianten oder eine Risikoanalyse sein. [Ber95]. Der Systemarchitekt besitzt ausgeprägte Kompetenzen in den Bereichen methodische Produktentwicklung, modellbasierte Systemauslegung und Systems Engineering.

Der Systemarchitekt wird in der Automobilbranche als neue und notwendige Rolle gesehen [Sch13]. Diese Rolle wird benötigt, da die Entwicklungsdisziplinen sich weiter vernetzen und die Komplexität der Systeme in modernen Fahrzeugen zunehmend ansteigt. Eine flächendeckende Etablierung dieser Rolle in der Automobilindustrie und hier insbesondere bei den OEMs ist jedoch nicht der Fall.

2.3.6.2 Anforderungsmanager

Der Anforderungsmanager erstellt und verwaltet sämtliche Anforderungen an ein mechatronisches System. Hierzu bindet er sämtliche Stakeholder ein und erarbeitet über verschiedene Ermittlungstechniken die Anforderungen. Diese werden anschließend durch den Anforderungsmanager dokumentiert und den relevanten Nutzern und Entwicklern zur Verfügung gestellt. Die Dokumentation erfolgt in Form von Lastenheften. Die

¹⁷ Belastungstests werden im Kontext Gesamtfahrzeug durchgeführt. Sämtliche Systeme werden mit verschiedenen Belastungsarten, wie Über- oder Unterspannung oder einer erhöhten Buslast beaufschlagt.

Qualität und Güte der Anforderungen wird durch den Anforderungsmanager sichergestellt und gewährleistet.

Die Rolle des Anforderungsmanagers findet sich in der Automobilbranche nicht durchgängig. Auf Fahrzeugebene ist diese vorhanden und erarbeitet basierend auf den Stakeholderbedürfnissen ein Gesamtfahrzeuglastenheft. Im Bereich der System- und Komponentenentwicklung fällt die Rolle des Anforderungsmanagers meistens den System- oder Komponentenverantwortlichen zu.

2.3.6.3 Sicherheitsingenieur

Der Sicherheitsingenieur ist verantwortlich für die Auslegung und Entwicklung eines mechatronischen Systems vor dem Hintergrund der gesetzlich geforderten Sicherheitsrichtlinien. Die für ihn hauptrelevante Norm ist die ISO26262 zur funktionalen Sicherheit im Automobil [ISO26262]. Die Sicherheit bezieht sich hier auf die Betriebssicherheit eines Fahrzeuges und bedeutet in diesem Zusammenhang die Freiheit von unvermeidbaren Risiken [Hil12].

Zur Erreichung dieses Zieles wird frühzeitig im Systemauslegungs- und Entwicklungsprozess eine Gefahren- und Risikoanalyse durch den Sicherheitsingenieur durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analyse ist eine Einstufung des Systems in sogenannte ASIL-Level¹⁸. Nach Einstufung des Systems setzt der Sicherheitsingenieur Methoden aus dem Bereich der Sicherheitsanalyse ein. Die gebräuchlichsten Methoden sind die FTA¹⁹ und die FMEA²⁰. Das Ergebnis der Sicherheitsanalysemethoden sind mögliche Fehlerfälle im System. Diese sind bewertet nach ihrer Kritikalität und werden durch eine Anpassung der Systemauslegung minimiert.

Der Sicherheitsingenieur ist in der Automobilbranche durchgängig vertreten und an der Entwicklung jedes sicherheitskritischen Systems beteiligt. Dies ist in Normen und Gesetzanforderungen wie beispielsweise der ISO26262 als zulassungsrelevant gefordert. Bei schwerwiegenden Fehlern oder einem technischen Defekt im Serieneinsatz eines Fahrzeuges kann der Gesetzgeber die Einsicht in die erstellte Sicherheitsanalyse beim OEM und dessen Lieferanten einfordern.

¹⁸ Der sogenannte ASIL-Level (engl. Automotive Safety Integrity Level) stellt eine Matrix zur Bewertung eines Systems bezüglich Ausfallwahrscheinlichkeit und Fehlerfolge dar. [IEC61508]

¹⁹ Eine FTA ist eine sogenannte Fehlerbaumanalyse (engl.: Fault Tree Analysis). Ausgehend von einer Systemfehlfunktion werden mögliche Fehlerursachen hierarchisch erfasst und mit Wahrscheinlichkeiten versehen [DIN25424].

²⁰ Die FMEA (engl.: Failure Mode and Effects Analysis) untersucht Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen. Diese werden mittels einer System- und Funktionsstruktur zu einzelnen Bauteilen verknüpft. Durch eine Risikobewertung lassen sich die einzelnen Fehler qualitativ bewerten. [VDA06]

2.3.6.4 Testmanager

Der Testmanager erstellt auf Grundlage der Anforderungen die Testfälle für ein System und dessen Komponenten, überwacht die Durchführung der Tests und dokumentiert die Ergebnisse. Durch die Tests wird sichergestellt, dass das System alle geforderten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen erfüllt.

Durch die Vielzahl der Testfraktionen in der Automobilentwicklung gibt es viele bereichsindividuelle Testmanager. Ein übergeordneter Testmanager, der alle Testfraktionen koordiniert, findet sich hingegen selten. Dies birgt die Gefahr von Testredundanzen und Testlücken. Einen Überblick über die Vielzahl an Testfraktionen und Testumgebungen liefert die Testlandkarte des Volkswagenkonzerns (Bild 2-11).

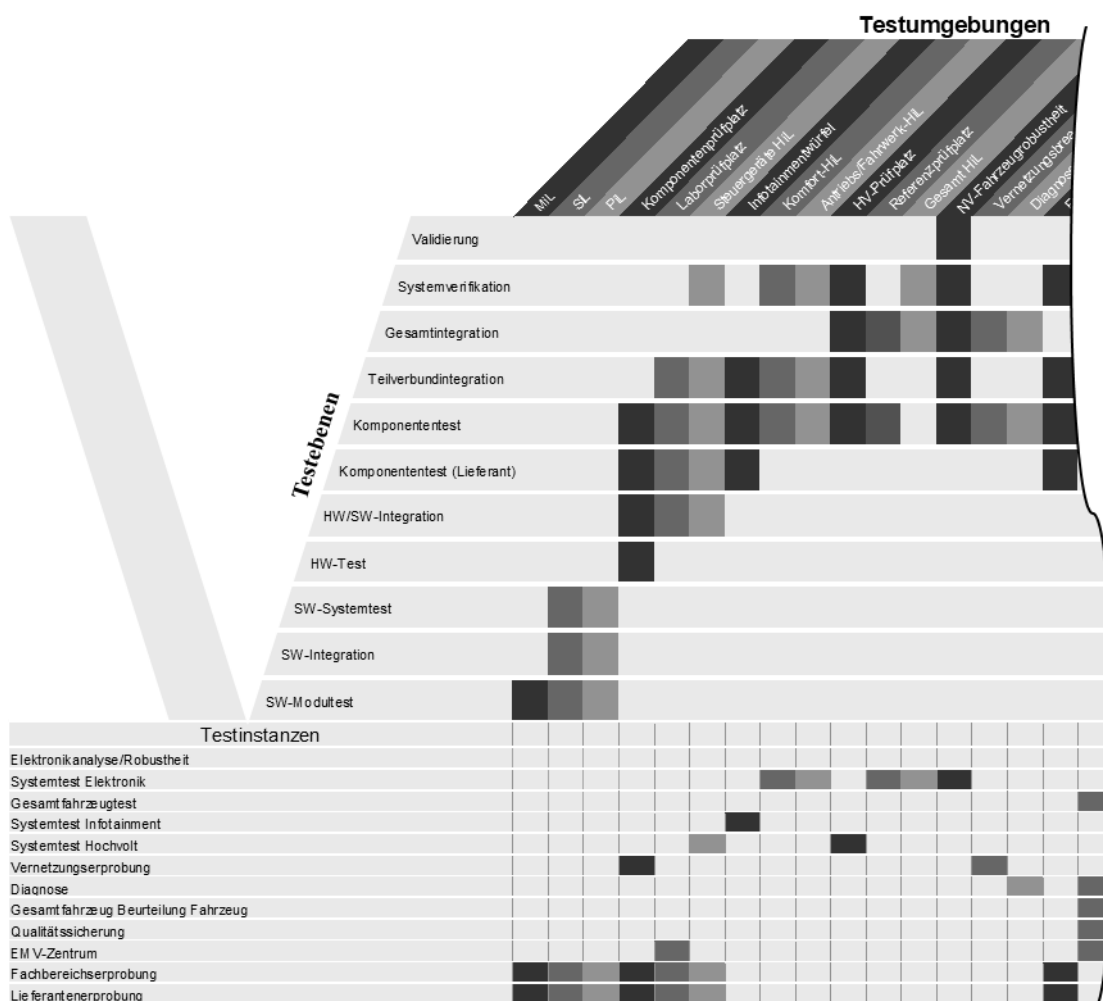


Bild 2-11: Testlandkarte der Volkswagen AG (vollständige Abbildung im Anhang A1)

2.3.6.5 Bauteilverantwortliche

Der Bauteilverantwortliche ist eine zentrale Rolle in der Automobilentwicklung. Neben dem Vertreten des Bauteils oder einer Komponente nach außen ist er verantwortlich für

die Umsetzung des Entwicklungsgegenstandes hinsichtlich Terminen, Kosten, Qualität und kundenerlebbaren Eigenschaften und Anforderungen. Hierfür ist er zentraler Ansprechpartner seitens des OEMs für die entwickelnden Lieferanten. Häufig werden weitere Rollen im Bauteilverantwortlichen vereint. Diese sind der Anforderungsmanager und der Testmanager. Die Verantwortungen erweitern sich um das Schreiben von Anforderungen in Form eines Lastenheftes und der Definition und Überwachung von funktionalen Tests.

Der Bauteilverantwortliche ist in der Automobilindustrie flächendeckend vertreten. Die häufige Verknüpfung der Rollen Anforderungsmanager, Bauteilverantwortlicher und Testmanager ist sehr kritisch zu sehen. Diese verknüpfte Rolle definiert die Anforderungen, entwickelt gegen diese und testet diese und bewertet somit die Umsetzung der Anforderungen.

2.3.6.6 Systemverantwortlicher

Die Rolle Systemverantwortlicher verantwortet das mechatronische System. Er hat einen technischen Fokus und präsentiert und vertritt das Gesamtsystem nach außen und innen. Er plant und verfolgt die Umsetzung des Entwicklungsgegenstandes hinsichtlich Terminen, Kosten, Qualität und kundenerlebbaren Eigenschaften und Anforderungen. Hierfür identifiziert er System-Projektrisiken, plant und steuert komponentenübergreifend Gegenmaßnahmen. Er koordiniert den Systemlieferanten und alle komponentenübergreifenden Aufgaben und Aktivitäten.

Eine idealtypische Besetzung der Rolle erfolgt in Form eines System Engineers. Dieser hat das Gesamtsystem und all dessen Schnittstellen im Blick [BVB12]. Zur Synchronisation aller Projektbeteiligten muss beim Systems Engineer zudem ein ausgeprägtes Kommunikationsvermögen vorhanden sein [KS03]

Die Rolle des Systemverantwortlichen ist in der Automobilindustrie nicht durchgängig etabliert. Wenn sie vorhanden ist, ist sie eine zumeist nicht eigenständige Rolle. Dies heißt, dass eine der projektbeteiligten Rollen, hierbei meist ein Bauteilverantwortlicher, zum Systemverantwortlichen benannt wird. Es können Konflikte dadurch entstehen, dass beide Rollen in einer Person vereint sind. Diese resultieren aus dem Widerspruch einer komponentenzentrierten Sicht und Verantwortung und einer übergreifenden Aufgabe, das System und all seine Subkomponenten zu überblicken und gesamtsystemische Probleme zu lösen. Eine nicht optimale Lösung für auftretende Probleme kann das Resultat sein. Darüber hinaus ist der zusätzliche Arbeitsaufwand, den die Rolle Systemverantwortlicher mit sich bringt, ohne strukturiertes Vorgehen in den Bereichen Systemauslegung, Risiko- und Reifegradmanagement nicht handhabbar.

2.4 Bedeutung von Anforderungen für mechatronische Systeme im Automobil und Bewertung des industriellen Stands der Technik in der Automobilindustrie

2.4.1 Bewertung der Entwicklungsphase Systemdefinition in der Automobilentwicklung und des Standard-Vorgehensmodells VDI-Richtlinie 2206

Eine im Jahr 2013 durchgeführte Studie mit dem Titel *Systems Engineering in der industriellen Praxis* verdeutlicht übergreifende Optimierungsmöglichkeiten, die den einzelnen Entwicklungsphasen zugeordnet werden können [GDS+13]. In dieser Studie wurden 32 Unternehmen befragt. Bei der Frage, welche Herausforderungen sich in der zukünftigen Produktentwicklung ergeben, antworteten 73 % der Unternehmen mit einer steigenden Interdisziplinarität. 33 % der Unternehmen sehen das Schnittstellenmanagement als Herausforderung und 30 % das Anforderungsmanagement. Zur Gewährleistung einer hoher Qualität und Effizienz der Produktentwicklung sehen 50 % der Unternehmen eine durchgängige Werkzeugkette und 43 % die Methodenkompetenz als Schlüsselfaktoren. Die Studie erfasste zudem die Einordnung der Themenfelder des Systems Engineering in den einzelnen Unternehmen. Eine Darstellung der Ergebnisse der befragten Unternehmen der Automobilbranche findet sich in Bild 2-12. Neben der frühzeitigen Integration des Produktionssystems sehen die Unternehmen das Anforderungsmanagement als sehr bedeutend an. Der Einsatz von Systems Engineering ist zudem nur möglich, wenn dieser an die Bedürfnisse der Entwicklung angepasst wird (Tailoring).

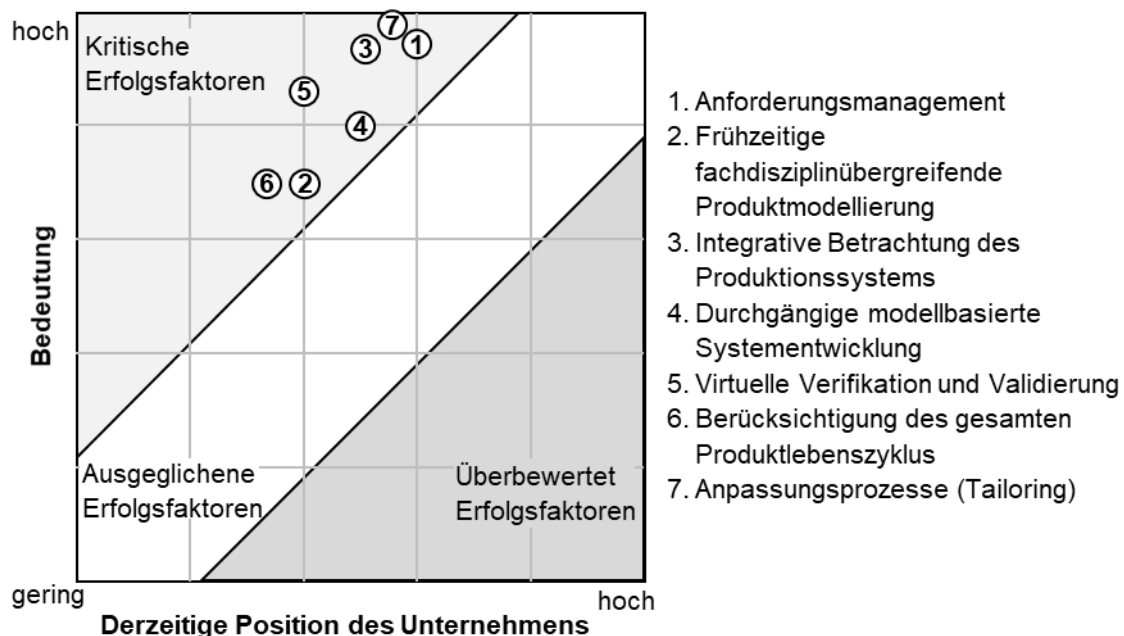


Bild 2-12: Systems Engineering in der Automobilbranche [GDS+13]

2.4.1.1 Bewertung der Phase Systemdefinition

Die in der Systemdefinitionsphase vorliegende Hauptaufgabe der Anforderungserarbeitung, -dekomposition und -dokumentation wird im Entwicklungsprozess von verschiedenen Sachverhalten beeinflusst. WEBER und WEISBROD geben eine Übersicht über Erfahrungen im Bereich Automobilentwicklung [WW03]:

- Die Automobilentwicklung ist zu komplex, um lediglich durch textuelle Anforderungen beherrscht zu werden:
Textuelle Anforderungen müssen, um der Entwicklung im Automobilbereich gerecht zu werden, mit verschiedensten Attributen versehen werden. Diese können zeitliche Aspekte aber auch Zustände der Anforderungen beschreiben. Hierbei ist es entscheidend, für jede Anforderung die richtigen Attribute auszuwählen. Zudem gibt es zwischen vielen Anforderungen Abhängigkeiten. Diese sind sehr häufig nur implizit vorhanden.
- Die Entwicklung im Automobilbereich ist sehr stark dokumentenzentriert:
Innerhalb von Unternehmen, aber auch unternehmensübergreifend, dienen Dokumente als Schnittstelle und zentrales Austauschelement. Dieser Fokus auf Dokumente ist nur durch ein übergreifendes Anforderungsmanagementtool beherrschbar.
- Es gibt keine klare Grenze zwischen Lastenheft eines OEMs und einem Pflichtenheft eines Zulieferers:
In einem Lastenheft werden die Anforderungen seitens eines OEMs an ein System beschrieben. Im sogenannten Pflichtenheft wird seitens des Zulieferers beschrieben, wie er ein System und dessen Bestandteile entwickeln will. In einem Lastenheft eines OEMs finden sich häufig Rahmenbedingungen oder lösungseinschränkende Anforderungen, die die Möglichkeiten für einen Zulieferer einschränken und Teil eines Pflichtenheftes sein sollten.
- Redundanzen und Inkonsistenzen:
Heutige mechatronische Systeme in einem Automobil werden häufig in über hundert voneinander abhängigen Dokumenten beschrieben und spezifiziert. Dies führt häufig zu dokumentenübergreifenden Abhängigkeiten, Redundanzen und Inkonsistenzen in der Spezifikation von Anforderungen.
- Evolutionäre Entwicklung im Automobilbereich:
Viele mechatronische Systeme in einem Fahrzeug werden von einer Fahrzeuggeneration zur nächsten lediglich weiterentwickelt. Dies führt dazu, dass der jeweilige Entwickler ein Fachexperte für ein solches System ist und meistens in einer sehr technischen Sichtweise auf Komponentenebene Anforderungen formuliert. Hierdurch sind solche Anforderungen nur schwer verständlich und es bedarf eines erhöhten Abstimmungsbedarfs in einer verteilten Entwicklung.

- **Fehlende Dokumentation von Anforderungen auf Systemebene:**
Anforderungen auf Systemebene werden häufig nur unzureichend oder gar nicht dokumentiert und spezifiziert. Lediglich Anforderungen auf Komponentenebene werden in Lastenheft abgebildet.
- **Mangel an disziplinspezifischen Sichten:**
Es gibt keine disziplinspezifischen Sichten auf die Anforderungen. Zudem ist an der Entwicklung eines mechatronischen Systems eine Vielzahl von verschiedenen Rollen beteiligt. Dies kann bei Änderungen von Anforderungen des mechatronischen Systems zu disziplinübergreifenden Inkonsistenzen führen.
- **Verteiltes Anforderungsmanagement:**
Die heutige Automobilentwicklung ist eine verteilte Entwicklung zwischen einem OEM und mehreren Lieferanten. Das Anforderungsmanagement sollte daher auch über verschiedene Lieferantenebenen hinweg ein durchgängiges Vorgehen abbilden.
- **Die Verknüpfung zwischen dokumentenzentriertem und modellbasiertem Entwicklungsvorgehen:**
Die dokumentenzentrierte und modellbasierte Entwicklung ist nicht miteinander verknüpft. Dies ist sowohl auf Tool-Ebene als auch im Gesamtverfahren nicht gegeben.

Aufgrund des Mangels einer konkreten (Teil-)Prozessbeschreibung der einzelnen Abläufe in dieser Phase ist die Anforderungserarbeitung und -dekomposition in der Praxis in hohem Maße durch Absprachen und Abstimmungen der einzelnen Projektmitarbeiter ausgeprägt [Rei14]. Der Erfolg bezüglich einer ausreichenden und richtigen Spezifikation aller benötigten Anforderungen ist folglich personenabhängig. Es kommt zu Überspezifikationen und Redundanzen (Bild 2-13).

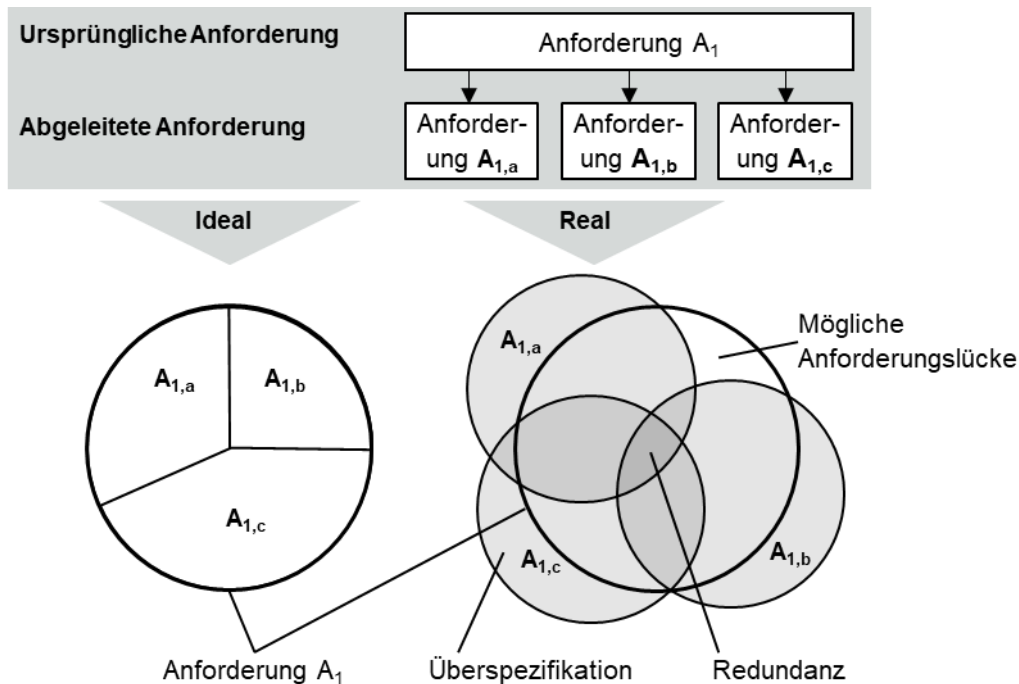


Bild 2-13: Schematische Darstellung der Überspezifikation und Redundanzen bei der Anforderungsdekomposition [BFH+12]

Durch diese Personen- und Erfahrungsabhängigkeit kann zudem nicht garantiert werden, dass immer die Anforderungen aller Stakeholder erfasst und dokumentiert werden. HANSELMANN beschreibt die Auswirkung dieser Problematik:

„Durch Branchenexperten der Automobilelektronik wurde in den letzten Jahren herausgefunden, dass zwischen 15 und 40 Prozent aller Softwarefehler, die bei der Serienüberführung von Steuergeräte-Funktionen gefunden wurden, ihre Ursache in unvollständigen und mehrdeutigen Spezifikationen hatten.“ [HAN03]

In der Praxis mangelt es an einem intuitiv einsetzbaren und ganzheitlichen Vorgehen zur Erfassung und Dekomposition von Anforderungen aller beteiligten Stakeholder. Hierzu zählt auch die Integration der Produktion und der Produktionssystemauslegung.

Die lückenlose Dokumentation der Anforderungen ist aufgrund des Vorhandenseins standardisierter Toollösungen, die unternehmensweit eingesetzt werden, durchgängig umgesetzt.

2.4.1.2 Bewertung des Standard-Vorgehensmodell VDI-Richtlinie 2206

Da die VDI-Richtlinie 2206 das Standard-Vorgehensmodell in der Entwicklung mechatronischer Systeme in der Automobilentwicklung ist, wird diese bezüglich der Bedarfe der frühzeitigen Anforderungserhebung bewertet. Die VDI2206 befasst sich mit Anforderungen an mehreren Stellen. Der Makrozyklus des V-Modells beginnt mit dem Vorhandensein und Abstrahieren einer Anforderungsliste. Diese wurde gestützt durch

Checklisten zur Ermittlung von Anforderungen erstellt [EKL07]. Eine solche Checkliste existiert für die Automobilentwicklung in ausreichender Form. Diese ist in der VDA-Norm „Automotive VDA-Standardstruktur Komponentenlastenheft“ [VDA07] definiert. In dieser erzeugt die vollständige Kapitelstruktur einen Überblick über alle möglichen Anforderungen an ein System oder eine Komponente im Fahrzeug. Trotz dieser sehr ausgereiften Checkliste sind die funktionalen Anforderungen an ein System im Automobil zu Beginn der Entwicklung weitestgehend unbekannt. Lediglich die nicht-funktionalen Anforderungen sind weitestgehend bekannt. Darüber hinaus werden Anforderungen in frühen Phasen durch die strategische Produktplanung oder das Marketing gestellt. Hierbei ist es schwierig und fehlerbehaftet aus den Anforderungen von Stakeholdern mit begrenztem technischem Fachwissen technische Anforderungen abzuleiten und diese in Form einer Funktionsarchitektur abzubilden. Zur Ableitung von technischen Anforderungen fehlt es in der VDI-Richtlinie 2206 an einer geeigneten Methode oder einem geeigneten Vorgehen, um die nicht-technischen Anforderungen strukturiert und methodisch in technische Anforderungen zu übersetzen. Aus diesen Gründen ist das Vorhandensein einer aussagekräftigen Anforderungsliste zu Beginn einer Entwicklung nicht gegeben.

Die VDI-Richtlinie 2206 stellt heraus, dass ein komplexes mechatronisches Produkt in mehreren aufeinanderfolgenden Makrozyklen entwickelt wird. Bei jedem dieser Durchläufe steigt neben der Reife des Systems auch die Anzahl der bekannten Anforderungen (Bild 2-14).

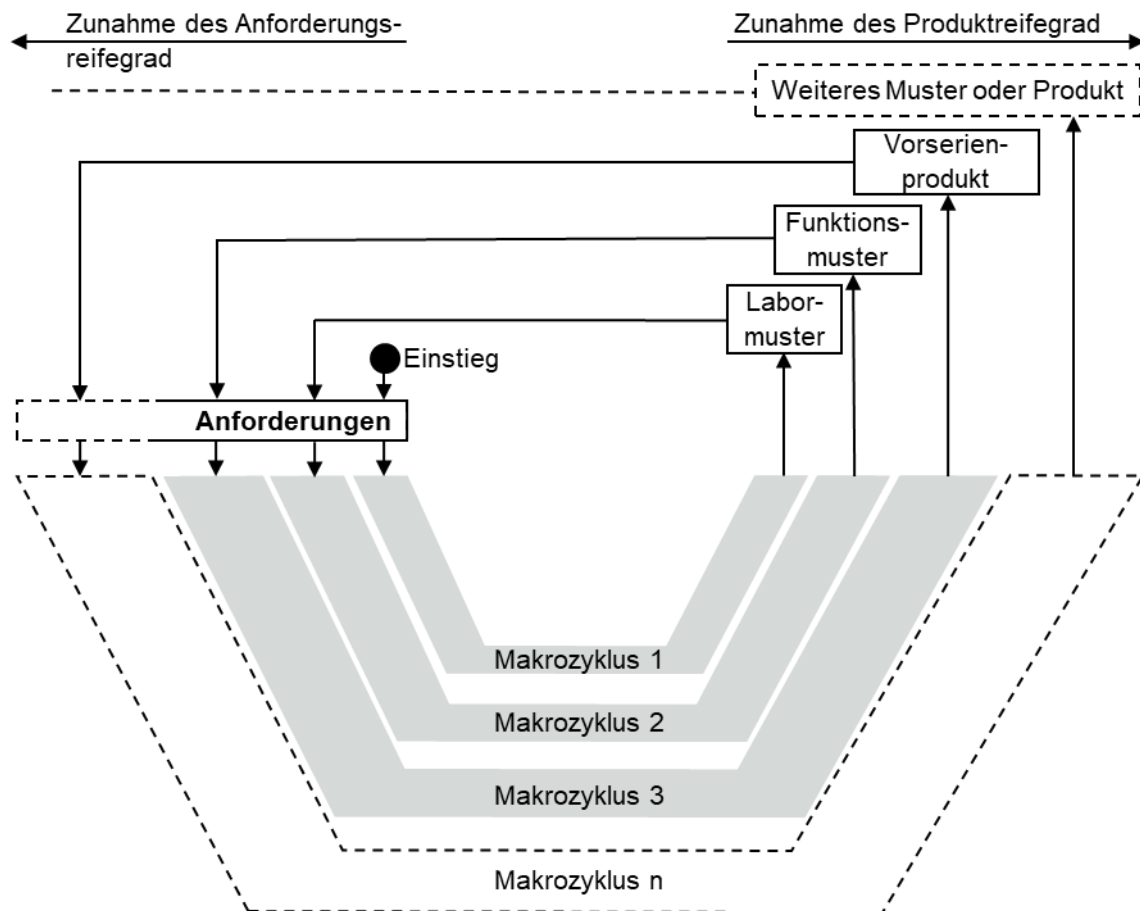


Bild 2-14: Durchlaufen mehrerer Makrozyklen mit zunehmender Produktreife [VDI2206]

Ein erster Durchlauf findet sich meist in der Vorentwicklung, deren Ergebnis ein Labor-muster ist. Die weiteren Makrozyklen und Musterphasen befinden sich in der Automobilentwicklung im Bereich der Serienentwicklung. Hierfür ist ein für die Serienentwicklung beauftragter Lieferant verantwortlich. Dieser wird aufgrund eines Lastenheftes vor der Serienentwicklung beauftragt. In diesem Vertragsdokument finden sich alle für das mechatronische System relevanten Anforderungen. Daher müssen in der Automobilentwicklung vor dem Durchlaufen mehrerer Makrozyklen bereits alle relevanten Anforderungen an ein System bekannt sein. Auch zur Fragestellung wie und wann Anforderungen der richtigen Granularität vorliegen und wie diese zu spezifizieren sind, enthält die VDI 2206 keine Richtlinien. Darüber hinaus fehlt es an Gütekriterien, die die Überprüfung der Durchführung der Einzelschritte erlauben.

Das Entwicklungsvorgehen nach VDI2206 besitzt insbesondere im Bereich der Anforderungen zusammenfassend analog der VDI-Richtlinie 2221 folgende Schwächen [Deu07]:

- Es handelt sich um eine „Allgemeinmethodik“, die stark auf die prinzipielle Lösungssuche ausgerichtet ist. Hilfestellungen für konkrete Produktgruppen oder Branchen fehlen.

- Die konstruktionsorientierten Vorgehensschritte weisen keine systematische Verknüpfung mit Kunden- oder Wettbewerbsdaten auf.
- Es erfolgt keine Kundenanforderungsmessung und keine systematische Übertragung in die Unternehmens- und Produktsicht.

2.4.2 Ansätze der Anforderungserhebung

In der Wissenschaft und Industrie existieren eine Vielzahl von Techniken und Ansätzen zur Anforderungsermittlung. Diese lassen sich in vier Ermittlungsbereiche kategorisieren. Diese sind: Beobachtung, Befragung, Evolution, Feedback [ZC05]. Unabhängig von den Ermittlungstechniken lassen sich verschiedene Fokussierungen für die Anforderungsermittlung unterscheiden: Zielorientierung, Anwendungsfallorientierung, Szenarioorientierung.

Ziel der Anforderungserhebung ist es, die Anforderungen an ein mechatronisches System vollständig zu erfassen. Nach POHL müssen die Anforderungen dabei am Ende in drei Dimensionen ausgeprägt sein [Poh07]. Die Spezifikation muss komplett sein, die Anforderungen müssen einer allgemeinen Sichtweise entsprechen und die Darstellung der Anforderungen muss formal erfolgen (Bild 2-15).

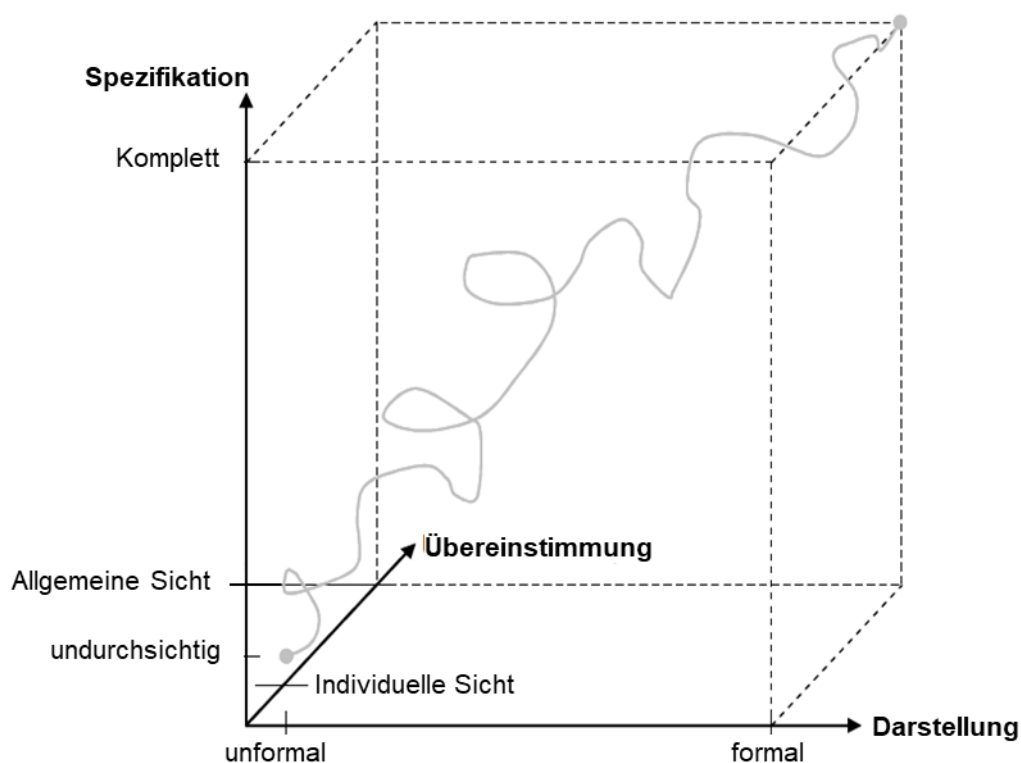


Bild 2-15: Die drei Dimensionen des Anforderungsmanagements nach POHL [Poh07]

Neben den Dimensionen der einzelnen Anforderungen ist das Ziel der Anforderungserhebung die Gesamtheit aller benötigten Anforderungen zu erfassen. Die Gesamtheit setzt

sich aus den einzelnen Informationen, die erfasst werden, zusammen. Eine Visualisierung des Sachverhaltes findet sich in [Sch08] (Bild 2-16). In dieser Darstellung stellt das dunkle Quadrat die Menge aller systementwicklungsrelevanten Anforderungen dar. Die hellen Quadrate bilden die einzelnen Anforderungen und Informationsartefakte ab. Die Erfassung muss strukturiert erfolgen, um die Gesamtheit der benötigten Anforderungen abzubilden. Eine Erhöhung der einzelnen Abfragen langt nicht aus, um dies zu ermöglichen. Eine strukturierte Erfassung erhöht zudem die Effizienz der Anforderungserfassung.

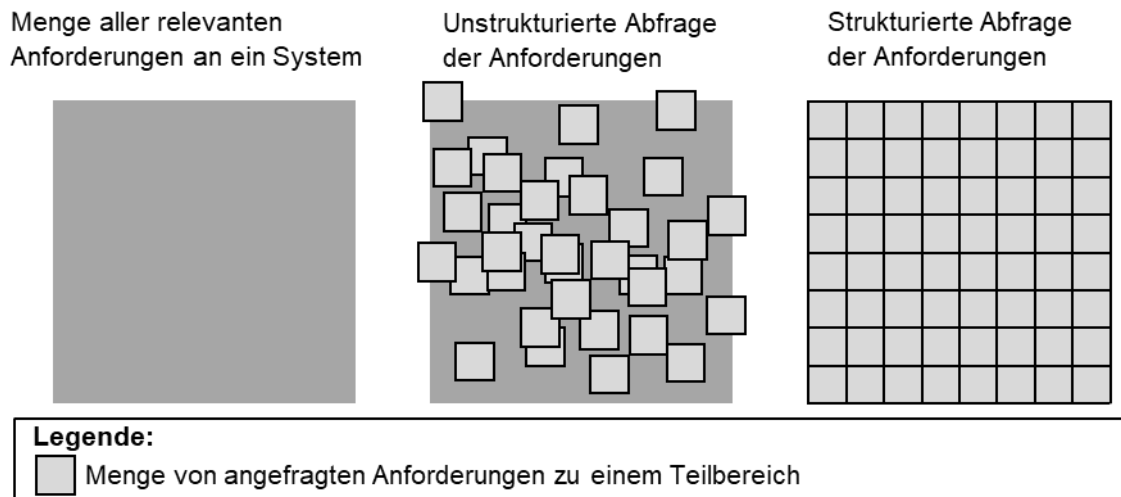


Bild 2-16: Mengendarstellung der unstrukturierten und der strukturierten Aufnahme von Anforderungen [Sch08]

2.4.3 Ermittlungstechniken für Anforderungen

Im folgenden Kapitel werden die Ermittlungstechniken für Anforderungen aus Wissenschaft und Industrie aufgeführt (Bild 2-17).

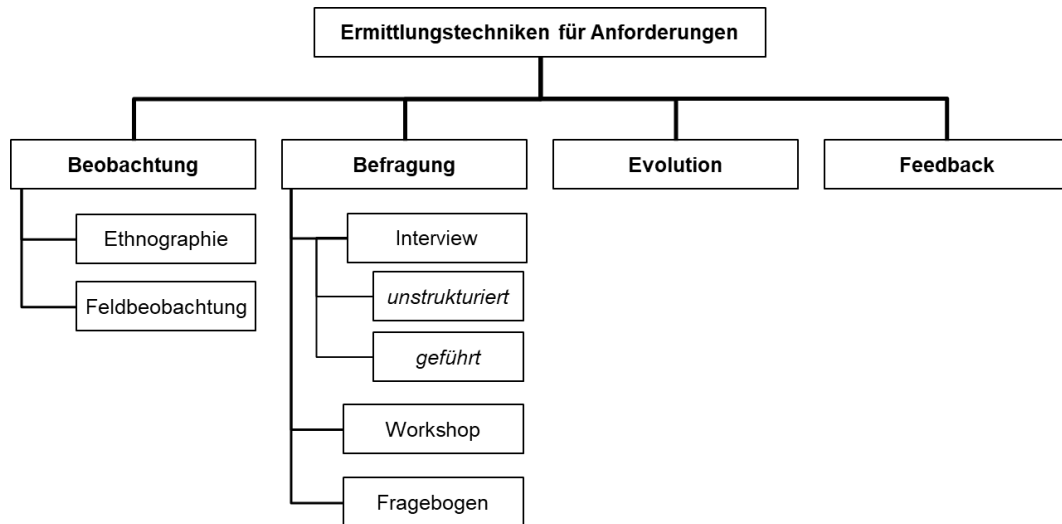


Bild 2-17: Ermittlungstechniken für Anforderungen. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Par10]

2.4.3.1 Beobachtung

Im Bereich der Ermittlungstechnik der Beobachtung lassen sich zwei unterschiedliche Techniken identifizieren.

Erster Vertreter dieser Ermittlungstechniken ist die sogenannte Ethnographie [BO00]. Hierbei werden Bevölkerungsgruppen bezüglich ihrer sozialen und kulturellen Ausprägungen untersucht. Hauptaspekt der Ethnographie ist das Alltagsleben vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Betrachtung der Lebensumstände. Aus diesen Beobachtungen lassen sich Anforderungen seitens eines spezifischen Marktes ableiten.

Die zweite Technik der Beobachten-Ermittlungstechnik von Anforderungen ist die sogenannte Feldbeobachtung [Jes08]. Mittels dieser Technik wird eine einzelne Person oder Personengruppen in ihrer natürlichen Umgebung beobachtet. Ziel ist es, das Verhalten von Personen abzuleiten. Dies kann durch eine aktive Teilnahme oder passive Beobachtung stattfinden. Diese Technik findet ihre Hauptanwendung beispielsweise im Bereich von Nutzbarkeits- oder Bedienbarkeitsstudien in Kundenuntersuchungen.

2.4.3.2 Befragung

Mittels Befragungen lassen sich Anforderungen einzelner Personen oder Personengruppen erfassen. Hierbei sind die Ansätze Interview, Anforderungsworkshop und Fragebogen.

Das Interview ist eine der Haupttechniken der Anforderungserfassung [ZC05]. Das Interview ist sowohl für Einzelpersonen, als auch für Personengruppen geeignet. Hierbei lassen sich insgesamt zwei Arten von Interviews unterscheiden. Das unstrukturierte Interview ähnelt einer Konversation. Bei dieser Art des Interviews hat der Interviewer nur

eine geringe Kontrolle über die Richtung oder den Ausgang des Interviews. Die Gefahr bei einem unstrukturierten Interview ist das falsche Fokussieren und letztendliche Zerstreuen und Verzetteln. Mittels eines strukturierten Interviews werden durch einen vordefinierten Fragenkatalog spezifische Informationen erfragt. Hierbei ist der entscheidende Erfolgsfaktor die richtigen Fragen zu stellen.

Der zweite Vertreter der Befragungstechniken ist der Anforderungsworkshop. Hierbei werden mehrere Personen in einem gemeinsamen Termin zur Anforderungserfassung zusammengebracht. Der Workshop lässt sich in drei Teilschritte untergliedern [Sch02]: Vorbereitung des Workshops, die Durchführung und die Workshop-Nachbereitung. Die Hauptaufgabe in der Vorbereitung liegt darin, alle benötigten Stakeholder zu identifizieren und die Durchführung zu planen. Zur Durchführung des Workshops werden verschiedenen Rollen benötigt: der Moderator, der Protokollführer und der Anforderungsanalytiker. Der Workshop lässt sich durch verschiedene Kreativitätstechniken unterstützen. In der Nachbereitung werden die einzelnen Ergebnisse des Workshops strukturiert und aufbereitet.

Die Befragung von Personen mittels eines Fragebogens stellt die dritte Art der Befragungstechniken dar. Hierbei ist die Fragetechnik ein entscheidendes Merkmal, da Rückfragen bei Unklarheiten und Verständnisproblemen eine eingeschränkte Möglichkeit der Rückfragen besteht [ZC05]. Durch den starren Charakter eines Fragebogens wird zudem die Möglichkeit, neue Ideen zu entwickeln oder einen Sachverhalt weiter zu vertiefen, stark eingeschränkt.

2.4.3.3 Evolution

Die Anforderungstechnik der Evolution setzt auf das Vorhandensein eines Vorgängersystems. Dieses wird in Teilen weiterentwickelt.

Die Domänen- oder Dokumentenanalyse besteht aus der Sichtung und Auswertung aller existierenden Dokumente und des Domänenwissens für ein existierendes System. Hierbei werden auf Basis eines Vorgängersystems Anforderungen an ein zu entwickelndes System abgeleitet.

Neben der reinen Dokumentenanalyse findet in der Technik der Wiederverwendung eine Verwendung bereits fertiger Systeme oder Teilsysteme statt. Da diese (Teil-)Systeme bereits entwickelt sind, sind deren Anforderungen und Spezifikationen vollständig und korrekt.

2.4.3.4 Feedback

Im Bereich der Feedback-Anforderungstechnik finden sich drei Techniken: Simulation, Experiment, Prototyping und Mock-Ups [Par10]. Diese Techniken unterscheiden sich in den Zeitpunkten, wann diese im Entwicklungsprozess angewandt werden können. Diese

korrespondieren mit den einzelnen Musterphasen in der Entwicklung mechatronischer Systeme. Hierbei werden bestehende Anforderungen validiert beziehungsweise verifiziert oder neue Anforderungen erarbeitet. Die Feedbacktechnik findet sich beispielsweise im V-Modell bei dem Durchlauf mehrerer Makrozyklen (vgl. Kapitel 2.3)

Zur Bewertung der Ermittlungstechniken für Anforderungen müssen die verschiedenen Stakeholder mit betrachtet werden. Die Ermittlungstechniken der Beobachtung sind im speziellen für die Stakeholder aus den Bereichen Marketing und Vertrieb geeignet. Die Ethnographie und die Feldbeobachtung sind aufwändige Techniken zur Anforderungserfassung. Hierbei ist häufig ein hoher Zeit- und Kostenaufwand nötig. Zusätzlich bedarf es eines Vorgehens oder einer Methode, um diese Anforderungen in technische Anforderungen zu übersetzen. Beispielsweise werden in Märkten wie China, Japan oder Afrika sogenannte Hautbleichmittel verwendet. Diese Hautbleichmittel können aufgrund ihrer Zusammensetzung Aufdrucke auf Schaltern und Bedienelementen im Fahrzeug ausbleichen lassen. Insbesondere bei häufig verwendeten Bedienelementen ist dies ein kritischer Sachverhalt. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die Fragestellung, wie ein Fahrzeug von einer bestimmten ethnischen Gruppe verwendet wird, Anforderungen an die Technik nach sich ziehen kann. Diese müssen strukturiert und methodisch abgeleitet werden.

Zur Erfassung der Anforderungen von an der Entwicklung beteiligten Disziplinen und Entwicklern wird die Ermittlungstechnik der Befragung eingesetzt. Eine Untersuchung mehrerer Studien hat gezeigt, dass die Befragung in Form des geführten Interviews am effektivsten ist [DDH+06]. Kernelement des geführten Interviews ist die Anleitung des Interviews. Der Stand der Technik liefert ein für das geführte Interview generelles Vorgehensmodell [Sch02]. Eine konkrete Formulierung der Fragestellungen zu Beginn oder eine genaue Beschreibung der anschließenden Durchführung ist im Stand der Technik nicht vertreten. Daher ist die Befragung mittels des geführten Interviews als erfahrungs- und anwenderabhängig einzustufen. Workshops zur Durchführung der Anforderungserhebung benötigen dedizierte Rollen, die ebenfalls erfahrungsbehaftet sind.

Die Anforderungsermittlungstechnik der Evolution basiert auf dem Vorhandensein eines Vorgängersystems. Bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen, die neueste Technologien beinhalten oder keinen Vorgänger aufweisen, ist diese Technik daher schwer einzusetzen. Die Evolution wird in vielen Unternehmen heutzutage unter dem Begriff Lessons Learned verstanden und eingesetzt. Lessons Learned sind ein wichtiges Element für eine effiziente Entwicklung. Hierdurch ist es möglich, bereits fertig entwickelte (Teil-)Systeme weiterzuverwenden und hierdurch einen vollständigen Anforderungskatalog zu erhalten.

Die Anforderungsermittlungstechnik Feedback gewinnt Erkenntnisse und Anforderungen aus der Simulation und von (Entwicklungs-)Mustern. Wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert, befinden sich die Musterphasen in der Entwicklung mechatronischer Systeme in der Automobilentwicklung nach einer Erstellung eines Lastenheftes. Dieses Lastenheft

muss alle benötigten Anforderungen enthalten, daher ist die Technik des Feedbacks in der Automobilentwicklung nur eingeschränkt von Nutzen.

Einen Überblick über die Häufigkeit der in der Industrie eingesetzten Ansätze liefert [KNL14]. Diese Befragung von über 119 Unternehmen aus 23 Ländern verdeutlicht den Einsatz der Ermittlungstechniken. Hierbei wird deutlich, dass die Ermittlungstechnik der Befragung in der Industrie am häufigsten vertreten ist (Bild 2-18).

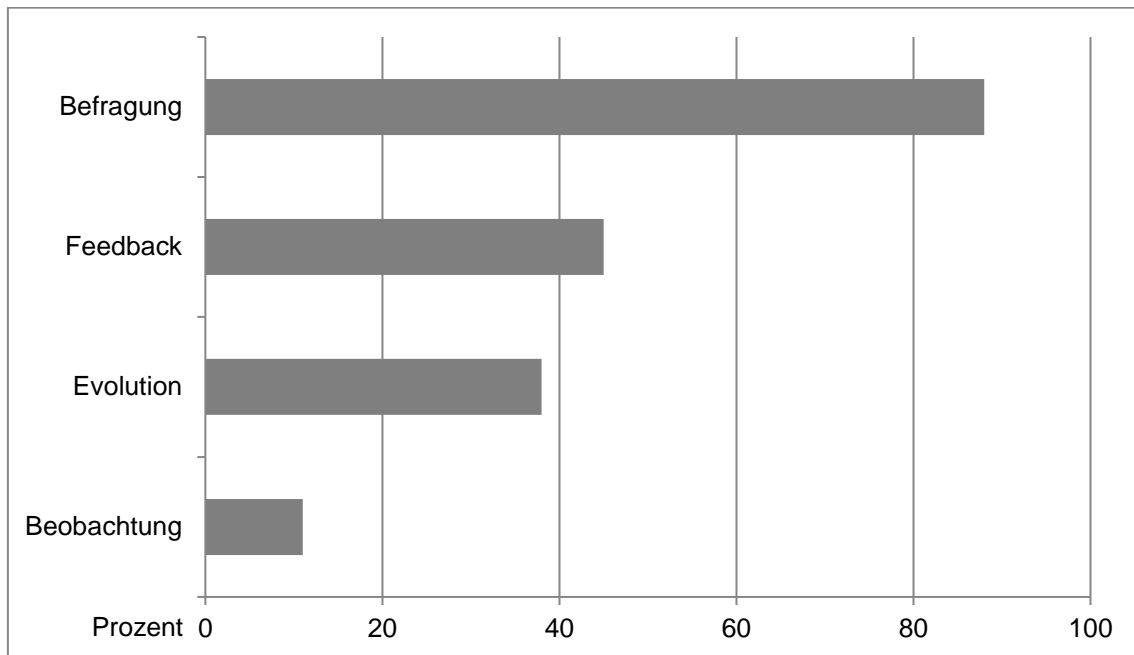


Bild 2-18: In der Industrie eingesetzte Anforderungsermittlungstechniken [KNL14]

RUPP trifft bei der Bewertung der Ermittlungstechniken für Anforderungen folgende Aussage:

„Eine Technik, die für alle Stakeholder und Anforderungen in einem Projekt gleichermaßen geeignet ist, gibt es nicht. Da im Laufe eines Projektes die unterschiedlichsten Arten von Anforderungen unter wechselnden Randbedingungen bei unterschiedlichen Menschen ermittelt werden, reicht im Allgemeinen eine einzelne Ermittlungstechnik nicht aus.“ [RSH07]

2.4.4 Anforderungsermittlungsfokus

Anforderungen an ein mechatronisches System können mit verschiedenen Fokussen erfasst und beschrieben werden. Diese unterschiedlichen Fokusse lassen sich in die Zielorientierung, die Anwendungsfallorientierung und in die Szenarien unterteilen. Im Folgenden werden die einzelnen Ansätze und deren Fokus detailliert erläutert.

2.4.4.1 Zielorientierung

Einen guten Überblick über das zielorientierte Anforderungserfassen gibt die Arbeit von LAMSWERDE [Van01]. Ziele lassen sich auf mehreren Abstraktionsebenen definieren. Diese reichen von high-level oder strategischen Ebenen bis hin zu low-level oder technischen Ebenen. Nach POHL [Poh07] ist ein Ziel die intentionale Beschreibung eines charakteristischen Merkmals des zu entwickelnden Systems bzw. des zugehörigen Entwicklungsprozesses. Ein Ziel muss folglich die Wünsche und Anliegen aller oder einzelner Stakeholder an das zu entwickelnde System beinhalten. Durch die Umsetzung des Zieles ergeben sich Merkmale des Systems.

Ziele können sowohl funktional als auch nicht-funktional sein. Diese Definition ist analog der Einordnung der Anforderungen zu sehen. Nicht-funktionale Ziele sind beispielsweise Sicherheits-, Performance- oder Anpassbarkeitsziele [KKP90]. Ziele lassen sich dekomponieren und abstrahieren, um Unterziele zu definieren. Des Weiteren lassen sich Ziele in Abhängigkeit zu einander setzen. Nach POHL sind diese Abhängigkeiten: Zielunterstützung, -behinderung, -konflikt- und Äquivalenz.

2.4.4.2 Szenariobasiert

Eng mit der zielorientierten Anforderungserfassung koexistiert der szenariobasierte Ansatz. Nach POHL beschreibt ein Szenario ein konkretes Beispiel für die Erfüllung bzw. Nichterfüllung eines oder mehrerer Ziele. Es konkretisiert dadurch eines oder mehrere Ziele. Ein Szenario enthält typischerweise eine Folge von Interaktionsschritten und setzt diese in Bezug zum Systemkontext [Poh07]. Szenarien lassen sich unterteilen in positive, negative und Missbrauchsszenarien. Die Beschreibungsart von Szenarien ist deskriptiv, explorativ oder erklärend. Zudem lassen sich Szenarien auf verschiedenen Ebenen definieren. Zu diesen gehören systeminterne, interaktive oder Kontextszenarien. Szenarien stehen neben der Zielorientierung in starkem Zusammenhang zu einer anwendungsfallorientierten Anforderungsermittlung. Beispielsweise definiert SUTCLIFFE ein Szenario als eine mögliche Abfolge von Ereignissen, die einen Pfad durch ein Anwendungsfall oder Use Case repräsentiert [SMM+98]. Hierdurch ergeben sich für einen Anwendungsfall mehrere Szenarien. Diese Szenarien stellen jeweils ein Beispiel an möglichen Zuständen innerhalb eines Anwendungsfalls dar und können abhängig von äußeren Randbedingungen sein.

2.4.4.3 Anwendungsfallorientiert

Der anwendungsorientierte Anforderungsfokus leitet sich aus einer Benutzung eines Systems durch einen Anwender ab. Der Hauptvertreter der Anwendungsfälle ist der sogenannte Use Case. Ein Anwendungsfall beschreibt die Benutzung eines Systems durch einen Anwender oder Akteur zur Erreichung eines Ziels, das durch eine Reihe von Diensten einer ausgewählten Anzahl von Akteuren bereitgestellt wird [OMG17]. Akteure

sind systemexterne Rollen, die sich in Form von Benutzern/Anwendern, Systemen oder anderen Umweltelementen manifestieren. Use Cases, die sich innerhalb der Systemgrenze befinden, definieren eine Funktionalität. Use Cases lassen sich durch eine Reihe von Wechselbeziehungen weiter dekomponieren, erweitern oder verallgemeinern. Ein Überblick über die Wechselbeziehungen und deren detaillierte Bedeutung findet sich in [OMG17].

Die oben aufgeführten Beschreibungen des ziel-, szenario- und anwendungsfallorientierten Anforderungsfokus verdeutlichen eine starke Wechselbeziehung zwischen allen drei Ansätzen. Ein Szenario dient der Zielumsetzung und stellt gleichzeitig einen Pfad durch einen Anwendungsfall dar. Darüber hinaus stellt ein Anwendungsfall eine Benutzung eines Systems zur Erreichung eines Zieles dar. Die drei Ansätze sind insbesondere für in diesem Bereich unerfahrene Anwender schwer begrifflich und auch inhaltlich zu trennen. Dies kann zur Problematik führen, dass nicht alle Anforderungen sämtlicher Disziplinen und Stakeholder erfasst werden. Hierdurch ist eine ganzheitliche und intuitive Aufstellung von Anforderungen mittels der drei Fokus nicht realisiert.

Über die in der Industrie eingesetzten Anforderungsfokusse gibt [KNL14] einen Überblick (Bild 2-19). Das Ergebnis verdeutlicht, dass die meisten Unternehmen mit der Anwendungsorientierung arbeiten. Das stark differenzierte Bild der Ergebnisse der Befragung verdeutlicht jedoch die oben genannte Einschätzung, dass die Ansätze überlappen und teils redundante Ergebnisse liefern. Keiner der Ansätze liefert eine umfassende Lösung der Probleme und Herausforderungen im Requirements Engineering [Ber12].

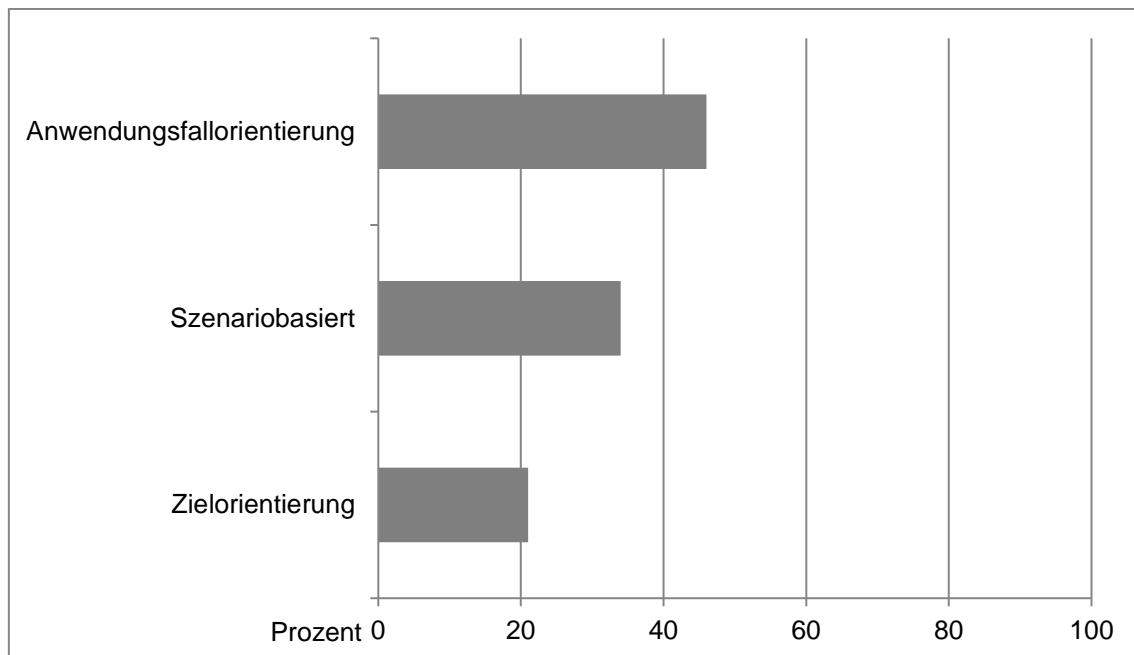


Bild 2-19: In der Industrie eingesetzte Anforderungsfokusse [KNL14]

2.4.5 Bedeutung von Anforderungen für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil

Die Automobilindustrie befindet sich im Wandel. Eine Vielzahl neuer technischer Trends hält Einzug in ein modernes Fahrzeug (Bild 2-20). Diese Trends bedingen neue Systeme, die sich bisher nicht in einem Fahrzeug befunden haben. Daher ergeben sich aktuell eine hohe Anzahl von zu entwickelnden Systemen, die der Klasse Neuentwicklung (vgl. Kapitel 1.2) zuzuordnen sind [Bro06].






	Neue Antriebs-technologien	Elektrisch angetriebene Fahrzeuge mit Hochvoltbatterie oder Brennstoffzellentechnologie
	Leichte Materialien	Widerstandsfähigere und leichtere Materialien
	Verbundene Fahrzeuge	Neue Kommunikationstechnologien Fahrzeug-zu-Infrastruktur und Fahrzeug-zu-Fahrzeug
	Verändertes Mobilitätsverhalten	Carsharing und Bezahlung pro Fahrzeugnutzung
	Autonome Fahrzeuge	Neue Technologien für autonom fahrende Fahrzeuge

Bild 2-20: Evolution des Automobils und der Mobilität [CVK+15]

Diese Trends sind im Einzelnen Elektrifizierung, autonomes Fahren und Connectivity [SK14] [Bar16] [Sch12]. Um jedem dieser Trends Rechnung zu tragen, gilt es zum einen in eine bestehende Fahrzeugarchitektur neue Systeme zu integrieren als auch komplett neue Fahrzeugarchitekturen zu entwickeln. Beispielsweise handelt es sich bei solchen mechatronischen Systemen um Hochvoltbatterien (Elektrifizierung), Sensoren und Hochintegrationsrechner (autonomes Fahren) oder Gateways (Connectivity). Nur durch den Einsatz neuer Technologien und Fahrzeugarchitekturen ist eine Realisierung dieser Systeme möglich. Hieraus ergibt sich für den Bereich der Anforderungserfassung eine neue Herausforderung. Diese Herausforderung wird durch ein Zitat von RUMSFELD ersichtlich:

„[T]here are known knowns; there are things we know we know. We also know there are known unknowns; that is to say we know there are some things we do not know. But there are also unknown unknowns – there are things we do not know we don't know” [RM12].²¹

²¹ Zu Deutsch: „Es gibt bekannte Bekannte, es gibt Dinge, von denen wir wissen, dass wir sie wissen. Wir wissen auch, dass es bekannte Unbekannte gibt, das heißt, wir wissen, es gibt einige Dinge, die wir nicht

Durch den Einsatz neuer Technologien ergeben sich in einer frühen Phase der Entwicklung sogenannte „*unknown unknowns*“. Dies sind Dinge, von denen man nicht weiß, dass man sie nicht weiß. Da diese Sachverhalte noch unbekannt sind, können zunächst hieraus keine validen Anforderungen abgeleitet werden. Eine der neuen Herausforderungen der Anforderungserfassung besteht folglich darin, aus unbekannten Sachverhalten valide Anforderungen auszuleiten.

Die Entwicklung von mechatronischen Systemen für ein Automobil wird durch eine Zusammenarbeit zwischen einem OEM und mehreren Lieferanten realisiert (vgl. Kap. 2.3.4.4). Grundlage dieser Zusammenarbeit ist ein Lastenheft, in dem sämtliche Anforderungen an ein solches System beschrieben sind. Ein solches Lastenheft dient als Vertragsdokument zwischen OEM und Lieferanten.

Eine Ausarbeitung und Ableitung von Anforderungen in der heutigen Automobilentwicklung muss ohne Prototypen auskommen. Dies ist der verkürzten Entwicklungszeit und dem Ziel einer kosteneffizienten Entwicklung geschuldet [TF00]. Eine Untersuchung bei der BMW AG ergab, dass die Entwicklung eines Prototyps länger als 7 Monate dauert und Kosten je Prototyp in Höhe von mehr als \$600.000 verursacht [Tho98]. Dies ist mit dem Ziel kurzer Entwicklungszyklen und Kosteneffizienz nicht vereinbar.

HILLHOUSE sagt über die heutige Automobilentwicklung:

„Automakers design the systems in isolation and don't discover potential problems until the integration test stages, at which time, minor changes can be expensive and major changes are out of question.“
[Hil11]²²

Hieraus wird ersichtlich, dass Änderungen in späten Phasen der Automobilentwicklung entweder sehr kostspielig sind oder unmöglich zur Umsetzung kommen können. Problemursache hierfür ist das isolierte Entwickeln der Systeme. Isoliert meint in diesem Zusammenhang eine fehlende ganzheitliche Betrachtung der Vernetzung, der Wechselwirkungen und Schnittstellen der Systeme zueinander. Die Ursache, dass es im Verlauf der Entwicklung zu Änderungen kommt, sind häufig fehlerhafte oder mangelhafte Anforderungen (vgl. Kapitel 2.4.1.1).

Vor dem Hintergrund einer sich im Wandel befindlichen Automobilindustrie, neuen und unbekannten Technologien im Automobil, dem Vertragscharakter von Lastenheften, Kosten- und zeitlicher Anspannung wird ersichtlich, dass Anforderung das entscheidende Element in der Entwicklung moderner Fahrzeuge und deren mechatronischen Systeme sind [Ebe12][Gei05][FHP+05].

wissen. Aber es gibt auch unbekannte Unbekannte – es gibt Dinge, von denen wir nicht wissen, dass wir sie nicht wissen.“

²² Zu Deutsch: Automobilhersteller designen Systeme isoliert und erkennen potentielle Probleme nicht, bis zu den Integrationsstests, zu deren Zeit kleine Änderungen sehr teuer und große Änderungen unmöglich sind.

2.5 Problemabgrenzung

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass die Entwicklung mechatronischer Systeme eines vernetzten und interdisziplinären Entwicklungsvorgehens bedarf. Auf der Ebene der Teilsystementwicklung ist die Komplexität in der Entwicklung moderner mechatronischer System im Automobil nicht beherrschbar. Vielmehr muss ein einheitliches Systemverständnis über alle Entwicklungsdisziplinen und -partner erarbeitet werden. Erst hierdurch ist es möglich, auf Systemebene interdisziplinäre Systemanforderungen abzuleiten. Diese müssen die Forderungen sämtlicher relevanter Stakeholder erfüllen.

Systems Engineering stellt hierfür geeignete Arbeitsweisen bereit. Mit den Mitteln des Model-Based Systems Engineering kann ein einheitliches Systemverständnis und eine Betrachtung auf Systemebene erreicht werden. Das Systemmodell dient hierbei als zentrales Arbeitsmedium und Informationsträger für alle Disziplinen und Stakeholder. Zur Beschreibung des Systemmodells wird eine geeignete Methode, eine geeignete Modellierungssprachen und nach FRIEDENTHAL et al. [FMS11] zudem ein Werkzeug benötigt. Erst durch diese interdisziplinäre Darstellung, die sämtliche benötigten Betrachtungsweisen auf das System enthält, ist es möglich, interdisziplinäre Anforderungen an ein solches System abzuleiten und zu spezifizieren. Hiervon ausgehend findet eine transparente Ableitung der Anforderungen an Komponenten oder Bauelemente statt.

Es lassen sich mehrere Nutzenpotentiale durch den Einsatz von Systems Engineering und eines ganzheitlichen Vorgehens zur Anforderungserhebung identifizieren. Die Analyse des Standes der Technik wird hierfür in Kapitel 3 vorgenommen. Hierbei wird zwischen den Rahmenwerken des Requirements Development, Vorgehen aus der Produktentwicklung und den Ansätzen aus der Automobilindustrie unterschieden. Die Eignung des Vorgehensmodells und der Ansätze zur Anforderungserhebung die identifizierten Nutzenpotentiale zu erfüllen wird anschließend bewertet. Nachfolgend werden zunächst die Nutzenpotentiale durch den Einsatz von Systems Engineering bei der Anforderungserhebung aufgezeigt. Anschließend wird der Nutzen eines ganzheitlichen Vorgehens zur Anforderungserhebung dargestellt. Der Einsatz von **Systems Engineering** und einem **Systemmodell** bietet folgende **Nutzenpotentiale**:

Disziplinübergreifendes Systemabbild: Das Systemmodell ist Träger sämtlicher disziplinspezifischer und disziplinübergreifender Informationen. Es dient als mechatronische Zeichnung. Hierbei ist es wichtig, eine disziplinübergreifende Sprache zu verwenden. Hierdurch ist garantiert, dass nicht nur die Informationen einer Entwicklungsdisziplin beinhaltet sind, sondern ein ganzheitliches Systemverständnis aller beteiligten Fachdisziplinen entsteht.

Verständlichkeit für alle Stakeholder: Da nicht alle Stakeholder ein umfangreiches technisches Fachwissen besitzen, muss in der Entwicklung eine für alle Stakeholder verständliche Sprache eingesetzt werden. Zu den Stakeholdern mit begrenztem technischem Fachwissen zählen unter anderem das Marketing, der Vertrieb oder der Kundenservice [All07]. Ein Systemmodell in einer geeigneten Darstellungsform bietet dieses Potential,

da bildlich dargestellte Informationen von Menschen besser verarbeitet werden können als Texte [GH86] [Gla88] [Mie98]. Um eine verständliche und transparente Darstellung des Systems für alle Projektbeteiligten zu ermöglichen, werden sämtliche Elemente und deren Verknüpfungen dargestellt. Dies geschieht auf Funktions- und auf Systemarchitekturebene.

In der Entwicklung mechatronischer System in der Automobilindustrie wird ein ganzheitliches Verfahren zur Anforderungserhebung benötigt. Zu Beginn der Neuentwicklung eines solchen Systems sind nicht alle Anforderungen bekannt. Erst nach Einbeziehung aller Disziplinen, Stakeholder und der nachgelagerten Prozesskette können die Anforderungen an ein mechatronisches System vollständig beschrieben werden. Neben den oben gezeigten Nutzenpotentialen von Systems Engineering und dem Einsatz eines Systemmodells ergeben sich durch ein **durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung** weitere **Nutzenpotentiale**:

Erfassung der Anforderungen aller relevanten Stakeholder: Durch ein durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung wird sichergestellt, dass die Anforderungen aller relevanten Stakeholder mit in die Systementwicklung einbezogen werden. Diese Stakeholder sind unter anderem spezifische Märkte, Marketing und Vertrieb, Gesetze und Normen und der Kunde an sich. Zunächst bietet ein durchgängiges Vorgehensmodell die Möglichkeit, alle relevanten Stakeholder zu identifizieren. Nach der Identifikation werden die Anforderungen der Stakeholder erfasst. Dies ist nötig, um zu garantieren, dass das entwickelte System sämtliche geforderten Systemeigenschaften erfüllen kann.

Einbeziehung sämtlicher Entwicklungsdisziplinen: Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme sind mehrere Entwicklungsdisziplinen beteiligt. Das disziplinübergreifende Verständnis ist dahingegen eher gering ausgeprägt. Durch den Einsatz eines durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserhebung werden diese gegenseitigen Disziplinbeeinflussungen transparent. Hierdurch wird garantiert, dass abgestimmte und richtige Systemanforderungen disziplinübergreifend entstehen.

Anforderungen richtiger Granularität: Das zentrale Element der heutigen Entwicklung in der Automobilindustrie sind die Anforderungen an ein mechatronisches System, eine Komponente oder ein Bauelement. Diese Anforderungen sind Vertragsbestandteil zwischen den OEMs und der Lieferantenkette und können juristische Konsequenzen bei fehlerhafter Umsetzung nach sich ziehen. Die fehlerhafte Umsetzung resultiert zumeist aus fehlerhaften Anforderungen, die Annahmen über ein System und dessen Komponenten zulassen [ABN+06]. Durch ein Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung wird diese Problematik vermieden. Die Anforderungen liegen in einer richtigen Granularitätsstufe vor, um diese uneindeutig zu spezifizieren.

Neben den Nutzenpotentialen des Einsatzes von Systemmodellen und eines durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserhebung in der Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobilbereich lassen sich **Herausforderungen** identifizieren. Diese Herausforderungen resultieren aus dem industriellen Einsatz und stellen die

Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz dar. Hierbei verkörpert der Ressourceneinsatz die größte Herausforderung. Das Erstellen eines Systemmodells benötigt in der Entwicklung neben der eigentlichen Entwicklungsaufgabe zusätzliche Zeit. Ebenso verhält es sich mit einem Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung. Insbesondere zu Beginn einer Entwicklung wird hier meist zusätzlich Zeit benötigt. Der Nutzen des Einsatzes zeigt sich hingegen erst in späteren Entwicklungsphasen durch einen höheren Reifegrad des Systems. Die Herausforderungen bezüglich der verfügbaren und eingesetzten Ressourcen in der industriellen Praxis sind im Einzelnen:

Bestehende Personalressourcen nutzen. Die zunehmende Mechatronisierung der Systeme in einem modernen Automobil erfordert einen flächendeckenden Einsatz von Systems Engineering Methoden zur Ableitung von disziplinübergreifenden Anforderungen. Die Erfahrung der einzelnen Mitarbeiter mit den Methoden des Systems Engineering ist entgegen dem aber eher gering ausgeprägt. Um diesem Mangel zu begegnen, hat das Systems Engineering eine projektbegleitende Rolle beschrieben: den Systems Engineer oder auch Systemarchitekt (vgl. Kapitel 2.3.3). In einem heutigen Automobil lassen sich über 200 mechatronische Systeme identifizieren. Als projektbegleitende Vollzeitrolle würde dies bedeuten, dass ein Fahrzeugprojekt durch eine Vielzahl von Systems Engineers begleitet werden müsste. Dies ist alleine durch den Mangel an qualifizierten Bewerbern auf dem Arbeitsmarkt nicht erfüllbar [GDS+13]. Ebenso verhält es sich mit der Rolle des Anforderungsmanagers. Dieser ist dafür verantwortlich, sämtliche Anforderungen zu erfassen und nicht-technische Anforderungen seitens Stakeholdern mit begrenztem technischem Fachwissen in spezifizierbare technische Anforderungen umzusetzen. Auch diese Rolle ist nicht durchgängig besetzt. Daher müssen die Methoden derart ausgelegt werden, dass diese ohne Erfahrungen im Bereich Systems Engineering oder der Anforderungserhebung durch den einzelnen Mitarbeiter selbstständig durchgeführt werden können.

Hohe Effizienz/Tailoring. Um einen hohen Nutzen bei geringem Aufwand in der industriellen Praxis zu garantieren, muss ein ganzheitliches Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung sich an die Bedürfnisse des zu entwickelnden Systems anpassen. Dieses sogenannte Tailoring muss dafür sorgen, dass der Aufwand zur Modellierung und zur Ableitung von Anforderungen der Komplexität des zu entwickelnden Systems gerecht wird.

Einsatz von Lessons Learned. Ein eingesetztes Vorgehensmodell zur Anforderungserhebung und Systemmodellierung sollte die Thematik Lessons Learned mit beinhalten. Durch den Einsatz von Lessons Learned lässt sich eine weitere Effizienzsteigerung in der Entwicklung von mechatronischen Systemen im Automobil erreichen. Durch Nutzen des Wissens aus vorherigen Entwicklungsprojekten ist es möglich, Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die Herausforderung im Bereich Lessons Learned besteht darin, aus einer Vielzahl unterschiedlicher Produktgruppen (z. B. Scheinwerfer, Sitzverstellungssysteme, Verbrennungsmotoren, Sensorsysteme) die Erkenntnisse derart zu kennzeichnen, dass diese

in Folgeprojekten herangezogen werden können. Der Erkenntnisübertrag muss hierbei produktgruppenübergreifend möglich sein.

Werkzeugeinsatz. Der hohe Grad an verteilter und vernetzter Entwicklung unternehmensintern und über mehrere Unternehmen hinweg beeinflusst die Fragestellung nach einem geeigneten Werkzeug zur Erstellung des Systemmodells und zur Anforderungserfassung. Wichtigstes Merkmal ist die Verbreitung eines solchen Werkzeuges in der Industrie. Hierbei ist neben IBM Doors auch PTC Integrity und Microsoft Office sowohl im Bereich der Anforderungserfassung als auch des Managements der industrielle Standard [AWS14]. Zur Gewährleistung eines flächendeckenden Einsatzes der vorgestellten Gesamtmethodik muss diese daher toolunabhängig ausgelegt werden. Daher muss jede Einzelmethode und das gesamte Vorgehen so ausgelegt werden, dass dies sich selbst, ohne den Einsatz eines speziellen Werkzeuges, validieren kann.

Eindeutige Vorgehensbeschreibung. Da spezielle Rollen wie der Anforderungsmanager oder der Systems Engineer in der industriellen Praxis selten vorhanden sind, oder nicht geschaffen werden, obliegt die Durchführung der Anforderungserfassung und der Systemmodellmodellierung den einzelnen Entwicklern. Durch den zunehmenden Einsatz von Modulbaukästen muss nicht nur die Entwicklung, sondern auch die Anforderungserfassung über mehrere Automobil- und Konzernmarken hinweg durchgängig stattfinden. Daher muss ein ganzheitliches Vorgehen zur Anforderungserhebung eine dezentrale Arbeitsweise unterstützen. Dies bedeutet, dass der einzelne Entwickler oder kleine Entwicklungsteams in den einzelnen Marken die Methoden autark anwenden können müssen. Die fertigen Ergebnisse werden an die entwickelnde Marke zurückgespielt und zu einer ganzheitlichen Sichtweise anschließend zentral vereint. Die Herausforderung besteht folglich darin, das ganzheitliche Vorgehen zur Anforderungserhebung derart auszulegen, dass unabhängig vom Anwender Ergebnisse mit der gleichen Granularität erarbeitet werden.

Die oben aufgeführten Nutzenpotentiale und Herausforderungen zeigen auf, dass ein **Bedarf** für ein *durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* besteht. Insbesondere in der industriellen Praxis muss mit einer Vielzahl an Herausforderungen umgegangen werden, um zum einen den Nutzen als auch den flächendeckenden Einsatz eines solchen Verfahrens zu gewährleisten. Das Gesamtverfahren ist auf die Bedarfe der Automobilindustrie hin entwickelt. Ein Überblick und die Zusammenhänge der Handlungsfelder sind in Bild 2-21 dargestellt.

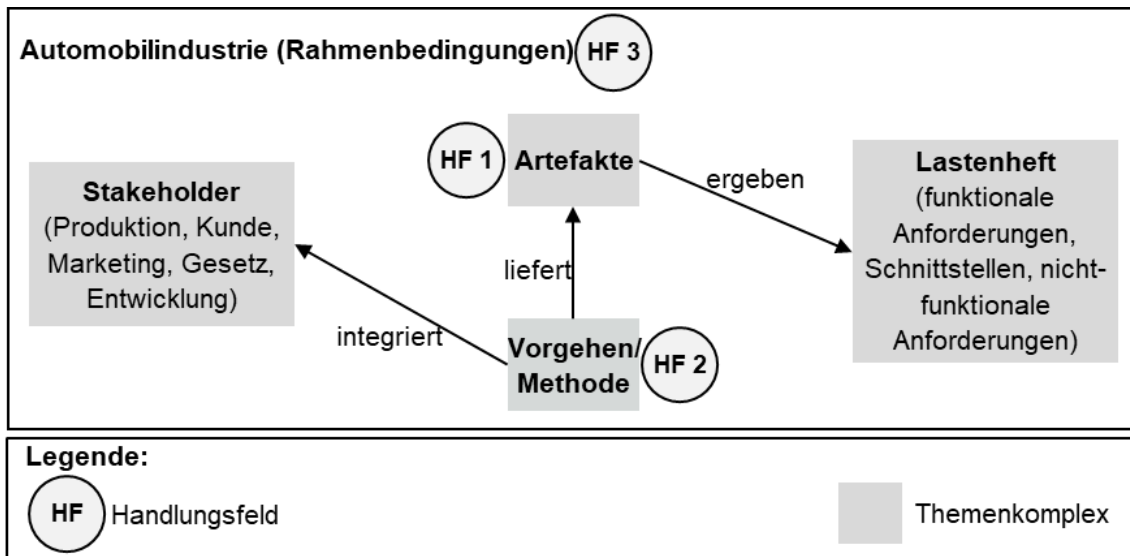


Bild 2-21: Überblick und Zusammenhang der Handlungsfelder

Handlungsfeld 1: Artefakte zur Beschreibung und Spezifikation von Anforderungen in einem Lastenheft gemäß Automotive VDA-Standardstruktur

Ein *durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* muss disziplinübergreifend sämtliche Artefakte liefern, die zur Erstellung und Spezifikation von Anforderungen in einem Lastenheft benötigt werden. Artefakte sind (Teil-)Ergebnisse einer Methodenanwendung oder eines Vorgehensschrittes, wie eine Funktionshierarchie oder Schnittstellenbeschreibungen. Die Struktur eines Lastenheftes sieht vor, dass sowohl funktionale wie auch nicht-funktionale Anforderungen eines Systems oder mehrerer Komponenten definiert und spezifiziert werden. Zudem wird in der Lastenheftvorlage eine Übersicht über die funktionale und physikalische Systemarchitektur, Systemumgebung und deren sämtlichen Schnittstellen gefordert. Die Darstellung der Systemarchitektur und Systemumgebung muss sämtliche Entwicklungsdisziplinen und deren individuellen Sichten auf den Entwicklungsgegenstand enthalten. Je nach Entwicklungsszenario müssen diese Artefakte auf der jeweilig relevanten Ebene des V-Modells vorliegen. Einer der zentralen Aspekte dieses Handlungsfeldes ist, dass sämtliche Artefakte in einer richtigen Granularität vorliegen müssen, um zu einer validen Anforderungsspezifikation zu dienen.

Handlungsfeld 2: Entwicklung einer durchgängigen Gesamtmethode zur Artefakt- und Anforderungserfassung

Grundlage des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* ist ein methodisch gestütztes Vorgehen. Dieses Vorgehen beschreibt die benötigten Schritte zur Erfassung aller relevanten Artefakte und Anforderungen an ein System und dessen Subkomponenten. Hierzu ist es nötig, dass sämtliche Sichten der relevanten Stakeholder integriert werden. Zur Erreichung dieses Zieles muss die Möglichkeit der Einbeziehung von nicht technisch formulierten Eigenschaften und Anforderungen bestehen. Diese müssen im Rahmen des Gesamtverfahrens in technische Anforderungen übersetzt werden. Der Zeitpunkt des Einsatzes des

Vorgehensmodells ist in frühen Entwicklungsphasen für Neuentwicklungen mechatronischer Systeme ohne Vorgänger- oder Konkurrenzprodukt und Prototyp. Da nicht von einem durchgängig etablierten Experten-Know-how im Bereich des Anforderungsmanagements oder des Systems Engineering ausgegangen werden kann, muss eine verständliche Auslegung und vollständige Beschreibung der Methoden vorliegen. Zudem müssen sämtliche Einzelmethoden verknüpft sein. Für sämtliche Einzelschritte müssen Gütekriterien vorhanden sein, die die erarbeiteten Arbeitspakete objektiv und vollständig bewerten können.

Handlungsfeld 3: Ermöglichen des flächendeckenden industriellen Einsatzes – firmenübergreifend, dezentral, toolunabhängig, erfahrungsunabhängig

Durch den Einsatz des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* in der Industrie ergeben sich weitere Rahmenbedingungen. Aufgrund der Vielzahl von beteiligten Firmen und Lieferanten ist eine toolunabhängige Auslegung eine der zentralen Herausforderungen. Trotz dieses Verzichtes auf ein Tool, das die Gesamtmethode unterstützt, muss eine komplette Nachverfolgbarkeit aller Artefakte und der Anforderungen möglich sein. Um einen flächendeckenden industriellen Einsatz zu gewährleisten, muss das Gesamtverfahren effizient gehalten sein. Dies bedeutet, dass die einzelnen Arbeitspakete einen hohen Nutzen bei geringer Arbeitsbelastung für den einzelnen Entwickler aufweisen. Zur weiteren Effizienzsteigerung muss die Abbildung von fachdisziplinübergreifendem und firmenübergreifendem Wissen für die Entwicklung zukünftiger mechatronischer Systeme möglich sein. Hierzu müssen Lessons Learned in Form von Lösungsmustern ausgeleitet werden können. Neben der Art der Repräsentation des Lösungsmusters ist das Kategorisieren und Wiederauffinden eines Lösungsmusters hierbei eine große Herausforderung [Win98].

Die oben aufgeführten Handlungsfelder adressieren Aspekte des BMBF-Projektes AutoSWIFT. Das Projekt fokussiert auf die Entwicklung von Mikroelektronik. Im Rahmen dieses Projektes wurden aus Sicht der Automobilindustrie unter anderem Fragestellungen für das Requirements Engineering formuliert [Ew16]. Diese sind ebenfalls für die Entwicklung mechatronischer Systeme gültig:

- Wie kann ein durchgängiges Requirements Engineering entlang der Wertschöpfungskette realisiert werden?
- Wie kann die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette verbessert werden?
- Wie können die richtigen Requirements identifiziert werden?

2.6 Abgeleitete Anforderungen an ein durchgängiges Entwicklungsvorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobilbereich

Aus der Problemanalyse ergeben sich Anforderungen an ein *durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil*. Diese Anforderungen bilden zusammen mit den Handlungsfeldern den Rahmen für diese Arbeit (Bild 2-22).

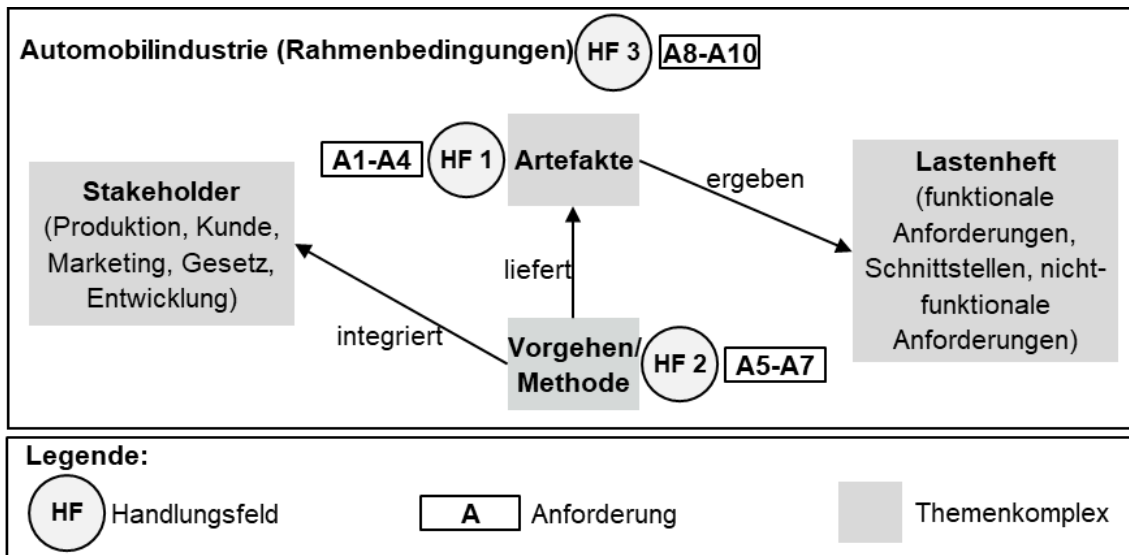


Bild 2-22: Überblick und Zusammenhang der Handlungsfelder und Anforderungen

A1) Funktionale und physikalische Anforderungen und Artefakte der richtigen Granularität: Ein durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung an mechatronische Systeme muss als Ergebnis Artefakte und Anforderungen der richtigen Granularität liefern. Die Granularität orientiert sich hierbei an den Merkmalen von Anforderungen gemäß IEEE1233 [IEEE1233]. Anforderungen der richtigen Granularität sind abstrakt/lösungsneutral, eindeutig, nachverfolgbar und testbar. Neben der Granularität müssen sich sowohl funktionale als auch physikalische Anforderungen ergeben.

A2) Systemarchitektur und Umfelddarstellung: Da an der Entwicklung mechatronischer Systeme unterschiedlichste Entwicklungsdisziplinen und Fachfraktionen beteiligt sind, muss ein einheitliches Systemverständnis in Form einer Systemarchitektur vorhanden sein. Dieses wird mittels eines Systemmodells erreicht, das sämtliche Sichten auf das System transparent darstellt. Zudem müssen in diesem Systemmodell sämtliche für ein Lastenheft relevante Wechselwirkungen zwischen Systemen, Komponenten und Bauelementen erfasst und abgebildet sein. Die Systemarchitektur und die Umfelddarstellung sind fester Bestandteil eines Lastenheftes.

A3) Disziplinübergreifende Artefakte und Anforderungen: An der Entwicklung mechatronischer Systeme sind die technischen Fachdisziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwaretechnik beim OEM und in der Lieferantenkette beteiligt.

Diese Fraktionen haben alle ihre unterschiedlichen Sichtweisen auf den Entwicklungsgegenstand. Die Methodik zur Anforderungserfassung an ein mechatronisches System muss sämtliche Artefakte und Anforderungen aller beteiligten Fachdisziplinen erheben. Hierdurch entsteht eine Transparenz, wie sich die unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen und schlussendlich deren Anforderungen gegenseitig beeinflussen.

A4) Entwicklungsszenarioabhängige Artefakte und Anforderungen: Aufgrund der verschiedenen Entwicklungsszenarien in der Automobilentwicklung müssen Artefakte zur Spezifikation der Anforderungen auf allen Ebenen des V-Modells erstellt werden können. Ausgehend von Artefakten und Anforderungen auf einer Gesamtsystemebene muss es möglich sein, Ableitungen und Dekompositionen auf Komponenten- und Bauteilebene durchzuführen.

A5) Stakeholderübergreifende Anforderungserfassung: An der Entwicklung mechatronischer System sind neben den technischen Fachdisziplinen auch die Produktion beim OEM und in der Lieferantenkette beteiligt. Zudem müssen auch Disziplinen mit begrenztem technischem Fachwissen, wie unter anderem das Marketing und der Vertrieb mit in die Entwicklung einbezogen werden können. Diese Fraktionen haben alle ihre unterschiedlichen Sichtweisen auf den Entwicklungsgegenstand. Ein durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung an ein mechatronisches System muss sämtliche Anforderungen aller beteiligten Stakeholder in technische Anforderungen übersetzen.

A6) Neuentwicklung ohne Referenz: Aufgrund des hohen technischen Neuheitsgrades in der Entwicklung mechatronischer Systeme für ein Automobil muss ein Vorgehen zur Anforderungserfassung ohne Referenzen auskommen. Diese Referenzen sind im Einzelnen: Vorgängerprodukte, Konkurrenzprodukte, Prototypen. Da es keine Referenzen gibt, lassen sich auch keine Anforderungen aus diesen wiederverwenden.

A7) Verknüpfte Methoden und Sichten: Ein Vorgehen zur Anforderungserfassung an ein System und dessen Subkomponenten beinhaltet die Anwendung mehrerer Einzelmethoden und die Erstellung mehrerer Partialmodelle. Da die Anforderungen nachvollziehbar über die Systemarchitektur, sämtliche Funktionen und Stakeholder sein müssen, müssen auch die Partialmodelle und die Methoden zur Erstellung durchgängig verknüpft sein. Bei nicht durchgängig verknüpften Einzelmethoden und Partialmodellen besteht die Gefahr des Informationsverlustes.

A8) Intuitiv und validierbar: Da in der industriellen Praxis ein Systems Engineer als Koordinator des Systementwurfs über alle Disziplinen hinweg häufig nicht vorhanden ist [GDS+13], muss die Gesamtmethode von den einzelnen Entwicklern durchführbar sein. Diese verfügen häufig nicht über Systems-Engineering-Kenntnisse. Auch der Mangel an Anforderungsmanagern führt dazu, dass nicht von tief greifendem Wissen im Bereich der Anforderungserfassung ausgegangen werden kann. Um die richtige Bearbeitung der Einzelmethoden zu garantieren, müssen eindeutige Vorgehensbeschreibungen, Gütekriterien und Validierungen der Methodenergebnisse vorhanden sein. Zudem muss das Vorgehen

zur Erfassung der relevanten Anforderungen für alle beteiligten Akteure verständlich und anwendbar sein. Ein rein textbasiertes Vorgehen ist im Sinne der Verarbeitbarkeit der Informationen durch alle Projektbeteiligten nicht zielführend [GH86] [Gla88] [Mie98].

A9) Verknüpfte Artefakte und Methodenergebnisse – Toolunabhängig: Durch Anwendung eines Gesamtverfahrens zur Anforderungserfassung entstehen mehrere einzelne Artefakte und Methodenergebnisse. Diese sind durch das Gesamtverfahren inhaltlich verknüpft. Diese Verknüpfung muss neben der rein inhaltlichen Zusammenhänge toolunabhängig gestaltet sein, da sonst eine konzern- und firmenübergreifende Zusammenarbeit behindert wird. Eine Repräsentation der Artefakte, Methodenergebnissen der im Rahmen des Gesamtverfahrens erhobenen Daten kann nur ohne ein dediziertes Tool umgesetzt werden.

A10) Lessons Learned: Zur weiteren Effizienzsteigerung für die industrielle Praxis muss ein Katalog mit bereits fertig entwickelten und validierten Lösungsmustern bereitgestellt werden. Zudem muss die Möglichkeit bestehen, diese und textbasierte Lessons Learned frühzeitig in die Entwicklung eines mechatronischen Systems zu integrieren. Hierdurch lässt sich der Entwicklungsaufwand reduzieren und es ist sichergestellt, dass valide Anforderungen entstehen, die bereits erfolgreich umgesetzt wurden.

3 Stand der Technik

Nachdem in Kapitel 2 aus der Problemanalyse ein Gesamtrahmen aus Handlungsfeldern und Anforderungen erstellt wurde, wird der Stand der Technik in diesem Kapitel hierauf untersucht. Das vorliegende Kapitel gibt zunächst einen Überblick über den Stand der Technik für Rahmenwerke zur Anforderungserhebung und Vorgehen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme.

Zur Klärung wann und wie Anforderungen im Entwicklungsprozess erfasst werden, werden die in der Industrie und Wissenschaft etablierten Rahmenwerke und Vorgehen zur Entwicklung bewertet. Anschließend werden Vorgehen und Ansätze zur Anforderungserhebung, die aus dem dedizierten Bereich Automobilindustrie kommen, bewertet. Hierbei wird auf eine Untersuchung rein textbasierter Ansätze verzichtet, da in der Anforderungsableitung an diese Arbeit die Notwendigkeit eines modellbasierten Ansatzes oder einer übersichtlichen Darstellung bereits beschrieben wurde.

Zudem werden Ansätze, die rein einer Entwicklungsdisziplin zugeordnet werden können, nicht betrachtet. Dies trifft insbesondere auf Ansätze der Anforderungserhebung im Bereich der reinen Softwareentwicklung zu. Diese Ansätze sind aufgrund ihres Fokus auf eine rein funktionale Betrachtung und der Vernachlässigung der physikalischen System- und Komponentenebene nicht für die Anforderungserhebung in mechatronischen Systemen geeignet. Als Beispiel für einen solchen Ansatz sei hier die bereits aus den 1970er bekannte Structured Analysis and Design Technique von ROSS zur Darstellung einfacher Funktionen und Prozessabläufen genannt [Ros77].

Im Anschluss werden die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Modellierungssprachen dargestellt und evaluiert.

3.1 Rahmenwerke für das Requirements Development

Zur Entwicklung von Anforderungen an mechatronische Systeme existieren mehrere Rahmenwerke. Diese Rahmenwerke beinhalten eine Vielzahl von Artefakten, aus denen Anforderungen entstehen sollen. Im Folgenden werden diese Rahmenwerke hinsichtlich der Artefakte und deren Eignung auf Befüllung eines Lastenheftes nach VDA-Standardvorgabe untersucht.

3.1.1 REM

Das Requirements Engineering Reference Model (REM) behandelt das Requirements Development von softwareintensiven Systemen [GBK+06]. Es beinhaltet neben einem Artefaktmodell auch Rollendefinitionen und Tailoringkonzepte. Das REM basiert auf der Annahme, dass das Requirements Development ein iterativer Problemlösungszyklus ist.

Das Artefaktmodell des REM ist in drei Bereiche aufgegliedert: ‚Business Needs‘, ‚Requirements Specification‘ und ‚System Specification‘. Jeder der drei Bereiche beinhaltet mehrere Artefakte. Im Bereich der ‚Business Needs‘ finden sich beispielsweise ‚Business

Objectives and Customer Requirements‘, ‚System Vision‘ und ‚System Success Factors‘ (Bild 3-1).

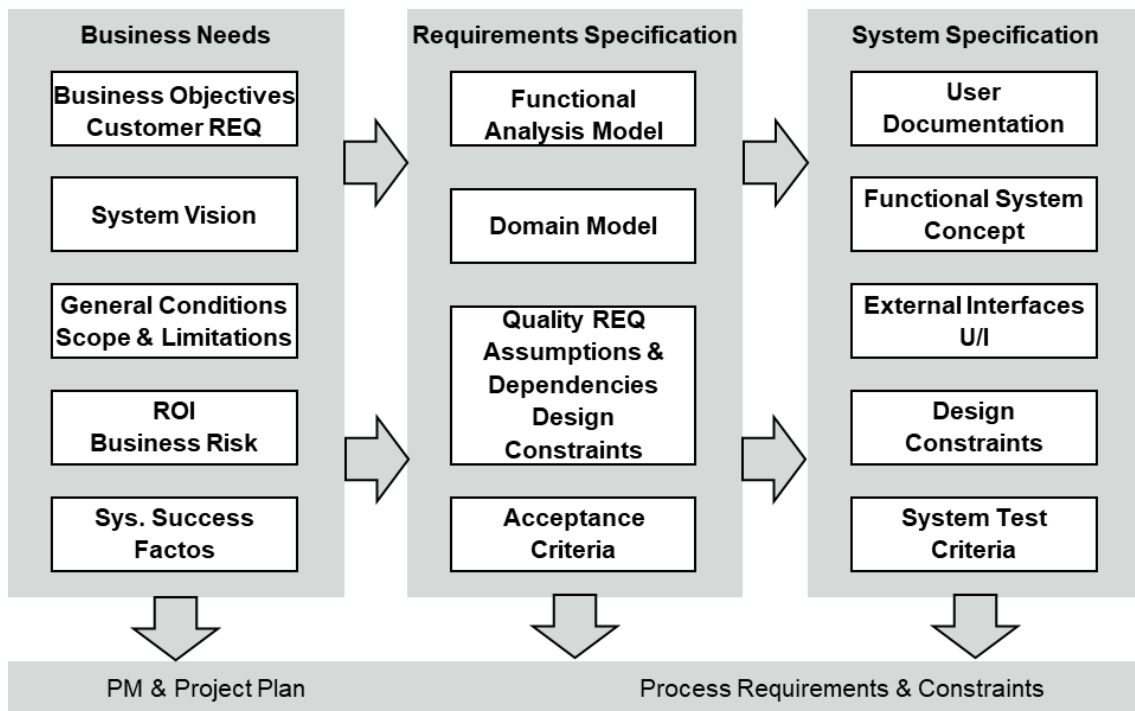


Bild 3-1: Die Artefakte des Requirements Engineering Reference Model [GBK+06]

Der Bereich ‚Requirements Specification‘ dient der Analyse und Modellierung von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen. Hierzu sind drei Modelle (*Functional Analysis Models*, *Domain Models*, *Non-functional Requirements Model*) und der Artefakttyp *Acceptance Criteria* vorgesehen. Im letzten Bereich *System Specification* wird das funktionale Konzept des Systems, dessen benötigtes Verhalten und die Integration in dessen Umgebung abgeleitet. Hier sind unter anderem die Artefakte *User Interface Specification*, *External Interface Specification* und *System Test Criteria* verortet. Zu jedem Artefakt stellt REM eine Übersicht zur Verfügung, in der die relevanten Rollen, eine Beschreibung des Artefaktes und eine Klassifikation der Notwendigkeit der Arbeitsschritte vermerkt sind.

Bewertung: Das Requirements Engineering Reference Model weist vor den Anforderungen dieser Arbeit Lücken auf. Die einzelnen Artefakte werden inhaltlich nur oberflächlich miteinander in Relation gesetzt. Es wird keine Eingangs-/Ausgangsbeziehung der Einzelartefakte zueinander beschrieben. Beispielsweise wird als Zweck der *Domain Models* angegeben, dass diese die Zielerfordernungen und eingrenzenden Anforderungen spezifizieren und als interdisziplinäres Kommunikationsmedium dienen. Zudem beinhaltet das REM keine Modellierungssprache. Ein Vielzahl von Verweisen auf mögliche Modellierungssprachen und weiterführende Informationen finden sich zu jedem Artefakt. Daher ist das Requirements Engineering Reference Model nur mit fundierten Vorkenntnissen

anzuwenden. Darüber hinaus fehlt es dem REM an einem klar beschriebenen strukturierten Vorgehen mit Eingangs-/Ausgangsbeziehungen, daher ist es für den ungeübten Anwender nur mit Einschränkungen durchzuführen.

3.1.2 REMsES

Das Requirements-Engineering softwareintensiver, eingebetteter Systeme (REMsES) ist ein BMBF-Verbundprojekt, das sich mit dem systematischen Requirements-Engineering und -management eingebetteter Systeme, insbesondere im Automobil, beschäftigt [BBH+09]. Projektziel ist ein validierter und praxistauglicher Leitfaden zur systematischen und zielgerichteten Erhebung, Strukturierung, Dokumentation und Verwaltung von Anforderungen.

REMsES verfolgt mit den Modellierungsansätzen Kontext, Anforderungen und Entwurf eine durchgängige Modellierung über die Ebenen System, Funktionsgruppen und Hardware/Software. Hierzu werden insgesamt neunzehn Artefakte erstellt. In Bild 3-2 sind die Artefakte und die Verknüpfungen der Anforderungsartefakte dargestellt. Die Modellierungssprache, die bei REMsES durchgängig zum Einsatz kommt, ist SysML.

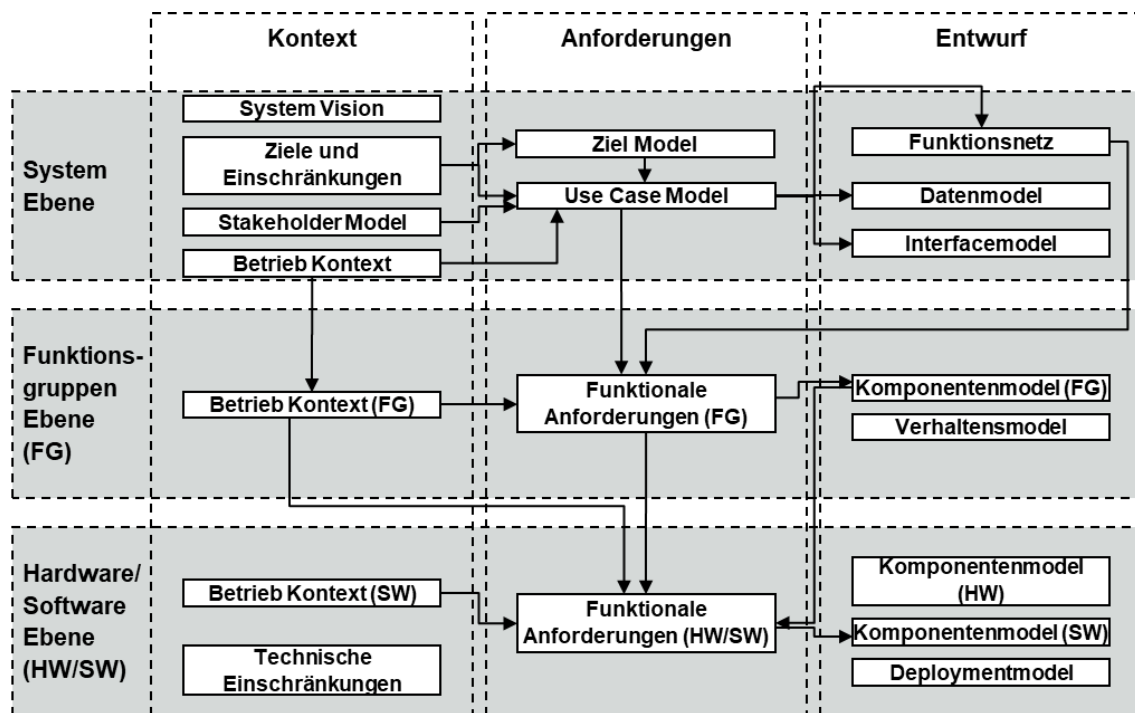


Bild 3-2: REMsES-Artefaktmodell mit Verknüpfung der Anforderungsartefakte nach [BBH+09]

Das Vorgehen in REMsES sieht vor, zunächst alle Modellierungsansätze auf der Systemebene zu durchlaufen. Anschließend folgt die Funktionsgruppen- und die Hardware/Software-Ebene, sodass alle Artefakte erstellt sind.

In der Kontextebene wird der für Anforderungen relevante Kontext ermittelt. Dies geschieht mittels mehrerer Strukturmodelle. In der Anforderungsebene werden Einschränkungen und die funktionalen und Qualitätsanforderungen an das System erarbeitet. Die Entwurfsartefakte beinhalten die Architektur des Systems und spezifizieren die logische oder technische Struktur. Im Rahmen des REMsES-Projektes wurde ein prototypisches Tool entwickelt, das alle Artefakte verwaltet und miteinander verknüpft.

Bewertung: Der Ansatz Requirements-Engineering softwareintensiver, eingebetteter Systeme bildet ein sehr komplexes Gesamtverfahren mit insgesamt neunzehn Artefakten. Die Anzahl der Elemente und Artefakte inklusive deren Verknüpfung ist ohne ein Tool nur schwer beherrschbar, da vorgesehen ist, jedes einzelne Element eines Artefaktes mittels eines Steckbriefes zu beschreiben. Zudem muss ohne ein Tool eine Änderung über alle Artefakte und Elemente hinweg händisch überprüft werden. Die stark funktionale Sichtweise des REMsES sieht darüber hinaus nicht vor, Lessons Learned für mechatronischer Systeme zu integrieren.

3.1.3 SPES 2020

Das Projekt Software Platform Embedded Systems 2020 fokussiert auf die Professionalisierung der domänenübergreifenden, modelgestützten Entwicklung von sogenannten embedded systems [PHA+07]. Die Erarbeitung der SPES 2020-Methode fand im Rahmen eines BMBF-Projektes statt. Kernelement des Vorgehens ist das SPES Modellierungs-Rahmenwerk. Dieses umfasst mehrere Modelltypen, Sichtweisen, Gütekriterien und Vorgehen zum Informationsübertrag der verschiedenen Modelle. Ziel des Gesamtverfahrens ist die Erarbeitung von Anforderungen und die Modellierung der technischen Umsetzung von embedded systems. Embedded systems sind Elemente, die aus Software und der dazugehörigen Hardware und Elektronik bestehen. Da das SPES 2020 einen ganzheitlichen und domänenübergreifenden Ansatz bietet, wird auch die Systemebene bezüglich Anforderungen untersucht.

Die Sichtweisen des SPES 2020 sind: Anforderungen, Funktionen, Logik und Technik. Jede dieser Sichtweisen beinhaltet mehrere Methoden zur Erarbeitung der einzelnen Sichtweisen (Bild 3-3). Ferner unterstützt das Gesamtverfahren durch gezielte Fragestellungen/Gütekriterien bei der Erstellung der Modelle. Die einzelnen Sichtweisen und deren Methoden sind im Folgenden aufgeführt.

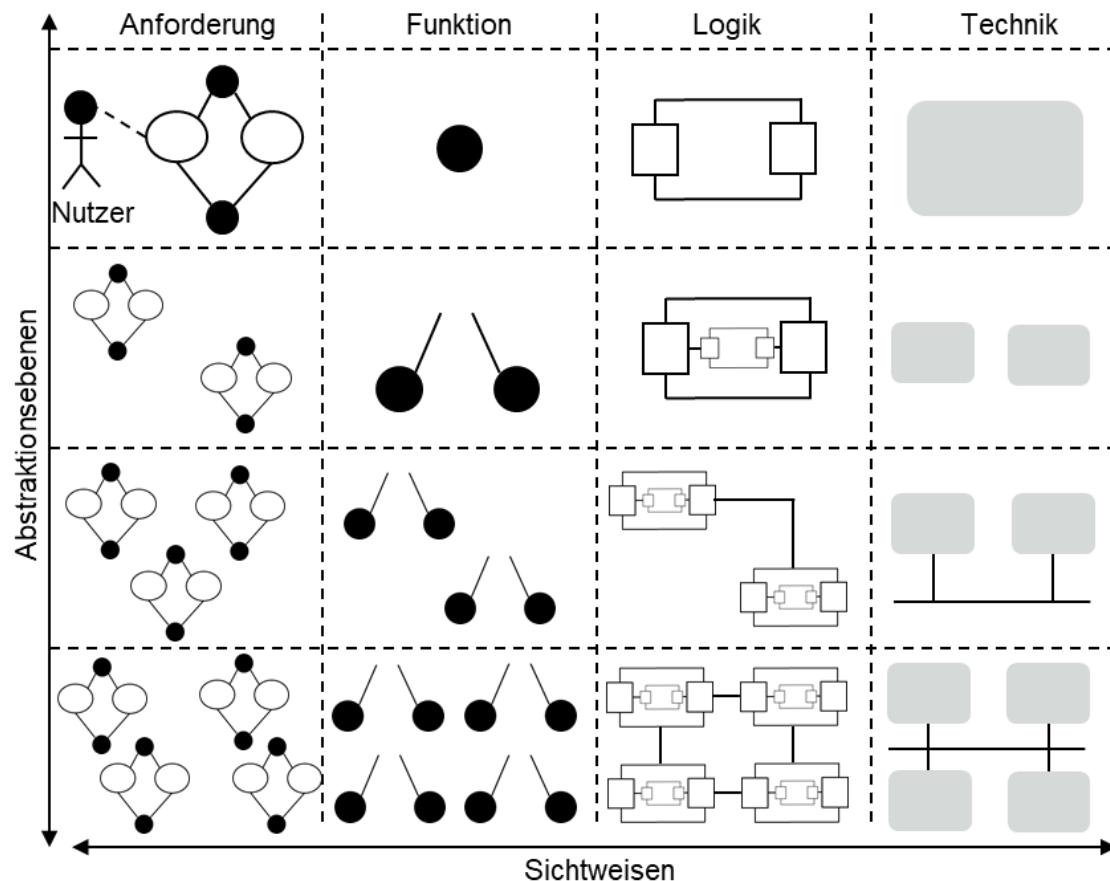


Bild 3-3: Sichtweisen des SPES 2020 [PHA+07].

Anforderungssichtweise: Ziel der Anforderungssichtweise ist die Erarbeitung von Anforderungen an ein embedded system. Dies geschieht mittels eines vierstufigen iterativen Vorgehens. Der erste Schritt des Vorgehens ist die Systemumfeld- oder Systemkontextanalyse. Hierbei wird das Systemumfeld modelliert. Dies geschieht mittels einer Darstellung in SysML. Darauffolgend werden die Ziele des Systems modelliert. Die Ziele leiten sich hierbei von den Anforderungen der Stakeholder an das System ab. Die Modellierung erfolgt hierbei durch KAOS²³-Zioldiagramme. Durch eine schrittweise Ableitung des Hauptziels des Systems über und/oder-Verknüpfungen werden feingranularere Ziele erarbeitet. Es entsteht eine hierarchische Darstellung der Ziele aller Stakeholder. Anschließend werden Szenarien modelliert. Diese Szenarien werden mittels SysML-Sequenzdiagrammen visualisiert. Die Szenarien dienen dazu, die Ziele des Systems zu erfüllen. Abschließend, sobald jedes Ziel durch ein Szenario abgebildet wurde, werden die lösungsorientierten Anforderungen modelliert. Diese beinhalten die drei Modelle Verhalten, Struktur und Betrieb. Das Verhaltensmodell bildet hierbei ein SysML-

²³ KAOS ist eine Modellierungssprache zur Zielmodellierung. KAOS steht für Knowledge Acquisition in Automated Specification. Die Sprache wurde an der Universität von Oregon und der Universität von Louvain entwickelt [DVF93].

Aktivitätsdiagramm. Die Struktur wird mittels eines SysML-Blockdiagramms visualisiert. Das Betriebsmodell wird mittels eines SysML-Aktivitätsdiagramms dargestellt. Das SPES 2020-Vorgehen unterstützt den Anwender durch verschiedene Regeln. So gibt es unter anderem Regeln für den Modellübertrag. Beispielsweise muss ein Benutzer im Szenariomodell auch im Kontextmodell zu finden sein und umgekehrt. Darüber gehend hinaus muss jedes Szenario mindestens einem Ziel zugeordnet sein und umgekehrt. Zudem gibt es ein Regelwerk für jede Individualmethode, die den Benutzer bei der Erstellung unterstützen sollen. So wird beispielsweise bei der Zielmodellierung hinterfragt, ob alle Ziele aller Stakeholder erfasst wurden. Beim Umfeldmodell wird mittels Fragen überprüft, ob alle Benutzer, die vom System Ein- oder Ausgaben benötigen, betrachtet wurden.

Funktionale Sicht: Der Anforderungssicht schließt sich die funktionale Sichtweise an. Hierbei gibt es zwei Modellarten, die Funktions-Black-Box und die Funktions-White-Box. Zunächst werden aus dem lösungsorientierten Anforderungsmodell Benutzerfunktionen abgeleitet. Aus dem Verhaltensmodell des Systems werden Funktionen abgeleitet, die mit dem Ein- und Ausgängen des Kontextmodells konform sind. Sobald mehrere Benutzerfunktionen abgeleitet wurden, werden diese in einer hierarchischen Darstellung strukturiert. Folgend hierauf werden den hierarchisch strukturierten Benutzerfunktionen Schnittstellen für Eingänge und Ausgänge zugeordnet. Nach Identifizierung der Abhängigkeiten der Funktionen wird das Verhaltensdiagramm der Anforderungssichtweise erweitert. Abschließend werden die Benutzerfunktionen mittels der Funktions-White-Box in Unterfunktionen dekomponiert.

Logische Sicht: Zum Aufbau der logischen Sicht dient die funktionale Sicht des Systems. Zunächst werden die Systemgrenzen der Funktions-Black-Box übernommen. Daraufhin wird das System in logische Komponenten dekomponiert. Es bildet sich ein Baum mit logischen Komponenten. Kommunizieren zwei dieser Komponenten, werden diese anschließend mittels Kanälen verbunden. Abschließend wird das Verhalten jeder logischen Komponente spezifiziert.

Technische Sicht: Wurde das logische Modell finalisiert, wird die technische Sicht erarbeitet. Hierbei wird zunächst die Hardware-Architektur definiert. Diese wird anschließend in Berechnungsressourcen und Kommunikationsressourcen unterteilt. In jeder Berechnungsressource werden die Arbeitsschritte und die Ressourcenverwaltung inklusive Verteilungsrichtlinien modelliert und verbunden. Abschließend werden den Signalen und Nachrichten und Arbeitsschritten Ausführungszeiten und Ports zugewiesen.

Bewertung: Der Ansatz SPES 2020 ist vor den Anforderungen dieser Arbeit in mehreren Bereichen kritisch zu sehen. Zunächst werden zur Modellierung der Anforderungssichtweise verschiedene Anforderungsermittlungsfokus eingesetzt. Dies ist, wie schon in Kapitel 2.4.4 beschrieben, für Anwender ohne ausgeprägte Erfahrung im Bereich Anforderungsermittlung schwer durchführbar. SPES 2020 sieht vor, die Einzelsichten zu

verknüpfen. Dies muss vom Anwender händisch durchgeführt werden. Die Verknüpfung wird graphisch repräsentiert durch ein sogenanntes Mapping-Element (Bild 3-4).

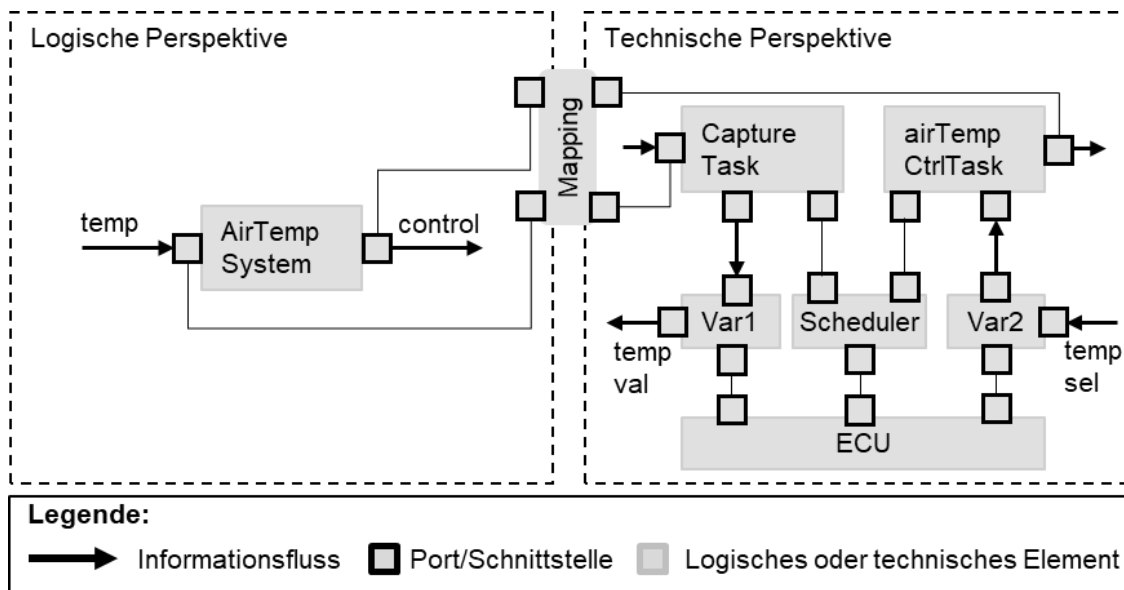


Bild 3-4: Darstellung der Verknüpfung der logischen und technischen Sicht in SPES 2020 mithilfe eines Mapping-Elements

Die Vielzahl der benötigten Sichtweisen ist ohne den Einsatz eines Softwarewerkzeuges schwierig zu beherrschen. SPES 2020 beinhaltet Gütekriterien, die die Anwendung der Einzelmethoden bewerten. Diese sind für die Bewertung der Methodendurchführung jedoch nicht durchgängig geeignet. Bei der Zielmodellierung wird beispielsweise hinterfragt, ob die Ziele aller relevanten Stakeholder erfasst sind. Diese Bewertung kann bei dem Vorhandensein neuer und teils unbekannter Stakeholdern nicht durchgeführt werden.

3.1.4 COSMOD-RE

COSMOD-RE (Scenario and Goal based System Development Method) ist ein Ansatz, der auf ziel- und szenariobasierten Artefakten das Hardware/Software Codesign bei der Entwicklung eingebetteter Systeme unterstützt [Poh07]. Kern des Vorgehens ist die Definition von Anforderungs- und Entwurfsartefakten auf verschiedenen Abstraktionsebenen. Die Abstraktionsebenen sind: System, funktionale Dekomposition, Hardware/Software Partitionierung und Deployment. Jede dieser Abstraktionsebenen konkretisiert den Entwicklungsgegenstand zunehmend. Auf jeder Abstraktionsebene finden sich verschiedene Artefakttypen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Artefakte des COSMOD-RE

Artefakt	Beschreibung
Zielmodell	Definiert die Ziele, die das System erfüllen soll, inklusive einer hierarchischen Dekomposition der Ziele.
Szenariomodell	Definiert eine Menge von Abfolgen von Interaktionen und setzt diese zur Systemumgebung in Beziehung.
Funktionsmodell	Definiert die Funktionen, die das geplante System seiner Umgebung bereitstellen soll. Hierzu werden die Eingabe- und Ausgabedatenflüsse der einzelnen Funktionen sowie wesentliche Datenspeicher des Systems definiert.
Datenmodell	Definiert, welche Informationen über die Umgebung im System abgebildet werden sollen und strukturiert diese.
Verhaltensmodell	Definiert die Betriebsmodi des Systems und Ereignisse, die zum Wechsel des Betriebsmodus führen.
Architekturmodell	Definiert wesentliche Strukturen des geplanten Systems wie Schnittstellen zu anderen Systemen. Weiter erfolgen eine Dekomposition des Systems sowie die Darstellung von Kommunikationsverbindungen zwischen den Systemkomponenten.

COSMOD-RE sieht vor, zunächst (lösungsneutrale) Anforderungen zu identifizieren und hierauf basierend einen ersten groben Architekturvorschlag zu entwerfen. Nachdem die Problemstellung mittels lösungsneutraler Ziel- und Szenariomodelle herausgearbeitet und der grobe Architekturvorschlag erarbeitet wurde, erfolgt die Spezifikation weiterer detaillierter, lösungsorientierter Anforderungen. Dies erfolgt iterativ, indem die Ziel- und Szenariomodelle mit den Architekturmodellen abgeglichen werden. Jedes der eingesetzten Modelle beinhaltet ein Diagramm und eine textuelle Detailbeschreibung der einzelnen Modellelemente.

Bewertung: Das COSMOD-RE bietet insgesamt sechs Artefakte auf jeweils vier Abstraktionsebenen. Die Abstraktionsebenen sind an den Entwicklungsprozess eingebetteter Systeme angelehnt und werden erst im Laufe der Entwicklung konkretisiert. Aufgrund des Fokus auf eingebettete Systeme stehen Anforderungen an die Software im Mittelpunkt, während die Hardwarekomponenten meist als gegeben angenommen werden. Eine Beherrschung der Artefakte des COSMOD-RE ist aufgrund der Vielzahl an Artefakten und deren Aufteilung in Diagramm und textuelle Detailbeschreibung ohne eine tooltechnische Umsetzung nicht realisierbar. Als Modellierungssprache setzt COSMOD-RE auf die SysML.

3.2 Artefakt- und Anforderungserfassung in der Produktentwicklung

Im Folgenden werden die am häufigsten eingesetzten Ansätze aus dem Bereich der Produktentwicklung hinsichtlich ihrer Eignung zur Artefakt- und Anforderungserfassung untersucht.

3.2.1 Vorgehen der Produktentwicklung

Grundlage zur Auswahl der bewerteten Ansätze sind die Literaturrecherchen von AHRENS und BERKOVICH [Ahr00] [Ber12]. Hierbei werden Ansätze berücksichtigt, die sich grundsätzlich mit dem Thema Anforderungen, deren Erfassung und weiteren Verwendung im Produktentwicklungsprozess beschäftigen. Die Ansätze im Einzelnen:

- Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung nach PAHL, BEITZ und FELDHUSEN [PBF+07]
- Integrierte Produktentwicklungsmethodik nach EHRENSPIEL [Ehr03]
- Produktkonstruktion und -entwicklung nach ULRICH und EPPINGER [UE03]
- Ganzheitliche Konstruktion nach PUGH [Pug96]
- Konstruieren mit Konstruktionskatalogen nach ROTH [Rot94]
- Entwicklung und Marketing neuer Produkte nach URBAN und HAUSER [UH80]
- Bildung von Produktanforderungen nach OTTO [Ott96]
- Methodische Entwicklung technischer Produkte nach LINDEMANN [Lin07]
- 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER [GP14]

Der Ansatz von LINDEMANN, dieser hat eine andere Basis (Problemlösungszyklus) als die anderen Vorgehen, und der Ansatz von GAUSEMEIER, als einer der umfassendsten Ansätze, werden im Anschluss zur Betrachtung der übrigen Ansätze näher ausgeführt und bewertet. Die Ansätze von GAUSEMEIER und LINDEMANN stellen zudem zwei der jüngsten Ansätze aus dem Bereich der Produktentwicklung und Produktentstehung dar.

Die Mehrzahl der oben aufgeführten Vorgehen sieht den Kunden als wichtigsten Stakeholder an. Dieser wird auf unterschiedliche Weise integriert. Die Spanne reicht hierbei von einer aktiven Einbeziehung des Kunden mittels Interviews, Beobachtung oder Workshops [UE03] [UH80] [Ott96] [Ehr03], bis hin zu einem ohne den Kunden durchgeführten methodischen Vorgehen mittels beispielsweise Trendanalyse [PBF+07] [Pug96]. Lediglich ROTH bezieht den Kunden als Stakeholder nicht in die Entwicklung mit ein [Rot94].

Eine der Hauptaufgaben im Bereich der Anforderungserfassung ist das Übersetzen von

Stakeholderanforderungen in technische Anforderungen. Hierfür bieten die Vorgehensmodelle ebenfalls Herangehensweisen. Lediglich bei zwei Vorgehen findet sich hierzu kein Vorgehen [Pug96] [Rot94]. Die in den anderen Vorgehensmodellen beschriebenen Herangehensweisen stützen sich auf eine Matrix zur Übersetzung der Kundenanforderungen in technische Anforderungen. Diese Methode leitet sich aus dem sogenannten Quality Function Deployment (QFD) ab. Da diese Methode in der Mehrzahl der Vorgehen eine zentrale Stellung innehat, wird diese in Kapitel 3.2.4 separat beleuchtet.

Zur weiteren Unterstützung der Anforderungserhebung bieten die Vorgehen nach PAHL/BEITZ/FELDUSEN, EHRENSPIEL und ROTH Checklisten und Anforderungslisten [PBF+07] [Ehr03] [Rot94]. Diese sollen den Anwender unterstützen, indem sie ihm Hinweise geben, welche Aspekte eines Entwicklungsgegenstandes zu spezifizieren sind. Im Bereich der Modellierung von Funktionen und einer Baustruktur bieten lediglich PAHL/BEITZ/FELDHUSEN und ROTH ein derartiges Vorgehen [PBF+07] [Rot94].

Aufbauend auf den oben genannten Ansätzen findet sich eine Vielzahl von Vorgehen zur Erfassung von Anforderungen in der Literatur. Diese können mit den einzelnen Ansätzen kombiniert werden und den Ermittlungstechniken für Anforderungen (Kapitel 2.4.3) zugeordnet werden. Im Bereich der Befragung mittels Interview oder Fragebogen und des Bereichs Feedback sind exemplarisch zu nennen: [AW05] [BCZ92] [CM02] [HD03] [HJD11] [KS98] [Tuu03].

Darüber hinaus kann eine Anforderungserfassung mittels gruppendynamischer Effekte durchgeführt werden. Dies wird beispielsweise aufgeführt in [BHL+11] [BPK+09][GS08] [Hum95] [RR07].

Alle der aufgeführten Vorgehen fokussieren auf die Erfassung von Kundenanforderungen. Keines der Vorgehen unterstützt die Übersetzung der Kundenanforderungen in technische Anforderungen durch eine eingängige und erfahrungsunabhängige Methode.

Bewertung: Sämtliche der oben aufgeführten Ansätze erkennen die Wichtigkeit des Themas Anforderungen und deren Erfassung für die Produktentwicklung an. Jedoch bietet keiner der Ansätze eine vollständige Gesamtmethodik zur Durchführung der Aktivitäten im Bereich der Anforderungserfassung an. Insbesondere für Anwender, die nicht erfahren in diesem Thema sind, bilden alle Vorgehen keine vollständige Hilfestellung. Dies beginnt bereits mit der Auswahl der Stakeholder. In vielen Vorgehen wird lediglich der Kunde und keine weiteren relevanten Stakeholder wie die Produktion integriert. Auch die hierauf aufbauenden Ansätze zur Erfassung von Anforderungen bieten dem unerfahrenen Anwender keinerlei Unterstützung. Auch das Thema Modellierung von Funktionen und der Baustruktur des Entwicklungsgegenstandes ist unterrepräsentiert. Da die Vielzahl der Vorgehen eine Ableitung der technischen Anforderungen mittels der Methode Quality Function Development vollziehen, erfolgt die Bewertung dieser Methode gesondert.

3.2.2 Münchner Vorgehensmodell

Das Münchner Vorgehensmodell nach LINDEMANN basiert auf den bekannten Vorgehensmodellen zur Problemlösung [Lin07]. Es wurde mit Hilfe verschiedener Forschungsprojekten und Einbindung der industriellen Anwendung erweitert. Im Kern basiert das Münchner Vorgehensmodell auf den drei Hauptschritten zur Problemlösung: Problem klären, Lösungsalternativen generieren und Entscheidung herbeiführen. Diese wurden in insgesamt sieben kleinere Einzelschritte aufgeteilt (Bild 3-5).

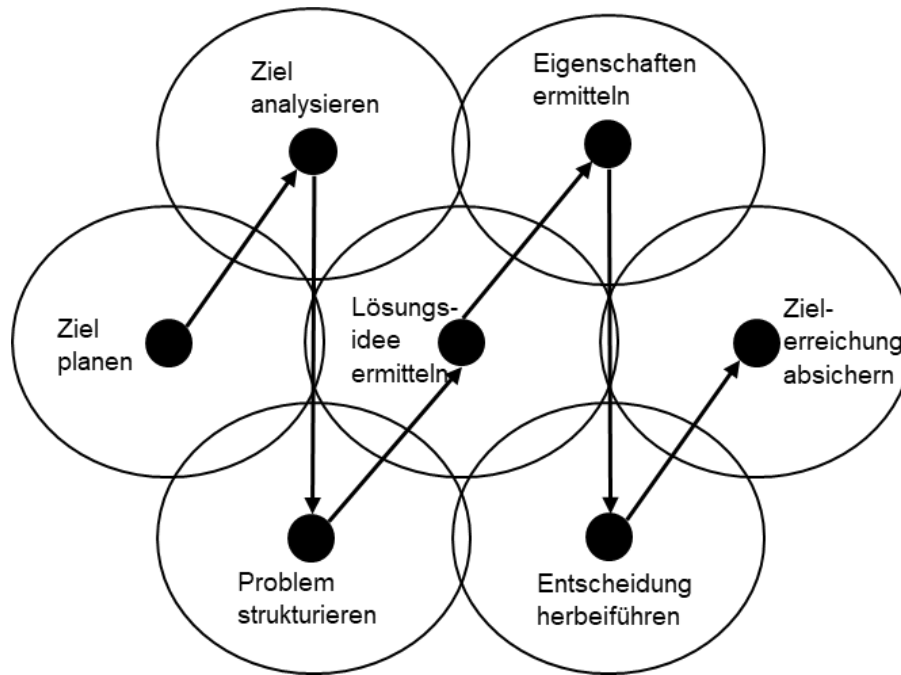


Bild 3-5: Münchner Vorgehensmodell [Lin07]

Die Phasen „Ziel planen“, „Ziel analysieren“ und „Problem strukturieren“ sind dem Hauptschritt „Problem klären“ zugeordnet. Das Münchner Vorgehensmodell kann in beliebiger Reihenfolge durchschritten werden. Es ergibt sich aber eine Standardreihenfolge zur Durchführung eines Entwicklungsprozesses und zur Unterstützung eines Entwicklers mit wenig Methodenerfahrung.

Mittels des ersten Elementes **Ziel planen** wird die Ist-Situation analysiert und es werden konkrete Maßnahmen abgeleitet. Hierbei werden die für die Produktentwicklung relevanten Faktoren Markt, Kunde, Wettbewerb, Politik, Produkt oder Unternehmen untersucht. Es ergibt sich eine strategische Produkt- und Prozessplanung.

Im zweiten Element **Ziel analysieren** wird der gewünschte Zielzustand geklärt und beschrieben. Hierbei müssen konkrete und detaillierte Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt definiert werden. Zudem müssen bei der Vielzahl der entstehenden Anforderungen die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen identifiziert werden. Ergebnis dieses Elementes sind Anforderungen, die in geeigneter Form dokumentiert sind.

Sobald das Ziel bekannt ist, wird mittels des Elements **Problem strukturieren** der Handlungsschwerpunkt und eine Fokussierung bei der Lösungssuche erarbeitet. Hierzu muss das System abstrahiert dargestellt werden. Dies ist nötig, um die Betrachtungskomplexität des zu entwickelnden Systems zu reduzieren und eine Aufgliederung in Teilsysteme zu ermöglichen. Durch Einbeziehung aller zur Verfügung stehenden Gestaltungsfreiräume und den wichtigsten Stärken und Schwächen des behandelten Systems entsteht ein Problemmodell.

Im Element **Lösungsidee ermitteln** wird nach vorhandenen und neuen Lösungen zur Bewältigung des Problemmodells gesucht. Durch Evaluation der Vielzahl an Lösungsideen mit ihren individuellen Teilproblemen wird die beste Lösung erarbeitet. Hierbei gilt es verschiedene Lösungsvarianten zur optimalen Gesamtlösung zu kombinieren. Dies geschieht beispielsweise auf der Ebene der Wirkprinzipien

Anschließend wird die optimale Gesamtlösung im Element **Eigenschaften ermitteln** hinsichtlich ihrer Merkmale und Ausprägung beschrieben. In frühen Phasen der Entwicklung ist dies nur schwer möglich. Mit zunehmendem Konkretisierungsgrad steigt jedoch die Möglichkeit, die Produkteigenschaften zu erfassen. Die Eigenschaftsermittlung ist ein wichtiger Schritt, um festzustellen, ob das zu entwickelnde System die geforderten Anforderungen erreicht.

Mittels des Elementes **Entscheidung herbeiführen** werden die Lösungsalternativen bewertet. Eine Lösungsidee wurde auf die grundsätzliche Eignung, die Anforderungen zu erfüllen, hin abgesichert. Hierbei wird eine Bewertung auf mehreren Ebenen durchgeführt. Diese Ebenen umfassen beispielsweise Gestaltdetails oder das grundsätzliche Wirkprinzip. Bei der Vielzahl der zu treffenden Entscheidungen können mehrere von Risiken auftreten. Diese können unvorhergesehene oder ungewollte Effekte auf das Gesamtprodukt nach sich ziehen.

Die Minimierung der Risiken bei der Entscheidung geschieht in der Phase **Zielerreichung absichern**. Die Absicherung der Zielerreichung sollte möglichst früh im Entwicklungsprozess begonnen werden. Hierdurch können Risiken, die zu schwerwiegenden Folgen oder Fehlauslegungen führen können, frühzeitig identifiziert werden.

Bewertung: Das Münchener Vorgehensmodell basiert auf dem Problemlösungszyklus. Die erste Phase des Problemzyklus hat die Aufgabe, das Ziel zu klären. In der Neuentwicklung mechatronischer Systeme wird das Ziel eines Systems in Form von Anforderungen definiert. Um einen Problemzyklus erfolgreich und stringent zu durchlaufen, ist es daher nötig, frühzeitig alle benötigten Anforderungen zu kennen. Das Münchener Vorgehensmodell sieht dies nach einer Analyse verschiedener Einflussgrößen vor. Daraufhin werden die Anforderungen auf ihre gegenseitige Beeinflussung untersucht.

Zu Beginn der Entwicklung eines mechatronischen Systems im Automobil sind alle zu erfüllenden Anforderungen weitestgehend unbekannt. Eine Analyse der Einflussgrößen

Markt, Kunde, Wettbewerb, Politik, Produkt oder Unternehmen führt nicht zu einer ausreichenden technischen Spezifikation eines mechatronischen Systems mittels Anforderungen. Es ergibt sich eine unsichere Anforderungslage. Ein Problemzyklus mit einer anfänglich nicht sicheren Anforderungslage kann nicht stringent durchlaufen werden. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, das Münchener Vorgehensmodell stringent zu durchlaufen. Dies hat mehrere Iterationsschleifen und Sprünge im Vorgehensmodell zur Folge. Dies vermindert die Effizienz. Auch Gütekriterien, die eine Validierung der Einzelschritte und Phasen zulassen, werden im Münchner Vorgehensmodell nicht vorgestellt.

3.2.3 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER

Das 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER beschreibt den kompletten Produktentstehungsprozess von der Produkt- und Geschäftsidee bis zur Realisierung und zum Serienanlauf [GP14]. Der Gesamtprozess untergliedert sich in drei einzelne Zyklen: Die „Strategische Produktplanung“, die „Produktentwicklung“ und die „Produktionssystementwicklung“ (Bild 3-6).

Von der Geschäftsidee...

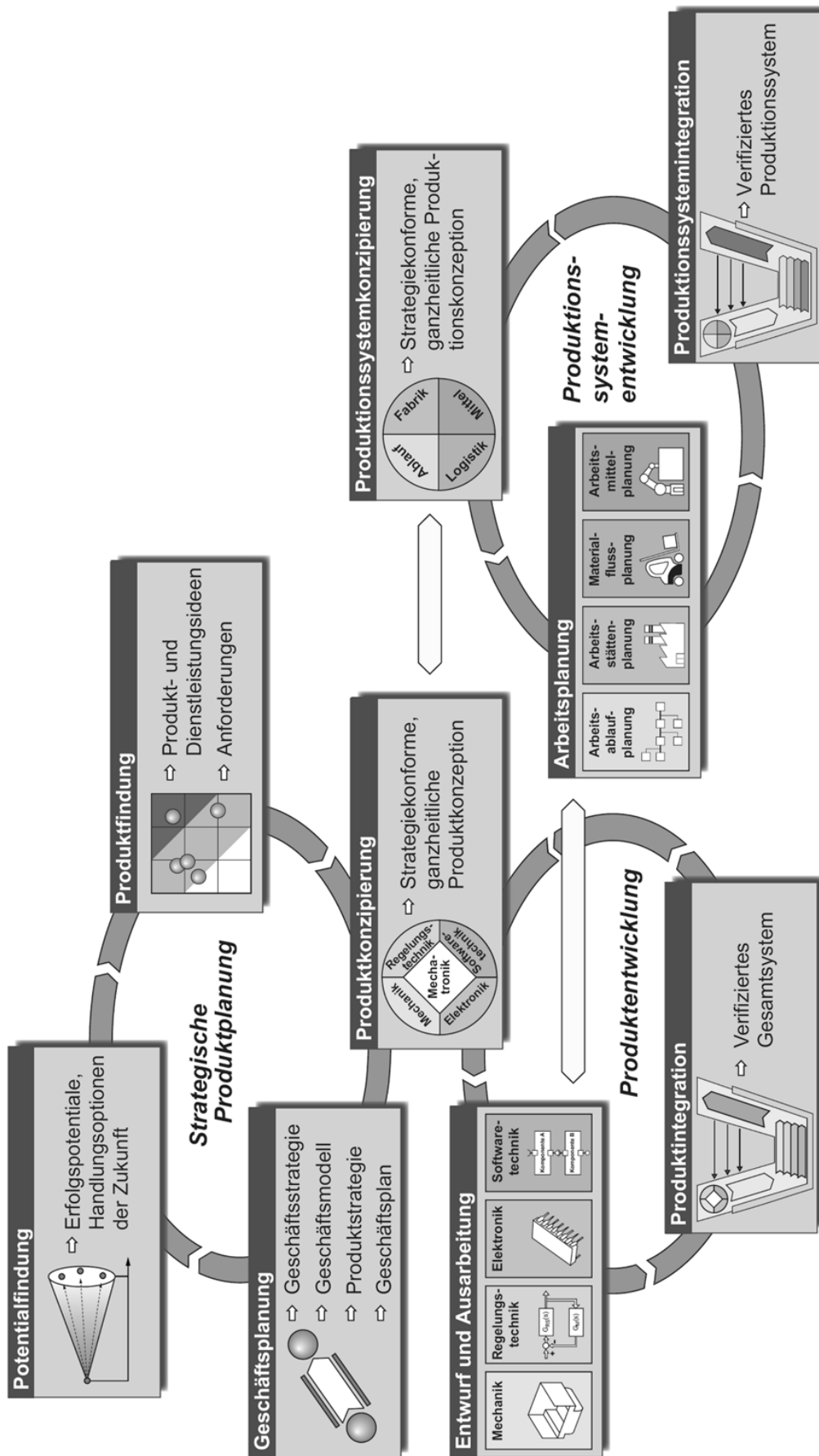


Bild 3-6: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung [GP14]

Erster Zyklus, die strategische Produktplanung: Im ersten Zyklus lassen sich drei Aufgabenbereiche identifizieren. In der Potentialfindung werden Erfolgspotentiale und Handlungsoptionen der Zukunft identifiziert. Mittels des Aufstellens und Analysierens von Szenarien, Markt- und Trendanalysen werden Erfolgspotentiale und Handlungsoptionen methodisch strukturiert erarbeitet. Der Bereich der Produktfindung umfasst Hilfsmittel wie das Laterale Denken nach DE BONO, TRIZ oder Technologie-Roadmaps, um die gefundenen Potentiale in Produkt- und Dienstleistungsideen zu transferieren. Die Geschäftsplanung legt die unternehmerischen Strategien und den Geschäftsplan fest. Hierdurch wird identifiziert, auf welchen Märkten, in welchen Segmenten und zu welchem Zeitpunkt ein Unternehmen tätig wird.

Zweiter Zyklus, die Produktentwicklung: Die Produktentwicklung umfasst die Aufgabenbereiche Produktkonzipierung, Entwurf und Ausarbeitung und die Produktintegration. Die Produktkonzipierung verbindet den ersten und zweiten Zyklus. In diesem Bereich werden die prinzipiellen Lösungen und die daraus resultierenden funktionalen Anforderungen an ein zu entwickelndes mechatronisches System erarbeitet. Basierend hierauf werden anschließend die disziplinspezifischen Entwürfe erarbeitet. Nach der erfolgreichen Umsetzung des Entwicklungsgegenstandes in den einzelnen Disziplinen findet die Integration zum Gesamtsystem statt. In diesem Aufgabenbereich findet sich auch die Absicherung gegen die Anforderungen, sodass ein verifiziertes Gesamtsystem vorliegt.

Dritter Zyklus, die Produktionssystementwicklung: Dieser Zyklus steht in enger Verbindung mit dem zweiten Zyklus. Nur hierdurch kann sichergestellt werden, dass eine optimale Lösung aus Produkt und dessen Produktion entwickelt wird. Die Aufgabenbereiche des Zyklus Produktionssystementwicklung sind die Konzipierung, die Arbeitsplanung und die Produktionssystemintegration. Das Ergebnis dieses Zyklus sind alle produktionsrelevanten Einflüsse wie beispielsweise Ablaufplanung und logistische Belange.

Bewertung: Das 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER ist so aufgebaut, dass eine Vielzahl der relevanten Stakeholder in die Produktentstehung einbezogen werden. Insbesondere das Marketing, der Vertrieb und die Produktion haben einen hohen Stellenwert. Die Stakeholder Marketing und Vertrieb sind im ersten Zyklus vertreten, die Produktion im dritten.

Zur Beschreibung des Produkts- und Produktionskonzeptes wird die Spezifikationstechnik CONSENS (CONceptual design Specification technique for Engineering of complex Systems) (vgl. Kapitel 3.4.3) eingesetzt. Eine vollständige Anforderungsliste inklusive Spezifikation liegt nach Abschluss des ersten Zyklus und zu Beginn der Auslegung des Produktes nicht vor (Übergang Zyklus 1 in Zyklus 2). Im Aufgabenbereich Produktfindung werden Anforderungen als Kernarbeitspaket erwähnt, hierunter sind aber keine technischen Anforderungen, sondern Anforderungen auf Markt- oder Stakeholderebene zu verstehen. Der zweite Zyklus der Produktentwicklung muss mehrfach durchlaufen

werden, um alle technischen Anforderungen an ein mechatronisches System zu erfassen. Dies ist zu vergleichen mit einem mehrfachen Durchlauf des Makrozyklus des V-Modells [VDI2206]. Ein mehrfaches Durchlaufen ist in der Automobilentwicklung vor dem Hintergrund der Lastenhefterstellung nicht realisierbar. Das 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER beschreibt die Anforderungserhebung an ein mechatronisches System nur am Rande.

3.2.4 QFD

Quality Function Deployment (QFD) stammt ursprünglich aus dem japanischen Raum und wurde von Yoji Akao in den 1960er Jahren entwickelt [Aka92]. Ziel der QFD ist die Anforderungen von Kunden zielgerichtet in die Entwicklung und Auslegung von technischen Systemen zu integrieren. Der Qualitätsbegriff wird in der QFD als die wahrgenommene Ausprägung einer Eigenschaft eines technischen Systems verstanden.

Kernelement von Quality Function Deployment ist das sogenannte House of Quality (HoQ). In einem HoQ finden sich mehrere Tabellen und Matrizen zur Darstellung von Korrelationen. Initial werden die erfassten Kundenanforderungen in das HoQ eingetragen. Diese stellen die Qualitätsanforderungen und geforderten Eigenschaften des Systems aus Kundensicht dar. Anschließend werden Merkmale aufgestellt, die das zu entwickelnde System hinreichend beschreiben. Durch eine Korrelation der Qualitätsanforderungen mit den Systemmerkmalen lässt sich eine gewichtete Reihenfolge der im System abzubildenden und zu verbessernden Merkmale ableiten. Das gesamte Vorgehen der QFD ist in der ISO-Norm 16355 [ISO16355] oder auch der VDI-Norm 2247 [VDI2247] beschrieben. Es gliedert sich in die folgenden neun Schritte:

Die Befüllung des House of Quality erfolgt durch ein interdisziplinäres Entwicklerteam und der Integration von Experten aus den Bereichen Produktion, Marketing, Qualitätsmanagement und Kundendienst. Ziel ist, dass nach einer vollständigen Befüllung des House of Quality, ein übersichtlicher Zusammenhang aus technischen Merkmalen, Kundenanforderungen und Wettbewerbssystemen entsteht.

Bewertung: Das Quality Function Deployment bietet mit seiner Kernmethode dem House of Quality und einer strukturierten Reihenfolge von Einzelaktivitäten ein einfach durchzuführendes Gesamtverfahren, um Kundenanforderungen auf technische Merkmale abzubilden. Je komplexer der Entwicklungsgegenstand ist, umso komplexer ist das Gesamtverfahren. Zur Ermittlung der Kundenanforderungen bietet die QFD keine eigene Vorgehensweise, sondern verweist auf Ansätze zur Anforderungserhebung (vgl. Kapitel 2.4.2). Zudem bietet das Gesamtverfahren keinerlei Gütekriterien, anhand derer die einzelnen Teilergebnisse auf Vollständigkeit und Richtigkeit hin bewertet werden können. Wird die QFD zur Entwicklung eines völlig neuartigen Systems herangezogen, lassen sich mangels Wettbewerbsprodukten keine Wettbewerbsanalysen im HoQ durchführen.

Dies führt dazu, dass wichtige Eingangsgrößen für das Gesamtverfahren fehlen. Abgesehen von einem einfach durzuführenden Gesamtverfahren benötigt die QFD Fachexperten, die alle Kundenanforderungen ableiten, die Beeinflussung von technischen Merkmalen bewerten und die vollständige und qualitativ hochwertige technische Anforderungen aus dem HoQ ableiten. GEISINGER schreibt hierzu:

„Als Hauptgründe für den Abbruch von QFD-Aktivitäten werden die hohe Komplexität und das Fehlen der Kundenanforderungen genannt. Die Vielfalt der Matrizen und Arbeitsblätter führt schnell zu einer Unübersichtlichkeit und damit Orientierungslosigkeit des Anwenders und bedingt einen erfahrenen QFD-Moderator zum Gelingen von QFD-Projekten.“ [Gei06]

3.3 Ansätze und Vorgehen aus dem Umfeld der Automobilindustrie

Im folgenden Kapitel werden Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Anforderungsermittlung im dedizierten Bereich Automobilindustrie beschäftigen. Ferner gibt es noch eine Vielzahl von Arbeiten aus anderen Industriezweigen zum Thema Anforderungsermittlung. Hierzu zählen unter anderem: Medizintechnik [Mul04], Haushaltsgeräte [Jun06], soziotechnische Systeme [Hof14], Robotik [Bru07], Software [Dei01], SPS-Steuerungen [Bat06], Produktionsanlagen [Sch08]. Lediglich in der Automobilindustrie ist es nötig, in sehr frühen Phasen der Entwicklung ein Lastenheft und somit valide Anforderungen zu spezifizieren. Dies zeigt der Vergleich zu den Arbeiten aus anderen Industriezweigen. Bei diesen werden die Anforderungen über den gesamten Entwicklungsprozess iterativ ausdetailliert. Aufgrund dieses signifikanten Unterschiedes werden die Arbeiten aus den anderen Industriezweigen nicht gesondert aufgeführt und bewertet.

3.3.1 Entwerfen von Fahrzeugkonzepten nach PRINZ

In der Arbeit von PRINZ wird eine Modellbildung eines Fahrzeuges erarbeitet [Pri10]. Dieses Modell beinhaltet eine Vielzahl von Parametern und deren Zusammenhänge. Durch die Zusammenhänge ist ein Einfluss der einzelnen Parameter aufeinander abgebildet. Neben geometrischen Zusammenhängen werden ebenso funktionale Zusammenhänge integriert. Die Repräsentation der Zusammenhänge und der Parameter erfolgt in einer Matrixform. Ziel des Vorgehens ist es, Eigenschaften und Anforderungen an Fahrzeuge in frühen Phasen der Entwicklung zu erarbeiten. Das grundsätzliche Vorgehensmodell ist in Bild 3-7 dargestellt.

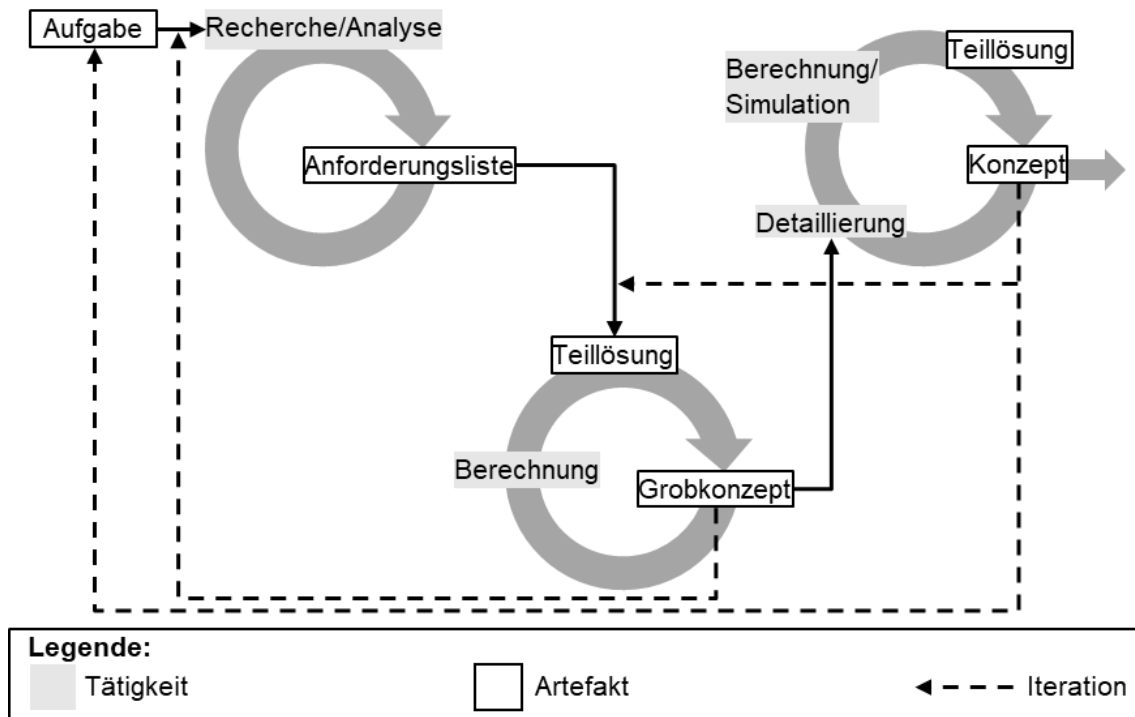


Bild 3-7: Grundsätzliches Vorgehensmodell nach PRINZ [Pri10]

Bewertung: Das Vorgehen von PRINZ wurde in der Automobilindustrie erarbeitet. Es lässt sich jedoch nicht in der gesamten Fahrzeugentwicklung auf allen Ebenen des V-Modells einsetzen. Zum einen wird in der Arbeit lediglich ein eingeschränkter Satz Parameter betrachtet (Fahrwiderstände, Gewichte und aerodynamische Eigenschaften), zum anderen haben die Parameter und Zusammenhänge den Charakter einer Anforderungsliste, die in der Automobilindustrie hinlänglich mittels der Lastenheftvorlage beschrieben ist. Der Mangel eines Systemmodells und der Mangel an Lessons Learned sorgen dafür, dass der Ansatz vor den Anforderungen dieser Arbeit einige Lücken aufweist.

3.3.2 Model-based Requirements Engineering nach VOGELSANG

Das Vorgehen nach VOGELSANG bildet Anforderungen an multifunktionale Systeme ab [Vog15]. Diese finden sich sehr häufig im Automobil. Die Validierung des Vorgehens erfolgt daher anhand von Systemen aus dem Automobilbereich.

Kern des Vorgehens ist es, Anforderungen aus den funktionalen Zusammenhängen dieser multifunktionalen Systeme abzubilden. Hierzu werden verschiedene Artefakte und Sichtweisen auf das System modelliert (Bild 3-8). Insgesamt beinhaltet das Vorgehen 14 verschiedene Artefakte.

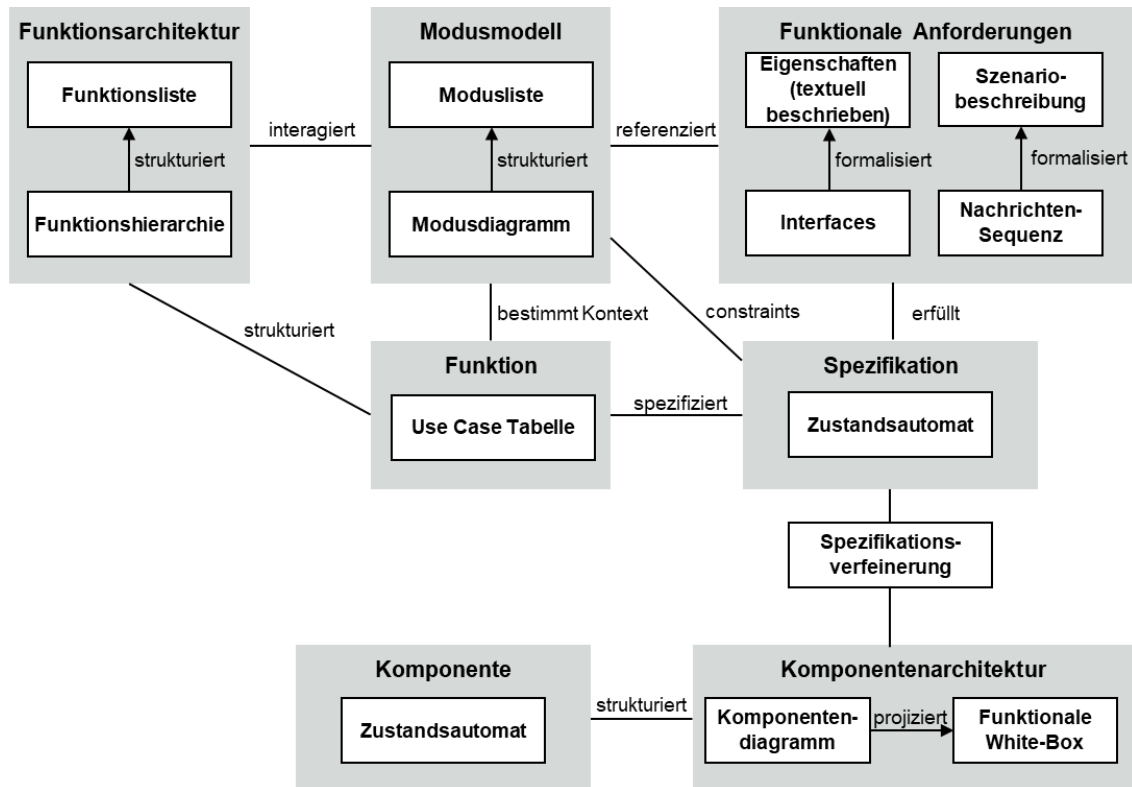


Bild 3-8: Artefaktmodell nach VOGELSANG [Vog15]

Die in der Arbeit von VOGELSANG eingeführten Modusmodelle stellen nach der SysML-Spezifikation Zustandsautomaten dar. Hierbei werden verschiedene Modi eines Systems wie beispielsweise aktiv oder inaktiv unterschieden. Das gesamte Vorgehen basiert auf einem zyklischen Wechsel einer Modellierung mit einer textuellen Beschreibung.

Bewertung: Die Arbeit von VOGELSANG beinhaltet keinerlei dedizierte Einbeziehung von Stakeholdern. Ausgehend von einem Workshop mit Entwicklern zu den Systemmodi und der Funktionsarchitektur findet eine weitere Verarbeitung der Informationen über die anderen Artefakte statt. Das Gesamtverfahren lässt sich auf verschiedene Weise durchlaufen und bietet keine eindeutige Reihenfolge der Artefakte. Darüber hinaus ist eine Beherrschung der Zusammenhänge der einzelnen Artefakte nur mittels einer tooltechnischen Repräsentation des gesamten Artefaktmodells beherrschbar. Zur flächendeckenden Anwendung in der Automobilindustrie ist das Vorgehen nicht eingängig genug, es wird ein Tool benötigt und es ist zu umfangreich. Daneben ist die Thematik nicht-funktionale Anforderungen unterrepräsentiert.

3.3.3 Anforderungsmanagement nach ALLMANN

ALLMANN stellt in seiner Arbeit ein Vorgehen zum Situations- und szenariobasierten Anforderungsmanagement in der Automotive Elektronikentwicklung vor [All08]. Grundlage bildet die Verknüpfung aus zielorientierter und szenariobasierter Anforderungserfassung. Der Gesamtprozess nach ALLMANN gliedert sich in die Aktivitäten *Szenario Erhebung*, *Szenarien analysieren*, *Szenarien Verifikation* und *Beschreibung*.

Systemanforderungen.

In der Phase Szenario Erhebung unterscheidet ALLMANN verschiedene Szenarioklassen: Kontextszenario (Beschreibung des Systems und dessen Umgebung), Nutzungsszenarien (Beschreibung der Abläufe während der Nutzung des Systems) und Detailszenarien (Analysen des Systems mit Fokus auf einzelne Aspekte der Beschreibung). Des Weiteren werden den Szenarioklassen verschiedene Szenariotypen zugeordnet, die bei der Erstellung der Szenarien unterstützen sollen. Am Beispiel Kontextszenario sind dies: Ausgangssituation, Vision, Abgrenzung, Verbesserung und Prototyp. Jeder Szenariotyp beinhaltet gezielte Fragestellungen zur Erarbeitung der Szenarien. Ergebnis dieser Phase ist eine Szenariodatenbank (Bild 3-9).

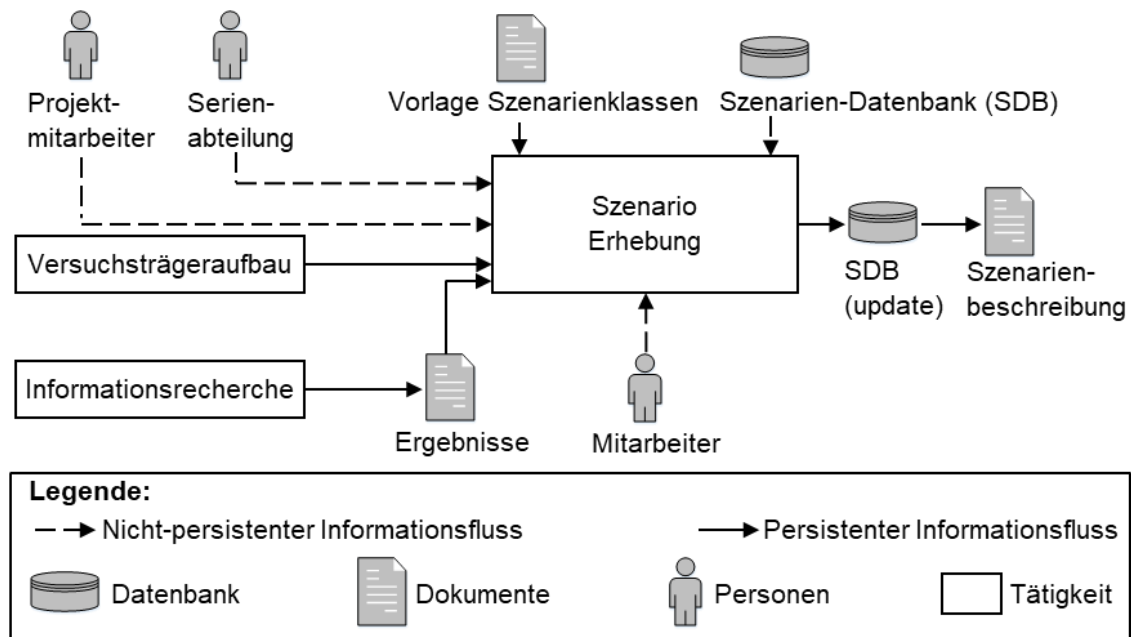


Bild 3-9: Beteiligte Personen und Eingangsgröße der Phase Szenario Erhebung nach ALLMANN [ALL08]

Nach Abschluss der Phasen *Szenarien analysieren* und *Szenarien Verifikation* können Anforderungen (funktional und nicht-funktional) abgeleitet werden. Dies geschieht nach ALLMANN aber erst später im Entwicklungsprozess, wenn Kontext, System- und Umgebungsbedingungen konkretisiert sind.

Bewertung: Das Vorgehen zum Situations- und szenariobasierten Anforderungsmanagement in der Automotive Elektronikentwicklung benötigt zwingend einen technischen Prototyp. Erst durch den Einsatz des Prototyps können nach ALLMANN in der Phase *Beschreibung Systemanforderungen* technische Anforderungen abgeleitet werden.

Die Vielzahl aus verschiedenen Szenarioklassen und -typen machen es dem unerfahrenen Nutzer zudem schwierig das vorgestellte Vorgehen durchzuführen. Ein Systemmodell wird ebenfalls in der Arbeit von ALLMANN erwähnt. Modellierungssprache ist hierbei CONSENS. Ein methodisches Vorgehen zur Übersetzung der Szenarien in ein Systemmodell findet sich bei ALLMANN nur unzureichend beschrieben.

3.3.4 Disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten nach DIEHL

DIEHL beschäftigt sich in seiner Ausarbeitung mit der systemorientierten Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme [Die09]. Bei dem vorgestellten Vorgehen werden mehrere Artefakte erarbeitet, die als Basis für Anforderungen dienen können. Die Artefakte sind im Einzelnen ein relationsorientiertes Funktionsmodell, eine Funktionshierarchie mit einer Systemelementzuordnung und eine Wirkstruktur nach CONSENS. Die einzelnen Artefakte werden im Anschluss mit einer Multidomain-Matrix verknüpft und visualisiert. Ziel ist es, eine transparente Darstellung disziplin- und domänenübergreifender Abhängigkeiten für beispielsweise Absicherungsaktivitäten zu erhalten. Eine Methode und Vorgehen zur Erarbeitung der Artefakte schlägt DIEHL nicht vor. Das Gesamtverfahren wurde im Rahmen des Kooperationsprojektes CAR@TUM zwischen der BMW Group und der TU-München validiert.

Bewertung: Das Vorgehen von DIEHL erfüllt die Anforderungen dieser Arbeit in mehreren Bereichen nicht. Obgleich das Ziel der Arbeit, die Visualisierung von Zusammenhängen, erreicht wird, ist nicht eindeutig beschrieben, wie die einzelnen Artefakte erarbeitet werden. Für die Erarbeitung der Artefakte, die eine gute Basis für Anforderungen darstellen, wird kein intuitives Vorgehen vorgestellt. Dies führt dazu, dass das Vorgehen nur bei Projekten mit Vorgängersystemen erfolgreich eingesetzt werden kann. Am Validierungsbeispiel wird dies besonders deutlich. DIEHL sagt über die Entwicklung eines komfortablen Einstiegsystems bei BMW AG:

„Da es sich bei dem Projekt um eine Forschungs- und Entwicklungsprojekt handelte, musste zunächst ein gemeinsames Systemverständnis erarbeitet werden. Dies betrifft die Definition der prinzipiell zu entwickelnden Funktionsweise und damit die Identifizierung der zu realisierenden primären Kundenfunktionen. Hierfür wurden auf Basis intensiver Recherchetätigkeiten und praktischer Versuche mit Vorgängerprodukten verschiedene strukturbezogene Funktionsmodelle erstellt. Die direkte Modellierung einer hierarchischen Funktionsstruktur hätte zu diesem Zeitpunkt das Team überfordert.“ [Die09]

3.3.5 Funktionale Sicherheit in der Konzeptphase nach Hillenbrand

In *Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen* beschreibt HILLENBRAND ein Vorgehen, mit dessen Hilfe ausgehend von Sicherheitszielen Sicherheitsanforderungen an Systeme und Komponenten einer fahrzeuginternen Architektur abgeleitet werden [Hil12]. Hierbei werden funktionale und technische Sicherheitsanforderungen dekomponiert und mittels eines Komponentennetzwerkes und eines Funktionsnetzwerkes den Komponenten und Systemen zugeordnet. Diese Netzwerke stellen ein Modell und eine Architektur der funktionalen und der physischen Zusammenhänge dar. Darüber hinaus

werden mittels der Abfrage logischer Relationen die einzelnen Netzwerke auf ihre Eignung der Erfüllung von Sicherheitszielen hinterfragt. Abschließend werden die Modelle mit impliziten Domänenwissen mittels Ontologie angereichert. Hieraus lassen sich Modell-Bibliotheken für zukünftige Entwicklungen schaffen. Wie Anforderungen in das Gesamtverfahren nach HILLENBRAND integriert sind, findet sich in dessen Metamodell. Dieses Metamodell wurde in Bild 3-10 vereinfacht dargestellt.

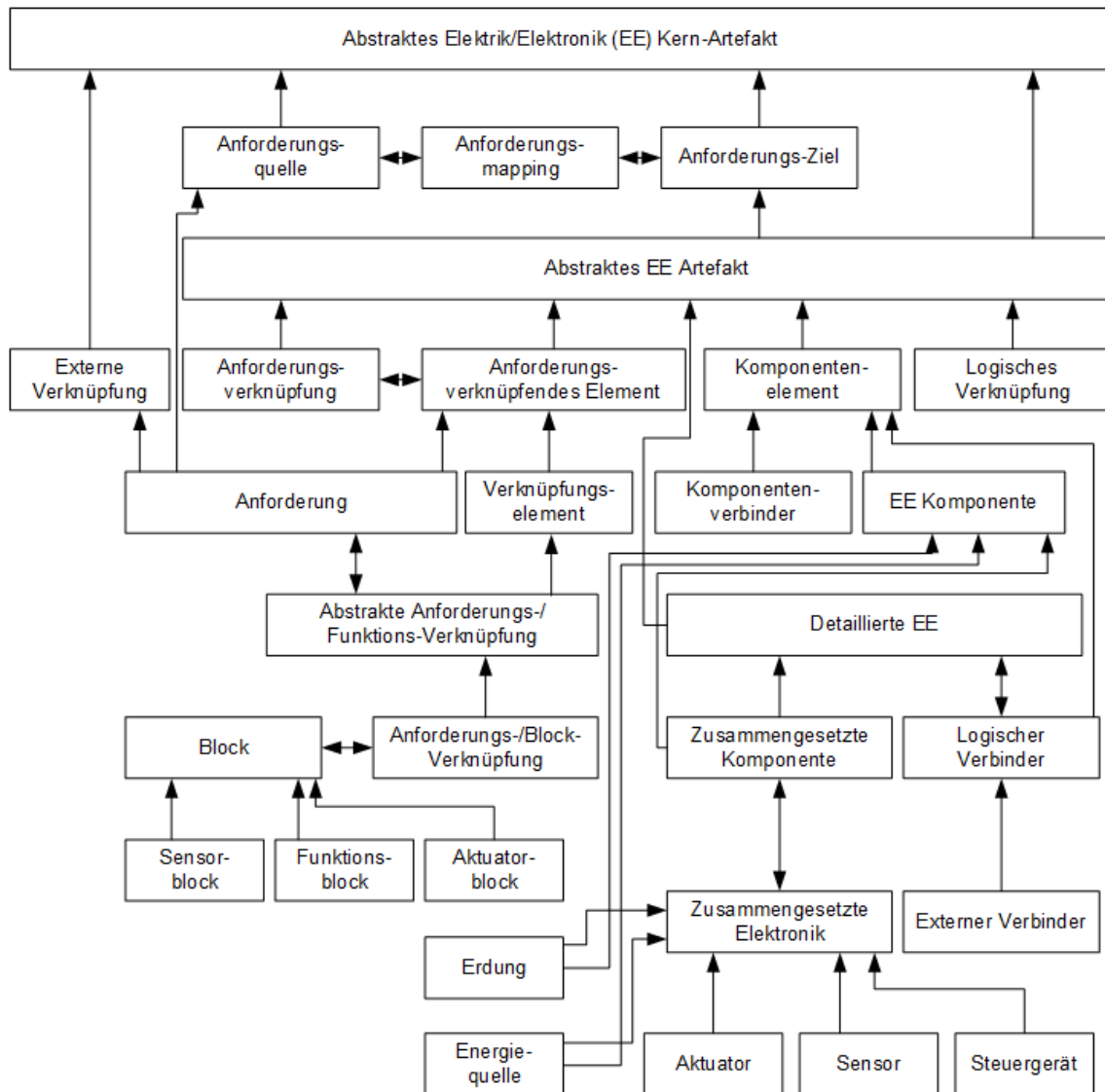


Bild 3-10: Vereinfachtes Metamodell der Zusammenhänge von Elektronikarchitektur und Anforderungen [Hil12]

Bewertung: Das Vorgehen nach HILLENBRAND stellt ein sehr komplexes Vorgehen dar, um Sicherheitsanforderungen aus Sicherheitszielen abzuleiten. Das Gesamtverfahren ist rein auf den Aspekt der Sicherheitsanforderungen ausgelegt und eignet sich nicht, um funktionale und physikalische Anforderungen im Sinne eines Lastenheftes abzuleiten. Aufgrund der sehr hohen Komplexität des Vorgehens mit weit über 50 verschiedenen Modellkonstrukten und Artefakten ist dieses nur mittels einer Toollösung durchführbar.

3.3.6 Templategestützte Systementwicklung nach KÖNIGS

Ziel der Methode zur templategestützten Systementwicklung nach KÖNIGS ist es, ein Systemwissen mittels Modellen zu erarbeiten [Kön13]. Dieses Systemwissen wird über verschiedene Fahrzeuggenerationen verfeinert und wiederverwendet. Für die Modelle wird die Sprache SysML erweitert. Es gibt sowohl technische als auch Funktionsmodelle für die einzelnen Systeme. Durch die Systemtemplates kann der Aufwand der Modellierung durch die systematische Wiederverwendung reduziert werden. Die Verknüpfung von Anforderungen mit den einzelnen Systemen und deren Templates geschieht mittels Expertenwissen. Diese Verknüpfung ist nicht methodisch unterstützt. Ebenso sind das technische und das Funktionsmodell verknüpft. Diese Verknüpfung erfolgt ebenfalls nicht methodisch unterstützt, sondern durch Expertenwissen.

Bewertung: Die templategestützte Systementwicklung nach KÖNIGS geht davon aus, dass zu Beginn der Entwicklung ausgehend vom Gesamtfahrzeug Anforderungen an ein System vorhanden sind. Diese sind zunächst unspezifisch und werden im Verlauf der Entwicklung konkretisiert. Das Vorgehen nach KÖNIGS eignet sich nicht für eine Neuentwicklung mit Lastenhefterstellung in frühen Phasen der Entwicklung. Die Erarbeitung der Zusammenhänge von Funktion, Struktur und Anforderungen eines Systems werden nicht methodisch unterstützt, sondern basieren auf Expertenwissen. Der Einsatz von Templates für die Systementwicklung kann die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil beschleunigen und birgt einige Potentiale.

3.3.7 Systematisiertes Ziele- und Anforderungsmanagement nach ILIE

Das systematisierte Ziele- und Anforderungsmanagement in der Fahrzeugentwicklung von ILIE hat als Kern eine modulare Strukturierungsmethodik. In dieser werden Anforderungen und Ziele in sogenannten Bausteinschablonen erfasst. Diese Bausteine werden in Beziehung zueinander gesetzt und vernetzt. Dies geschieht über verschiedener Sichten hinweg: Eigenschafts- und Funktionssicht, technische Eigenschafts-/Funktionssicht und Produktstruktursicht. Der zielbasierte Ansatz von ILIE hat verschiedene Zieldimensionen: Innovationsfaktor, Kostenfaktor und Nutzenaspekt. Die einzelnen Ziele werden mittels von Aspekten den Bausteinschablonen zugeordnet. Hierdurch ergeben sich Zusammenhänge der einzelnen Bausteine zueinander, zu den Sichten, zu den Zielen und zu den Anforderungen.

Bewertung: Das Vorgehen nach ILIE hat das Ziel, die Qualität der bereits existierenden Ziele und Anforderungen zu verbessern und die Informationen der frühen Phase systematisch für die Folgephasen aufzuarbeiten. Um dies zu gewährleisten, müssen zu Beginn der Entwicklung bereits Anforderungen und Ziele vorhanden sein. Dies ist jedoch insbesondere bei Neuentwicklungen nicht immer gegeben. Die einzelnen Bausteinschablonen eignen sich grundsätzlich zum Ausleiten valider Anforderungen. Jedoch sind die vielen hierfür benötigten Artefakte Informationscharakter, Produktstrukturierung, Basisattribuierung, Beziehungswissen, Entwicklungsindikatoren und Priorität für den einzelnen

Entwickler nur schwer zu erarbeiten. Ferner sind die Vielzahl der Artefakte, Attribute und Sichten nicht ohne eine Toollösung handhabbar. Die einzelnen Bausteinschablonen bieten, sofern sie erarbeitet werden können, ein hohes Potential der Wiederverwendung in Folgeprojekten.

3.3.8 Methodische Unterstützung der Anforderungsermittlung nach NEHUIS

Kernelement der methodischen Unterstützung der Anforderungsermittlung nach NEHUIS ist ein Beziehungssystem [Neh14]. Dieses Beziehungssystem stellt die Abhängigkeiten von Umwelanforderungen zu Produkt-/Fahrzeugeigenschaften dar. Das Beziehungssystem ist in SysML modelliert und erlaubt eine Ausleitung in Tabellenform. Aus dieser Tabelle ergeben sich Ableitungen, welche Umwelteinflüsse beispielsweise die Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeuges maßgeblich beeinflussen. Hieraus lassen sich Anforderungen an ein Gesamtfahrzeugkonzept ableiten. Grundsätzlich kann das Vorgehen auch zur Anforderungsableitung an mechatronische Systeme herangezogen werden.

Bewertung: Das Vorgehen nach NEHUIS ist analog dem Vorgehen Quality Function Development (vgl. Kapitel 3.2.4) zu bewerten. Zur Entwicklung von neuen mechatronischen Systemen ohne Vorgängersystem kann das Verfahren nur einen eingeschränkten Beitrag liefern. Für diese Art der Entwicklung muss von allgemeingültigen Beziehungen zwischen Umwelt und Anforderungen ausgegangen werden, die bei einem Technologiewechsel jedoch nicht gegeben sein müssen. Ferner besitzt die methodische Unterstützung der Anforderungsermittlung nach NEHUIS kein Systemmodell, das zur Integration in ein Lastenheft herangezogen werden kann. Zudem fokussiert das Vorgehen auf physikalische Eigenschaften und Anforderungen.

3.3.9 Entwicklung von Anforderungen und Architektur nach SIKORA

Die Arbeit von SIKORA basiert auf dem COSMOD-RE-Ansatz (Kapitel 3.1.4) [Sik10]. Der Ansatz wird dahingehend erweitert, dass auf Basis einer detaillierten Abgrenzung der System- und Komponentenebene eine Detaillierung der Modelltypen Ziele, Szenarien und Architektur erfolgt. Zudem wird die Modellbeziehung weiter definiert und ein Verfahren zur Konsistenzprüfung etabliert.

Die Zusammenhänge zwischen Zielen auf System- und Komponentenebene werden durch eine sogenannte vertikale Verfeinerungsbeziehung symbolisiert. Für die Szenarien auf Komponenten- und Systemebene gibt es kein dediziertes Modellierungselement. Die Architektur wird wie in SysML definiert dekomponiert.

Die Konsistenzprüfung erfolgt mittels des Einsatzes eines Solvers. Dieser löst die, in der Arbeit von SIKORA aufgestellten, mathematischen Zusammenhänge der einzelnen Modelle auf den zwei Ebenen System und Komponente. Mittels der Ergebnisse des Solvers kann eine Konsistenz der einzelnen Modelle nachgewiesen werden.

Bewertung: Die Arbeit von SIKORA erweitert COSMOD-RE um wichtige Aspekte. Die Modellzusammenhänge nach SIKORA sind für den Einsatz von COSMOD-RE zwingend erforderlich, aber im Rahmen der Arbeit nur unzureichend umgesetzt. Beispielsweise fehlt die Möglichkeit, Szenarien ebenenübergreifend konsistent zu verknüpfen. Ebenfalls ist die Konsistenzprüfung ein sehr wichtiger Aspekt, aber ohne eine tooltechnische Umsetzung nicht durchführbar. So ist die Bewertung des Ansatzes nach SIKORA bezüglich den Anforderungen dieser Arbeit ähnlich des grundsätzlichen Ansatzes COSMOD-RE.

3.4 Verwendete Modellierungssprachen

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modellierungssprachen aufgelistet. In mehreren in Kapitel 3 vorgestellten Vorgehen werden die Sprachen SysML und CONSENS verwendet. Die Wirkkettenmodellierung bildet die Grundlage des in dieser Arbeit entwickelten durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil. Die Wirkkettenmodellierung ist im gesamten Volkswagenkonzern verankert und mittels einer eigens erstellten Volkswagen-Norm standardisiert.

3.4.1 SysML

Die sogenannte SysML – Systems Modeling Language – ist eine Erweiterung der UML. Die Unified Modeling Language ist eine graphische Sprache, die hauptsächlich im Bereich der Softwareentwicklung eingesetzt wird. Die erste Version des SysML-Standards wurde im Jahr 2006 vorgestellt. Im Jahr 2007 wurde die Version SysML 1.0 durch die OMG (Object Management Group) veröffentlicht und seitdem weiter überarbeitet. Die SysML adressiert die Ziele des International Council on Systems Engineering (INCOSE) nach einer einheitlichen und standardisierten Sprache zur Modellierung und Analyse komplexer technischer Systeme. Die SysML wurde speziell auf die Anforderungen des Systems Engineering hin ausgelegt. Aktuell wird die SysML in der Version 1.5 verwendet [OMG17].

Die SysML kennt insgesamt neun Diagramme (Bild 3-11). Diese neun Diagramme sind in drei Kategorien/Diagrammartent unterteilt. Zu den sogenannten Strukturdiagrammen gehören das zusicherungs-, internes Blockdefinitions-, Blockdefinitions- und das Paketdiagramm. Eine weitere Kategorie sind die Verhaltensdiagramme, die sich aus Zustands-, Use Case-, Sequenz- und Aktivitätsdiagramm zusammensetzen. Die letzte Kategorie bildet das sogenannte Anforderungsdiagramm [Wei06].

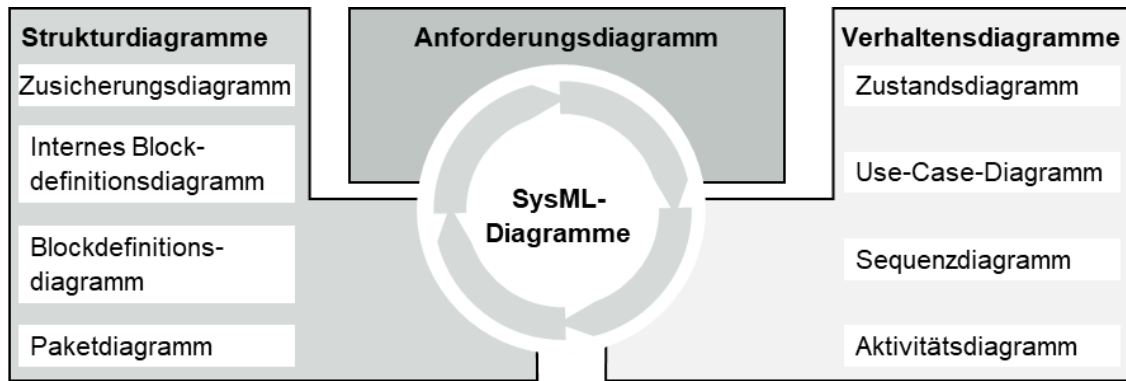


Bild 3-11: Diagrammentypen der SysML [Wei06].

Gegenüber der UML wurden die Blockdiagrammentypen und das Aktivitätsdiagramm erweitert, das Zusicherungsdiagramm und das Anforderungsdiagramm wurden darüber hinaus für die SysML neu entwickelt. Die einzelnen Diagrammentypen stellen verschiedene Sichten auf das System dar. Nachstehend werden die einzelnen Diagrammentypen erläutert:

Strukturdiagramme: Mittels der Strukturdiagramme werden Strukturen oder Strukturkonfigurationen eines zu entwickelnden Systems abgebildet. Diese werden mittels Blöcken dargestellt. Diese Blöcke sind eine Variante des UML-Klassendiagramms. Mittels dieser Blöcke lassen sich physikalische und informationsverarbeitende Elemente darstellen. Die Interaktion dieser Elemente wird im internen Blockdefinitionsdiagramm verdeutlicht. Die Interaktion wird durch Flüsse dargestellt. Diese Flüsse werden durch Konnektoren und Ports mit den Blöcken verbunden. Attribute von Systemblöcken werden mittels des Zusicherungsdiagramms modelliert. Hierdurch werden parametrische Beziehungen zwischen den Eigenschaften /Attributen verschiedener Systemblöcke sichtbar gemacht.

Verhaltensdiagramme: Das Verhalten von technischen Systemen kann mittels der vier Diagramme Zustand, Use Cases, Sequenz und Aktivität abgebildet werden. Diese Diagramme sind bis auf eine Erweiterung der Aktivitätsdiagramme unverändert aus der UML übernommen. Mittels Use Case-Diagrammen werden Interaktionen eines technischen Systems mit anderen Systemen oder einem Benutzer abgebildet. Sequenzdiagramme fokussieren auf den zeitlichen Verlauf einer Interaktion zwischen Systemblöcken. Zustände und deren Zustandsübergänge sind mittels Zustandsdiagrammen abgebildet. Um Ein- und Ausgabedaten abzubilden, wird das Aktivitätsdiagramm verwendet.

Anforderungsdiagramm: Gegenüber der UML ist die Einführung des Anforderungsdiagramms die größte Neuerung [DV08]. Mittels des Anforderungsdiagramms kann eine Brücke von textbasierten Anforderungen hin zu einem Systemmodell geschlagen werden [FMS11]. Ein Element des Typs Anforderung enthält mindestens einen Namen, eine eindeutige Nummer und eine Beschreibung. Darüber hinaus können noch weitere Eigenschaften, wie die Absicherungsmethode, oder Risiken hinterlegt werden. Die Beziehungen zwischen den Anforderungselementen können sein: Ableitung, Erfüllung,

Kopie, Prüfung, Verfeinerung oder Nachverfolgung (Bild 3-12). Zudem sieht das Anforderungsdiagramm eine Darstellung in Tabellenform vor.

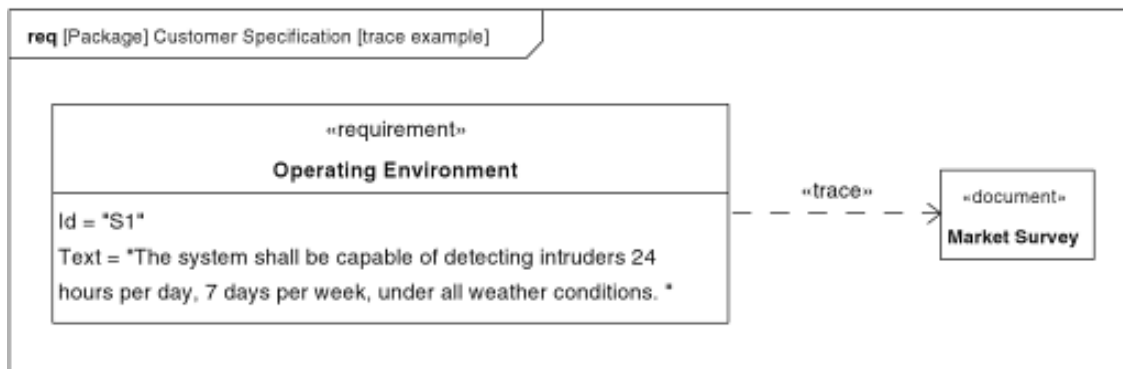


Bild 3-12: Beispiel eines Anforderungselements mit der Beziehung: Nachverfolgen (trace) [FMS11]

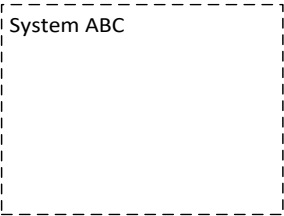
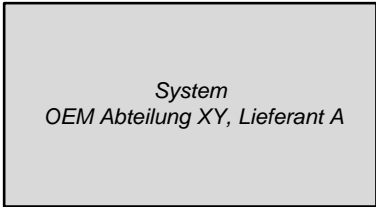
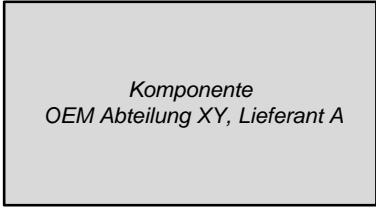
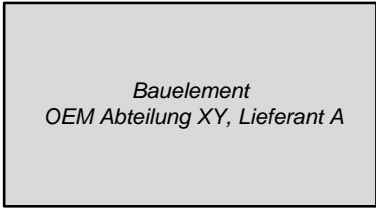
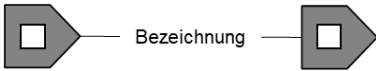
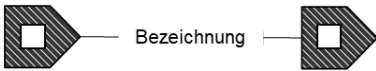
Bewertung: Die SysML wurde unabhängig von einer Methode entwickelt. Ihre Modellkonstrukte und Diagrammart erlauben nicht nur die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dies wird aufgrund des Anspruches auf Allgemeingültigkeit von SysML durch die OMG forciert. Durch die allgemeingültige Definition und das Fehlen einer Methode zum Erstellen ist die Güte von SysML-Modellen stark erfahrungs- und anwenderabhängig. Bezüglich der Anforderungsdiagramme, die als textbasierte Anforderungserfassung anzusehen sind, gibt es keinerlei Richtlinien zur Beschreibung des Textes. Hierdurch kann schnell die falsche Granularität von Anforderungen gewählt werden. Zudem müssen zur Erstellung von Anforderungsdiagrammen die Anforderungen zu Beginn der Systementwicklung vollständig vorliegen. Da die SysML konsequent auf Objektorientierung setzt, ist es einem Anwender, dem dieses Konzept nicht geläufig ist, nur bedingt möglich, SysML einzusetzen. Auch die Vielzahl an vorhandenen Konstrukten benötigt eine hohe Einarbeitungszeit. Allgemein kann der SysML aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes zur Einarbeitung und zur Erstellung der Modelle kein gewinnbringender Einsatz in der industriellen Praxis bescheinigt werden.

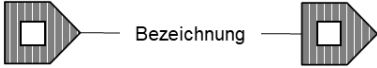
3.4.2 Wirkkettenmodellierung

Der Begriff Wirkkettenmodell beschreibt eine Modellierungsmethode, die sich in einen Prozess/Vorgehen und eine Darstellung/Sprache unterteilt [Det08] [EU13]. Die Wirkkette bildet die Wirkstruktur eines mechatronischen Systems in Form einer Systemarchitektur und die Wechselwirkungen/Schnittstellen aller beteiligten Elemente ab. Die Modellkonstrukte der Wirkkette sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Wirkkettenmodellierung ordnet sich in den Ebenen des V-Modells ein und beginnt mit der Darstellung des Systems in seinem Umfeld. Ausgehend hiervon werden weitere Ebenen modelliert. Die einzelnen Systeme, Komponenten und Bauelemente sind mittels Wechselwirkungen und Schnittstellen verbunden.

Tabelle 2: Konstrukte des Systemmodells nach [Det08]

Element	Graphische Notation	Beschreibung
Systemgrenze		Mittels der Systemgrenze wird das zu betrachtende System eindeutig von dessen Umwelt abgegrenzt.
System		Darstellung des Systems auf der Systemumfeldebene. Das System entspricht dem zu entwickelnden Produkt. Dar- gestellt werden zudem die Zuständigkeiten.
Komponente		Darstellung der systeminter- nen oder externen Komponenten mit Zuständig- keiten.
Baelement		Darstellung der systeminter- nen oder externen Baelemente mit Zuständig- keiten.
Gewollte Wechselwirkung/ Schnittstelle		Gewollte Wechselwirkungen/ Schnittstellen verbinden zwei Objekte.
Ungewollte Wechselwirkung/ Schnittstelle		Ungewollte Wechselwirkungen/ Schnittstellen verbinden zwei Objekte.

Modellkonstrukt	Graphische Notation	Beschreibung
Misuse Wechselwirkung/ Schnittstelle		Misuse Wechselwirkungen/Schnittstellen verbinden zwei Objekte.

Das Wirkkettenmodell gibt einen Gesamtüberblick über die Wechselwirkungen und Schnittstellen in einem System (Einflüsse durch das Systemumfeld, Wechselwirkungen/Schnittstellen mit dem Umfeld, gewollte und ungewollte Einflüsse zwischen den Komponenten im Gesamtsystemkontext). Das Modell dient als disziplinübergreifende mechatronische Zeichnung.

Die Schnittstellen und Wechselwirkungen der Wirkkettenmodellierung setzen sich aus der Wechselwirkung-/Schnittstellenart und einem Attribut zusammen. Es werden die in [PBF+07] definierten Flussarten Stoff, Energie und Information weiter ausdetailliert. Die Art klassifiziert die einzelnen Wechselwirkungen und Schnittstellen. Es können fünf verschiedene Arten angewandt werden: Mechanik, Elektrik, Information, Umwelt und Stoff/Material.

In der Wirkkettenmodellierung können drei Attribute unterschieden werden. Zu diesen gehören: gewollt, ungewollt und Misuse. Die Definition der gewollten und ungewollten Wechselwirkungen/Schnittstellen ist in Kapitel 2.1 dargestellt. Misuse gehen entgegen den gewollten/ungewollten Wechselwirkungen/Schnittstellen immer von einem Benutzer des Systems aus. Misuse ist definiert als: Verwendung eines Produktes in einer Weise, die von derjenigen Person, die es in den Verkehr bringt, nicht vorgesehen und nach vernünftigem Ermessen nicht vorherzusehen ist [VW80108].

Bewertung: Die Wirkkettenmodellierung dient der Visualisierung und der Detaillierung der Wirkstruktur eines mechatronischen Systems. Funktionale oder logische Aspekte sind kein Bestandteil der Wirkkettenmodellierung. Die Wirkkettenmodellierung ist aufgrund der wenigen Modellierungselemente eine leicht zu erlernende und anzuwendende Modellierungssprache. Hierbei werden sämtliche Bedarfe zur Darstellung von Schnittstellen und Wechselwirkungen eines mechatronischen Systems berücksichtigt.

3.4.3 CONSENS

Die Modellierungssprache CONSENS (CONceptual design Specification technique for Engineering of complex Systems) beinhaltet insgesamt sieben Partialmodelle/Sichten. Diese sind im Einzelnen: Anforderungen, Umfeld, Anwendungsszenarien, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt und Verhalten. Mittels der Methode CONSENS ergibt sich eine Spezifikationstechnik. Diese wurde durch KALLMEYER, FRANK und GAUSEMEIER et al.

[Kal98], [Fra06], [GEK01] definiert. Das Ergebnis von CONSENS ist eine disziplinübergreifende und ganzheitliche Beschreibung eines Systemmodells.

Das Umfeldmodell beschreibt das Umfeld des zu entwickelnden Systems. Der Fokus liegt hierbei auf der Interaktion und den Wechselwirkungen mit den Umfeldelementen eines Systems. Dies geschieht mittels Flussrelationen, die sich in drei Arten aufteilen: Stoff, Energie und Information. Jeder dieser Flüsse kann auch als Störfluss vorkommen [GLL12]. Es bildet sich eine Black-Box Darstellung des zu entwickelnden Systems.

Mittel sogenannter Steckbriefe werden Anwendungsszenarien beschrieben. Diese Beschreibung erfolgt textuell und kann mit Skizzen detailliert werden. Die Anwendungsszenarien stellen Betriebssituationen des Systems dar. Zudem erhalten diese das gewünschte Verhalten des betrachteten Systems in einer spezifischen Situation. Als Eingangsgröße für die Beschreibung der Anwendungsszenarien können das Umfeldmodell und die Interaktionen mit den Umfeldelementen dienen.

Das Partialmodell der Anforderungen entsteht aus einer Ableitung aus den Partialmodellen Umfeldmodell und Anwendungsszenarien sowie der Aufgabenstellung. Hierbei wird zwischen Wunsch- und Festanforderungen unterschieden. Die Anforderungen werden tabellarisch erfasst (Bild 3-13).

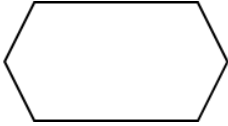



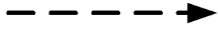

Stand: 6. April 2011 ersetzt:		Anforderungsliste Pedelec		Blatt 1	Seite 1
Änderung	F/W	Anforderungen		Änderung	Bear.
		2	Kinematik		
	F	2.1	elektr. Tretunterstützung vorsehen		
	F	2.2	Nenndauerleistung: 250 W		
	F	2.3	Motordrehmoment: 40,00 bis 60,00 Nm		
	F	2.4	Ab 25 km/h schaltet Tretunterstützung ab		
	F	2.5	Motorunterstützung nur bei Tretbewegung		
	F	2.6	Motorunterstützung nur bei Vorwärtsbewegung		

Bild 3-13: Anforderungsdarstellung in CONSENS [GLL12]

Innerhalb des Partialmodells Funktionen findet eine hierarchische Aufgliederung der Funktionen des zu entwickelnden Systems statt. Die Funktionen leiten sich aus den Anforderungen des Systems ab. Die Untergliederung der Funktionen erfolgt solange, bis eine sinnvolle Lösung für eine Funktion gefunden werden kann.

Die sinnvollen Lösungen des Funktions-Partialmodells werden in Form einer Wirkstruktur abgebildet. Diese Lösungen können in Form von Modulen, Bauteilen oder Softwarekomponenten vorliegen und bilden die Struktur des zu entwickelnden Systems. Die Elemente der Struktur des Systems werden durch Stoff-, Energie- Informationsflüsse und logische Beziehungen verknüpft. Es bildet sich eine White-Box Darstellung des zu entwickelnden Systems. Die Modellkonstrukte der Wirkstruktur sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Modellkonstrukte von CONSENS [GLL12]

Modellkonstrukt	Graphische Notation	Beschreibung
Umfeldelement		Elemente außerhalb des betrachteten Systems
System / Systemelement		Element innerhalb eines Systems oder ein System
Energiefluss		Energiefluss zwischen zwei Systemen oder Elementen
Stofffluss		Stofffluss zwischen zwei Systemen oder Elementen
Informationsfluss		Informationsfluss zwischen zwei Systemen oder Elementen
Logische Beziehung		Zusammenhang auf logischer Ebene zwischen zwei Systemen oder Elementen

Basierend auf der Wirkstruktur wird das Partialmodell Gestalt spezifiziert. Die Gestalt beinhaltet die Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen des Systems. Die Wirkstruktur und Gestalt bilden im klassischen Maschinenbau die zentrale Prinziplösung.

Für das Verhalten bilden die Anwendungsszenarien die Grundlage. Über eine Modellierung der Zustände wird dargestellt, welche Zustände und Zustandsübergänge das Verhalten des Systems beschreiben. Die Zustandsübergänge werden durch Ereignisse ausgelöst. Mittels einer Darstellung von Aktivitäten werden die Systemzustände modelliert.

Die Methode CONSENS sieht die Erstellung der Partialmodelle in folgender Reihenfolge vor: Umfeldmodell, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktion, Wirkstruktur, Gestalt und Verhalten. Hierdurch soll eine disziplinübergreifende Lösung für ein zu entwickelndes mechatronisches System abgebildet werden.

Bewertung: CONSENS benötigt zur Modellierung der sieben Diagrammartens insgesamt elf Sprachkonstrukte. Daher kann CONSENS als leicht zu erlernende Sprache angesehen werden, die auch für ungeübte Anwender verwendet werden kann. Wird CONSENS ohne eine durchgängige Toollösung verwendet, müssen die Partialmodelle und deren Inhalte

manuell durch einen Anwender verknüpft werden. Dies wird jedoch durch Modellierungsregeln unterstützt. Durch das frühzeitige Erstellen des Partialmodells der Anforderungen kann es zu unvorhergesehenen und häufigen Iterationen im Erstellungsprozess kommen. Erst nach vollständiger Durchdringung und Modellierung eines mechatronischen Systems sind alle Anforderungen vollständig bekannt und können dokumentiert werden. CONSENS fokussiert durch seine Partialmodelle die technische Betrachtung eines Systems und unterstützt nur rudimentär die Anforderungserhebung.

3.5 Vergleich der Ansätze und Identifikation von Lücken

Der vorgestellte Stand der Technik wird mit den in Kapitel 2 aufgestellten Anforderungen abgeglichen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

A1) Funktionale und physikalische Anforderungen und Artefakte der richtigen Granularität: Lediglich die beiden Ansätze COSMOD-RE und das Vorgehen von SIKORA erfüllen die Bewertung hinsichtlich der Erfassung von funktionalen und physikalischen Anforderungen der richtigen Granularität. Sonstige im Stand der Technik vorgestellte Ansätze geben keine hinreichende Richtlinie oder Regel zur Erstellung oder Erarbeitung von Anforderungen der richtigen Granularität. Das erarbeitete Vorgehen muss hierfür Richtlinien und Regeln bereitstellen.

A2) Systemarchitektur und Umfelddarstellung: Da für ein Lastenheft in der Automobilindustrie ein Systemmodell und ein Umfeldmodell benötigt werden, wurde der Stand der Technik darauf hin untersucht. Lediglich die Rahmenwerke zur Anforderungserhebung beinhalten alle diese beiden Modelltypen. Bei den anderen Ansätzen muss für ein Lastenheft diese Modellierung zusätzlich vorgenommen werden. Ein Gesamtverfahren muss diese beiden Modelltypen beinhalten, um diese nahtlos in ein Lastenheft integrieren zu können.

A3) Disziplinübergreifende Artefakte und Anforderungen: Da bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen im Automobil die Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik beteiligt sind, müssen disziplinübergreifende Anforderungen erarbeitet werden können. Im Stand der Technik bieten alle Vorgehen der Produktentwicklung diese Möglichkeit. Im Bereich der Vorgehen aus der Automobilindustrie kann kein Ansatz diese Forderung vollständig erfüllen. Dies liegt daran, dass diese Ansätze meist auf die Funktionen eines Systems fokussieren. Hierdurch lassen sich häufig nur Anforderungen der Fachdisziplin Informatik ableiten. Ein erarbeitetes Gesamtverfahren muss die Ausleitung von Anforderungen jeder Fachdisziplin gewährleisten.

A4) Entwicklungsszenarioabhängige Artefakte und Anforderungen: Sämtliche Rahmenwerke zur Anforderungserhebung und die Vorgehen der Produktentwicklung, bis auf QFD, orientieren sich an den verschiedenen Ebenen des V-Modells, hierdurch kann mit deren Hilfe eine Anforderungsdekomposition vorgenommen werden. Jedoch erfordert das Verknüpfen der ebenenübergreifenden Artefakte der einzelnen Vorgehensmodelle ein

gewisses Maß an Erfahrung. Das vorgestellte Gesamtverfahren muss eine erfahrungsunabhängige Möglichkeit bieten, dass die Anforderungen richtig auf Subkomponenten dekomponiert werden.

A5) Stakeholderübergreifende Anforderungserfassung: Nicht alle untersuchten Ansätze bieten die Möglichkeit, alle relevanten Stakeholder und deren Anforderungen zu integrieren. Dies ist jedoch zur Erarbeitung aller relevanten Anforderungen an ein mechatronisches System im Automobil zwingend erforderlich. Die aktive Einbindung aller relevanten Stakeholder unterstützt lediglich REMSeS im Bereich der Rahmenwerke und bei den Vorgehen aus der Automobilentwicklung nur die Ansätze von ALLMANN und ILIE. Das entwickelte Vorgehen muss sämtliche relevanten Stakeholder proaktiv integrieren und sicherstellen, dass sämtliche Anforderungen erarbeitet werden.





























































































































































































A6) Neuentwicklung ohne Referenz: Die Neuentwicklung mechatronischer Systeme hat zur Folge, dass es kein Vorgänger- oder Konkurrenzprodukt als Referenz gibt. Die Mehrzahl der untersuchten Ansätze benötigt oder fordern aber eine Referenz zur Ableitung und Validierung von Anforderungen. Diese Referenz wird in einigen Ansätzen als Versuchsträger oder Prototyp bezeichnet. Dieser Versuchsträger dient der Validierung der erarbeiteten Anforderungen. Im Bereich der Rahmenwerke finden sich die meisten Ansätze, die ohne eine solche Referenz auskommen. Ein zu entwickelndes Vorgehen muss eine Neuentwicklung ohne eine Referenz ermöglichen.

A7) Verknüpfte Methoden und Sichten: Eine Vielzahl der im Stand der Technik aufgeführten Ansätze erfüllen die Forderung nach durchgängig verknüpften Partialmodellen und Methoden zur Erstellung teilweise. Dies liegt häufig daran, dass die Modellinhalte der Partialmodelle zwar verknüpft werden, aber keine Methode hierfür beschrieben wird. Dies kann zu einer fehlerhaften Verknüpfung führen. Ein zu entwickelndes Vorgehen muss hierfür Methoden bereitstellen.

A8) Intuitiv und Validierbar: Ein Vorgehen für die industrielle Praxis muss verständlich und durch eine umfassende Vorgehensbeschreibung detailliert sein. Keine der im Stand der Technik vorgestellten Vorgehensmodelle oder Ansätze ist ohne Erfahrung einsetzbar. Es mangelt an eindeutigen Vorgehensbeschreibungen und an Gütekriterien zur Validierung der Methodendurchführung.

A9) Verknüpfte Artefakte und Methodenergebnisse – Toolunabhängig: Um über mehrere Lieferantenebenen einsetzbar zu sein, muss das Vorgehen eine Möglichkeit bieten, mittels der eingesetzten Standardtools (vgl. Kapitel 2.5) eine Verknüpfung sämtlicher Methoden und Partialmodelle zu gewährleisten. Diese Möglichkeit bietet nur das Rahmenwerk REMsES vollständig ab. Die erarbeitete Vorlage muss nahtlos in andere Tools, aber auch toolunabhängig einsetzbar sein. Ein ganzheitliches Repository ist hierfür zu entwickeln.

Tabelle 4: Bewertung des untersuchten Stands der Technik hinsichtlich der Anforderungen

Bewertungsskala:  voll erfüllt  teilweise erfüllt  nicht erfüllt		Funktionale und physikalische Anforderungen und Artefakte der richtigen Granularität	Systemarchitektur und Umfelddarstellung	Disziplinübergreifende Artefakte und Anforderungen	Entwicklungsszenarioabhängige Artefakte und Anforderungen	Stakeholderübergreifende Anforderungserfassung	Neuentwicklung ohne Referenz	Verknüpfte Methoden und Sichten	Intuitiv und Validierbar	Verknüpfte Artefakte und Methodenergebnisse – Toolunabhängig	Lessons Learned
HF: Handlungsfeld A: Anforderung		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
HF1: Artefakte für Anforderungen in einem Lastenheft gemäß Automotive VDA-Standardstruktur											
Rahmenwerke zur Anforderungserhebung	REM										
	REMSes										
	SPES2020										
	COSMOD-RE										
HF2: Methoden und Vorgehen zur Anforderungs- und Artefakterfassung											
Vorgehen der Produktentwicklung	Produktentwicklung nach PAHL, BEITZ und FELDHUSEN										
	Produktentwicklungsmethodik nach EHRENSPIEL										
	Produktkonstruktion und -entwicklung nach ULRICH und Ganzheitliche Konstruktion nach PUGH										
	Konstruieren mit Konstruktionskatalogen nach ROTH										
	Entwicklung und Marketing neuer Produkte nach URBAN und HAUSER										
	Bildung von Produktanforderungen nach OTTO										
	Methodische Entwicklung technischer Produkte nach										
	3-Zyklusmodell nach GAUSEMEIER										
	QFD										
HF3: Rahmenbedingungen für den flächendeckenden Einsatzes in der Automobilindustrie											
Ansätze und Vorgehen aus dem Umfeld Automobilindustrie	Entwerfen von Fahrzeugkonzepten nach PRINZ										
	Model-based Requirements Engineering nach VOGELSANG										
	Anforderungsmanagement nach ALLMANN										
	Disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten nach										
	Funktionale Sicherheit in der Konzeptphase nach HILLENBRAND										
	Templategestützte Systementwicklung nach KÖNIGS										
	Systematisiertes Ziele- und Anforderungsmanagement nach ILIE										
	Methodische Unterstützung der Anforderungsermittlung nach										
	Entwicklung von Anforderungen und Architektur nach SIKORA										

A10) Lessons Learned: Die Integration von Lessons Learned in den Entwicklungsprozess führt zu einer Effizienzsteigerung bei der Ableitung von Anforderungen an ein neues mechatronisches System. Lediglich im Bereich der Ansätze aus der Automobilindustrie wurde dies erkannt und bei insgesamt vier Ansätzen vollständig umgesetzt. Das vorgestellte Vorgehen muss eine Möglichkeit bieten, nach einer erfolgreichen Systementwicklung Lessons Learned abzuleiten und für Folgeprojekte nutzbar zu machen.

Weder einer der Einzelansätze noch eine Kombination der Ansätze erfüllt alle Anforderungen an diese Arbeit vollumfänglich. Ein Großteil der vorgestellten Ansätze geht davon aus, dass zu Beginn einer Entwicklung alle oder eine Vielzahl der Anforderungen vorliegen. In der Automobilbranche ist dies zu Beginn der Entwicklung insbesondere von hochinnovativen Systemen jedoch nicht der Fall. Aufgrund der kurzen Entwicklungszyklen muss ein Vorgehensmodell gewährleisten, dass alle relevanten Anforderungen frühzeitig erarbeitet und dokumentiert werden. Dies muss erfahrungs- und anwenderunabhängig ermöglicht sein. Ferner wird ein Vorgehen benötigt, das sehr effizient ist, durch Einbeziehung von Lessons Learned oder einer zielgerichteten Auswahl benötigter Methoden und Sichten. Der Stand der Technik liefert für die Automobilentwicklung keine der genannten Erfordernisse vollumfänglich. Daher gibt es eine dringende Notwendigkeit und Handlungsbedarf nach einem *durchgängigen Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil*.

4 Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für mechatronische Systeme

Das hier vorgestellte Gesamtvorgehen dient zur Erfassung von Anforderungen an ein mechatronisches System und dessen Subkomponenten beziehungsweise Bauelemente. Das Gesamtvorgehen beinhaltet mehrere verknüpfte Systems Engineering Methoden. Diese sind derart ausgelegt, dass sie ohne Erfahrungen im Bereich Systems Engineering durchgeführt werden können. Mittels Bewertungskriterien für die Einzelmetho-
den-durchführung und für das gesamte Vorgehen wird garantiert, dass die Methoden vollständig durchgeführt wurden. Hierdurch kann während und nach einem Methodeneinsatz überprüft werden, ob alle benötigten Ergebnisse in der geforderten Güte erreicht werden können oder erreicht wurden. Die Durchführung der Bewertung sollte durch einen erfahrenen Systems Engineer erfolgen.

4.1 Das Gesamtvorgehen im Überblick

Das Gesamtvorgehen ist in Bild 4-1 dargestellt. Es umfasst alle in Kapitel 4 vorgestellten Einzelmethoden. Es ist so aufgebaut, dass ein größtmöglicher Inhalts- und Informationsübertrag zwischen den Einzelmethoden vorliegt. Dies ist nötig, um Fehlinterpretationen und falsche Annahmen bei der Erarbeitung beispielsweise eines Systemmodells oder einer Systemarchitektur frühzeitig identifizieren zu können. Durch die Verknüpfung der Einzelmethoden wird der Methodeneinsatz zudem effizienter.

Die ersten drei Phasen System-Merkmalanalyse, System-Funktionserfassung und System-Eigenschaftserfassung dienen zur Erfassung der Anforderungen bezüglich der vom System an seiner Grenze bereitzustellenden Funktionalitäten und Eigenschaften.

In der darauffolgenden Phase System-Wirkkettenanalyse werden aus den Funktionalitäten und Eigenschaften des Systems Schnittstellen ausgeleitet. Hierdurch wird eindeutig definiert, welche Schnittstellen ein System an seiner Grenze aufzuweisen hat, um alle benötigten Funktionalitäten und Eigenschaften bereitstellen zu können. Durch anschließende Dekomposition im System werden Komponenteneigenschaften und -schnittstellen ermittelt.

Darauffolgend wird das Gesamtmodell mit den System-Funktionen abgeglichen, um sicherzustellen, dass das Modell und die Funktionen inhaltlich vollständig sind. Mittels der Spezifikationswürdigkeit wird gewährleistet, dass sämtliche entstandenen Artefakte für eine Spezifikation von Anforderungen genutzt werden können. Abschließend werden Lessons Learned ausgeleitet, die für Folgeentwicklungen zur Verfügung stehen.

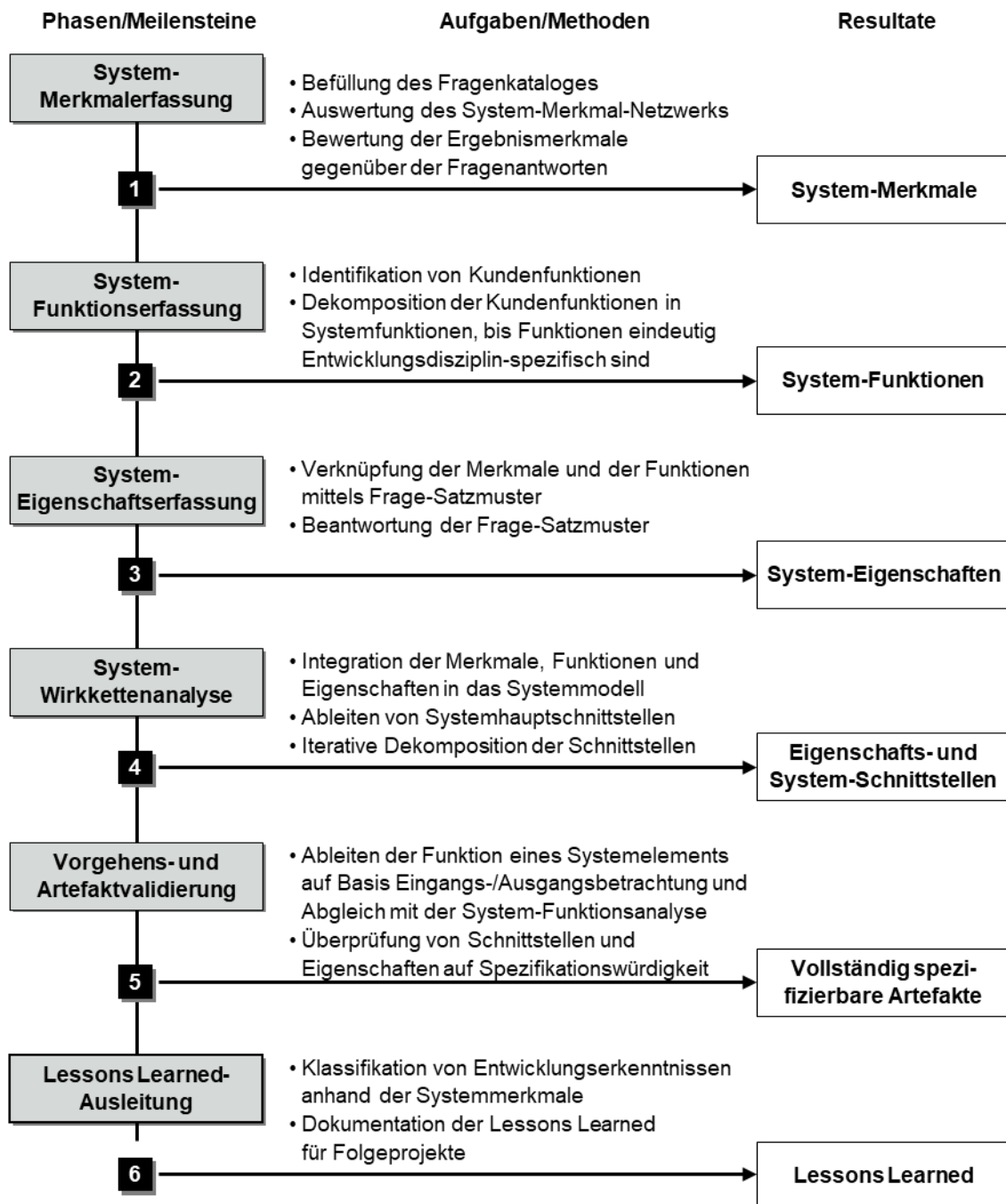


Bild 4-1: Gesamtverfahren

Zur verständlicheren Einordnung der einzelnen Phasen in das entstehende Gesamtmodell sind die einzelnen Phasen den einzelnen Modellkonstrukten in Bild 4-2 zugeordnet.

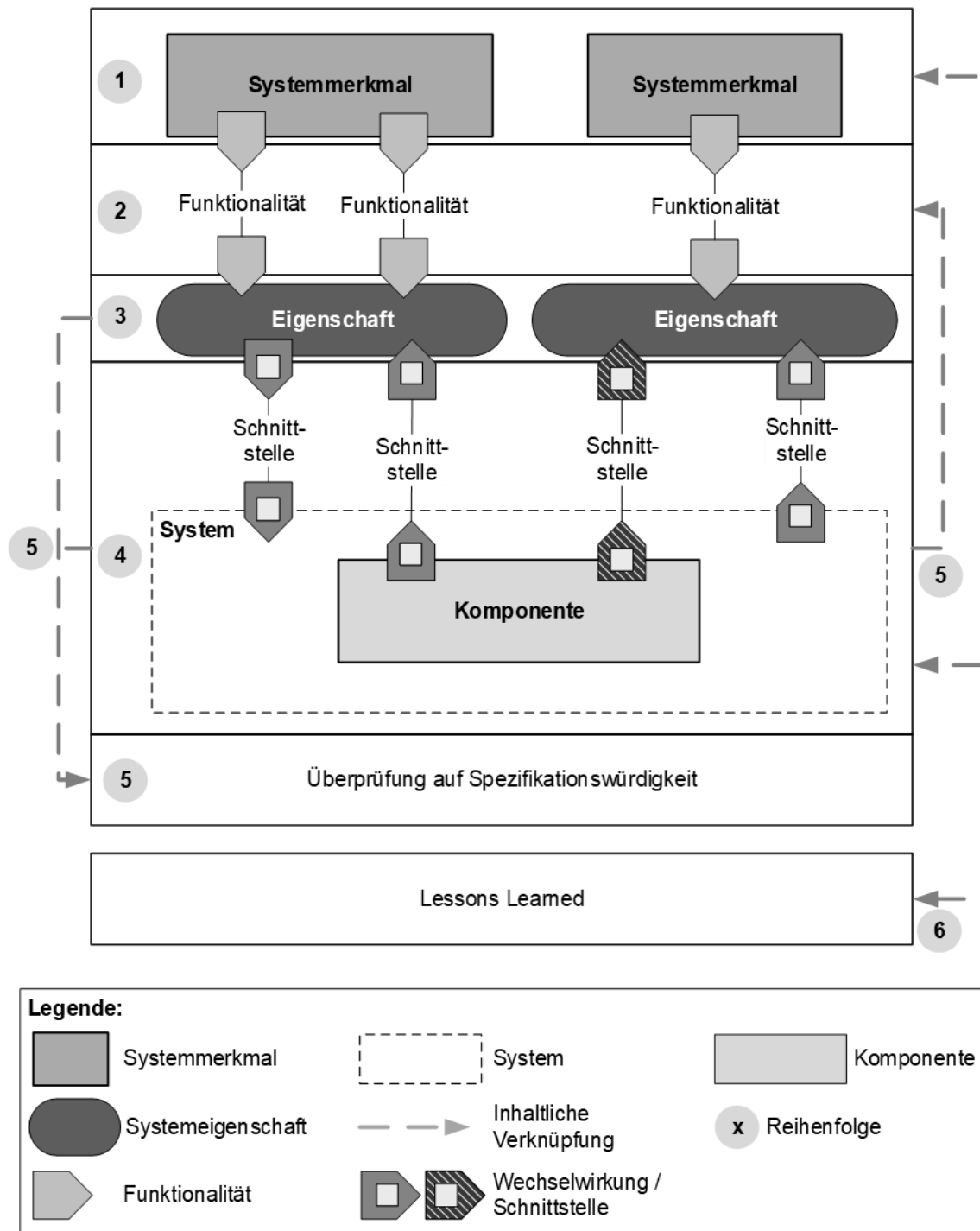


Bild 4-2: Zuordnung der Phasen/Meilensteine zu den Modellkonstrukten

4.2 System-Merkmalerfassung

Die erste Phase des Vorgehensmodells stellt die sogenannte System-Merkmalerfassung dar. Im Folgenden wird die hierfür benötigte Methode des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks definiert und das Vorgehen erläutert.

4.2.1 Definition

Das sogenannte ganzheitliche System-Merkmal-Netzwerk liefert die Grundlage für das vorgestellte Vorgehen zum Erfassen und Ableiten von interdisziplinären Anforderungen. Das System-Merkmal-Netzwerk beinhaltet insgesamt 107 Merkmale, die in 18 Kategorien zusammengefasst sind. Diese Kategorien sind unter anderem: Kräfte, Energie, Signal, Sicherheit, Geometrie, Stoff, Kinematik. Grundlage der Kategorien ist die Hauptmerkmalsliste nach PAHL/BEITZ [PB97]. Die Inhalte der Hauptmerkmalsliste wurden angepasst und um fahrzeugspezifische Aspekte erweitert, um den Anforderungen im Automotivumfeld gerecht zu werden. Die Anpassung erfolgte aufgrund der Analyse einer Vielzahl von System-Lastenheften und mehreren Entwicklungsprojekten über den Zeitraum von vier Jahren. Darüber hinaus wurden Stakeholdermerkmale hinzugefügt, die die Merkmale für die Produktion, den Kundendienstes und den Kunden beinhalten. Hierdurch werden die relevanten Stakeholder und der Lebenszyklus des Systems frühzeitig mit abgebildet. Das ganzheitliche System-Merkmal-Netzwerk weist zwei Bestandteile auf:

1. Der Fragenkatalog: Dieser enthält alle 107 Merkmale in den 18 Kategorien. Innerhalb des Fragenkataloges wird die Relevanz jedes Merkmales für ein spezifisches System bewertet. Hierbei kommt eine 4-stufige Bewertung zum Einsatz. Von keine Relevanz für das System, über geringe bis mittlere Relevanz bis hin zu einer hohen Relevanz.
2. Die Beziehungsmatrix: In dieser sind die 107 Merkmale durch 4140 gewichtete Beziehungen miteinander verknüpft. Diese sind ein Ergebnis aus der Analyse bestehender interner Datenquellen. Hierzu zählen Lessons-Learned-Datenbanken, existierende Systemarchitekturen, Lastenhefte, Reverse Engineering, Testspezifikationen und Experteninterviews. Die gewichteten Beziehungen sind obligatorisch und auf den Automotivbereich ausgelegt. Durch Anforderungserhebungen für bereits existierende Fahrzeugsysteme konnten die Merkmale und die gewichteten Beziehungen mehrfach validiert und bestätigt werden. Wird die Beziehungsmatrix derart visualisiert, dass Merkmale mit hoher gegenseitiger Gewichtung näher beieinander liegen als solche mit niedriger Gewichtung, erkennt man die Ausbildung von Themenkomplexen, wie beispielsweise Endprüfung, Inbetriebnahme und Software (Bild 4-3). Die Erweiterung der Merkmale und deren gewichteten Verknüpfungen bilden den Kern des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks.

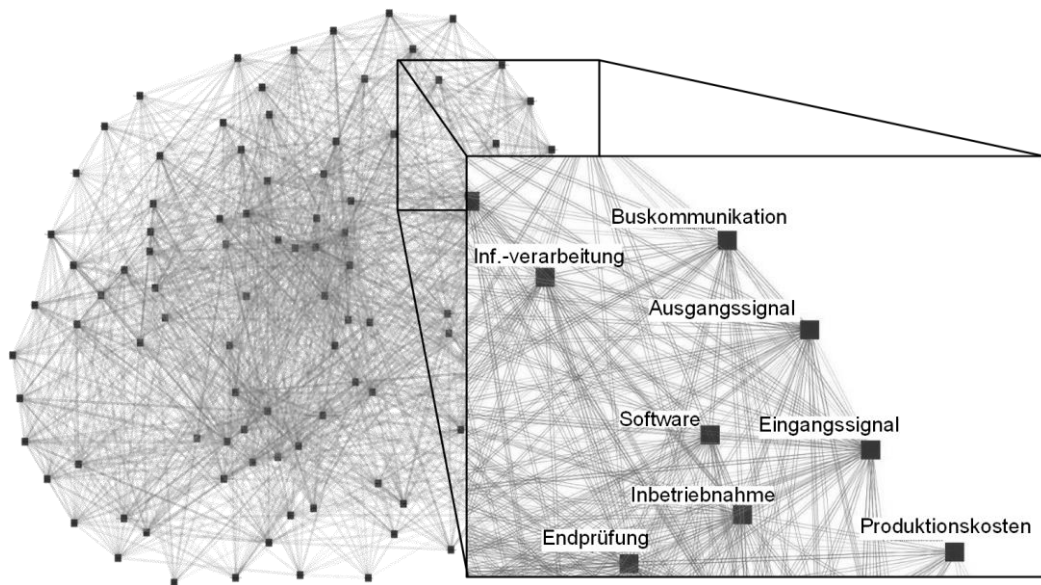


Bild 4-3: Ganzheitliches System-Merkmal-Netzwerk. Vernetzung der Systemmerkmale

Anhand eines Beispiels lassen sich die Verknüpfungen und deren Bedeutungen der Beziehungsmatrix verdeutlichen. Das Merkmal „Erwärmung“ eines elektrischen Bauteils beeinflusst stark das Merkmal „Dichtigkeit“. Findet innerhalb eines Steuergerätes im Fahrzeug eine Erwärmung der elektrischen Bauteile statt, so ist eventuell aufgrund einer benötigten Wärmeabfuhr keine komplette Kapselung möglich. Daher müssen Maßnahmen zur Ventilation in Betracht gezogen werden, die die Dichtigkeit des Steuergerätes beeinflussen. In diesem Beispiel findet über die Beziehungsmatrix (Bild 4-4) des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks die Verknüpfung eines elektrischen Merkmals zu einem mechanischen oder konstruktiven Merkmal statt. Folglich ist für das Steuergerät das Merkmal „Dichtigkeit“ besonders relevant und muss im Fokus der Entwicklung betrachtet werden. Die Auswertung erfolgt anhand des in Kapitel 4.2.2 dargestellten Vorgehens.

4.2.2 Vorgehen

Der Fragenkatalog wird von einer Rolle des Entwicklungsprojektes, idealerweise dem Systemverantwortlichen, befüllt. Die individuelle Bewertung der Wichtigkeit eines Merkmals für ein System wird mit der Beeinflussung eines anderen Merkmals multipliziert und aufaddiert. Sortiert man die Merkmale anschließend nach der Gewichtung der Merkmale, ergibt sich eine Reihenfolge der Merkmale für ein spezifisches System. Diese Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt automatisiert.

Beziehungsmatrix Fragestellung: „Wie stark beeinflusst das Merkmal A (Zeile) das Merkmal B (Spalte)?“ 0 = nicht relevant 3 = gering 6 = mittel 9 = hoch						
Merkmal	Nr.	1	2	3	...	
Erwärmung	1		0	0	3	9
Druck	2	3		6	0	0
Anschlussenergie	3	6	M_i		6	3
...	...	0	0	0		0
Dichtigkeit	n	0	3	0	6	
$\Sigma (M_i \cdot P_i)$						
Gewichtung des Merkmals		1212	2061	1089	972	1872

Projektspezifische Einschätzung
0
3
P_i
9
6

Bild 4-4: Beziehungsmatrix des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks

Die Ergebnisdarstellung unterscheidet hierbei in den Kategorien „als relevant eingestuft“ und als „nicht relevant eingestuft“. Diese Aufteilung ist nötig, da hiermit hinterfragt werden kann, ob eine vom Ersteller getroffene Annahme richtig ist. Durch die gegenseitige Beeinflussung der Merkmale kann es passieren, dass das System-Merkmal-Netzwerk ein vom Ersteller nicht als relevant eingestuftes Merkmal als wichtig für das System als Ergebnis liefert. Ist dies der Fall, so ist zu hinterfragen, ob ein Merkmal für das System wirklich nicht relevant ist oder eine falsche Annahme getroffen wurde.

4.3 System-Funktionserfassung

4.3.1 Definition

Zur Erfassung und Ableitung der Anforderungen, die ein System bereitstellen muss, ist es unerlässlich, die Funktionalität des Systems darzustellen [BBH+09] [GBK+06] [GLL12] [PBF+07] [PHA+07] [Poh07]. Diese leitet sich aus der Benutzung eines Systems durch einen Kunden ab und erfüllt dem Kunden oder Benutzer gegenüber einen gewissen Zweck. Folglich stellt das System nach außen hin eine Hauptfunktion bereit, die einen spezifischen, benutzerrelevanten Anwendungsfall bedienen muss. Für ein ganzheitliches Systemverständnis ist es notwendig, diese Hauptfunktion des Systems in dessen Unterfunktionen zu dekomponieren und alle Funktionen eines Systems zu identifizieren. Die Dokumentation der Funktionen geschieht in Form von Use Cases, da diese Darstellungsform genormt ist (SysML-Richtlinien Version 1.5 [OMG17]).

Da ein System im Fahrzeug meist nie direkt mit dem Benutzer/Fahrer interagiert, leiten sich die Funktionen des Systems aus einer Interaktion mit dem Gesamtfahrzeug ab. Der

Benutzer richtet den Wunsch einer Funktionalität immer an das Gesamtfahrzeug. Beispielsweise ist der Fahrerwunsch „Fahrzeug beschleunigen“ nie direkt an das System Antrieb des Fahrzeuges gerichtet. Der Fahrer bedient das Fahrpedal und diese Informationen werden an das relevante System, beispielsweise den gesamten Antriebsstrang, übertragen. Ebenso geschieht die Rückmeldung des Systems Antrieb nie direkt an den Fahrer. Die Beschleunigung erfolgt über den gesamten Antriebsstrang und die Reifen. Der Status des Antriebs wird über das Kombiinstrument (visuelle Rückmeldung) oder Lautsprecher in Form von akustischen Rückmeldungen realisiert.

Ein weiteres Beispiel ist der Ladevorgang eines Elektrofahrzeuges, bei dem der Benutzer nie direkt mit dem Ladegerät interagiert (Bild 4-5). Diese Betrachtungsweise ist nötig, da hierdurch erste Schnittstellen und Interaktionspartner innerhalb des hochvernetzten Gesamtkonstruktes Fahrzeug identifiziert werden können. Die Funktion, die benötigt wird, um einen Anwendungsfall für einen Benutzer zu ermöglichen, wird in Form einer Funktionshierarchie dargestellt.

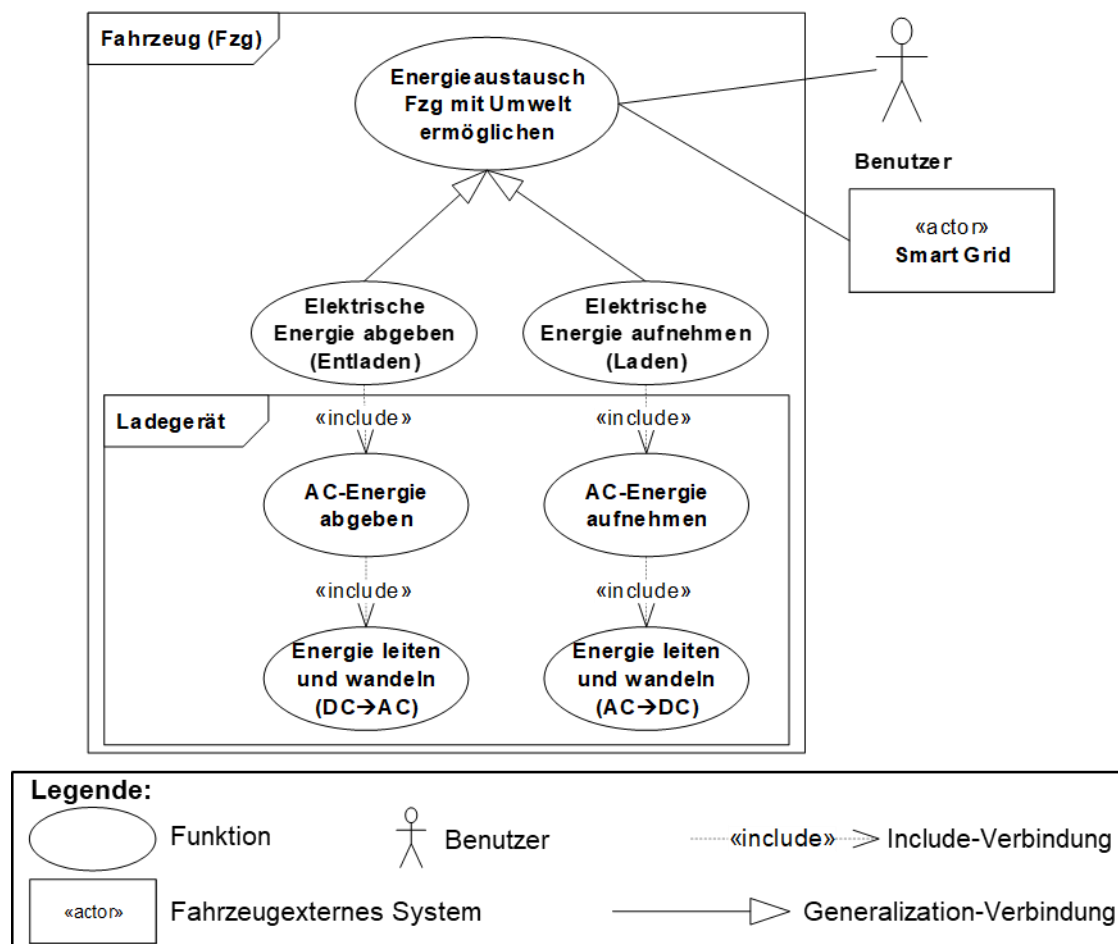


Bild 4-5: Fahrzeug- und Systemfunktionen für ein Ladegerät im Fahrzeug

4.3.2 Vorgehen

Grundlage der Beschreibung der Funktionen ist das Vorgehen definiert in der VDI-Norm 2222 [VDI2222]. Die VDI-Norm 2222 wurde als Basis für das Vorgehen gewählt, da diese einen inhaltlichen Konsens aus mehreren Entwicklungsvorgehen darstellt [Hua01]. Das Vorgehen wurde leicht abgewandelt und erweitert, um die spezifischen Anforderungen einer Automobilentwicklung zu unterstützen. Dies ist nötig, um bei der Erstellung der Funktionen und deren Unterfunktionen auf eine einheitliche und eindeutige Fragestellung zurückgreifen zu können. Diese Fragestellung unterstützt den Methodenanwender bei der Formulierung der abstrakten Funktionsbetrachtung eines Entwicklungsgegenstandes. Dies ist nötig, da der unbedarfte Anwender meist in realen Bauteilen oder der Prinzipiellösung denkt, die funktionale Betrachtung aber als bauteilunabhängige Beschreibung des Entwicklungsgegenstandes dienen soll. Die Beschreibung einer Funktion setzt sich aus einem Objekt und einem Prädikat zusammen.

Sofern für die Entwicklung von mechatronischen Systemen für ein Automobil benötigt, wird die Liste der zugelassenen Objekte der VDI2222 erweitert. Das Objekt „Stoff“ wird um den Zusatz „Betriebsstoff“ erweitert, da Betriebsstoffe in heutigen Fahrzeugen vielfältig vorkommen. Das Objekt „Energie“ wird aufgeteilt in die zwei Terme „physikalische Größe“ und „elektromagnetische Welle“, um dem Sachverhalt der berührungslosen Energieübertragung gerecht zu werden. Zudem wird der Begriff „systemexternes Element“ in die Liste zugelassener Objekte aufgenommen, da moderne Fahrzeuge ein hochvernetztes Gesamtgebilde darstellen (Bild 4-6).

Die Prädikate werden nicht wie in der VDI-Norm 2222 eingeschränkt. Insbesondere bei der Detaillierung der Funktionen in Richtung disziplinspezifischer Funktionen reichen die Prädikate der VDI-Norm 2222 nicht mehr aus, um eine intuitive Formulierung der Funktion zu ermöglichen. Beispielsweise muss für die Ansteuerung eines Nockenwellenverstellers im Fahrzeug ein „Phasenwinkelversatz zwischen Nocken- und Kurbelwelle“ (Objekt) „berechnet“ (Prädikat) werden.

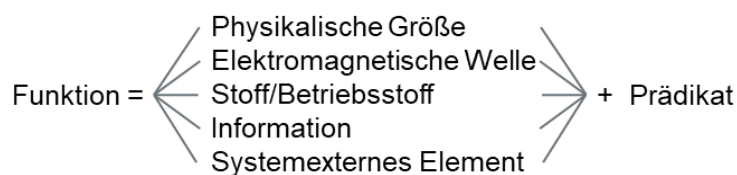


Bild 4-6: Schema einer Funktionsbeschreibung

Die Fragestellung, die bei der Erstellung der bauteilunabhängigen Funktionen unterstützt lautet: Welche Unterfunktion, die eine „physikalische Größe“, eine „elektromagnetische Welle“, einen „Stoff/Betriebsstoff“, eine „Information“ oder ein „systemexternes Element“ beschreibt, wird benötigt, um eine Funktion zu ermöglichen?

Diese Fragestellung wird wiederkehrend bei der Ausdetaillierung von Funktionen angewandt und garantiert, dass bauteilunabhängige Funktionen beschrieben werden.

Beispielsweise ist in einem mechatronischen Regelkreis die Aufnahme einer systeminternen Istgröße erforderlich. Eine bauteilzentrierte Betrachtung könnte hier zur Funktionsbeschreibung „Sensor auswerten“ führen. Durch die oben genannte zielgerichtete Fragestellung ist das Aufstellen dieser Funktion jedoch nicht möglich, da der Sensor, sofern systemintern, keines der zulässigen Objekte einer Funktion beschreibt. Die folgerichtige Funktion würde lauten: „Messwerte aufnehmen“.

Die Funktionen werden soweit dekomponiert, bis eine Funktion eindeutig einer Disziplin zugeordnet werden kann. Für die Funktionalität „Kommunikation ermöglichen“ werden Elemente aus den zwei Disziplinen Software und Elektronik benötigt. Daher muss diese Funktionalität weiter dekomponiert werden. „Datenaustausch per diskreter Leitung ermöglichen“ ist eindeutig der Disziplin Elektronik zuzuordnen und die Funktionalität „Informationen verarbeiten“ der Disziplin Software.

Die Darstellung erfolgt der Übersichtlichkeit wegen mittels sogenannter Ebenen. Diese sind nicht explizit an die Ebenen des V-Modells gebunden. Die Ebene 1 und Ebene 2 stellen die Hauptfunktionen eines Systems dar (Bild 4-7).

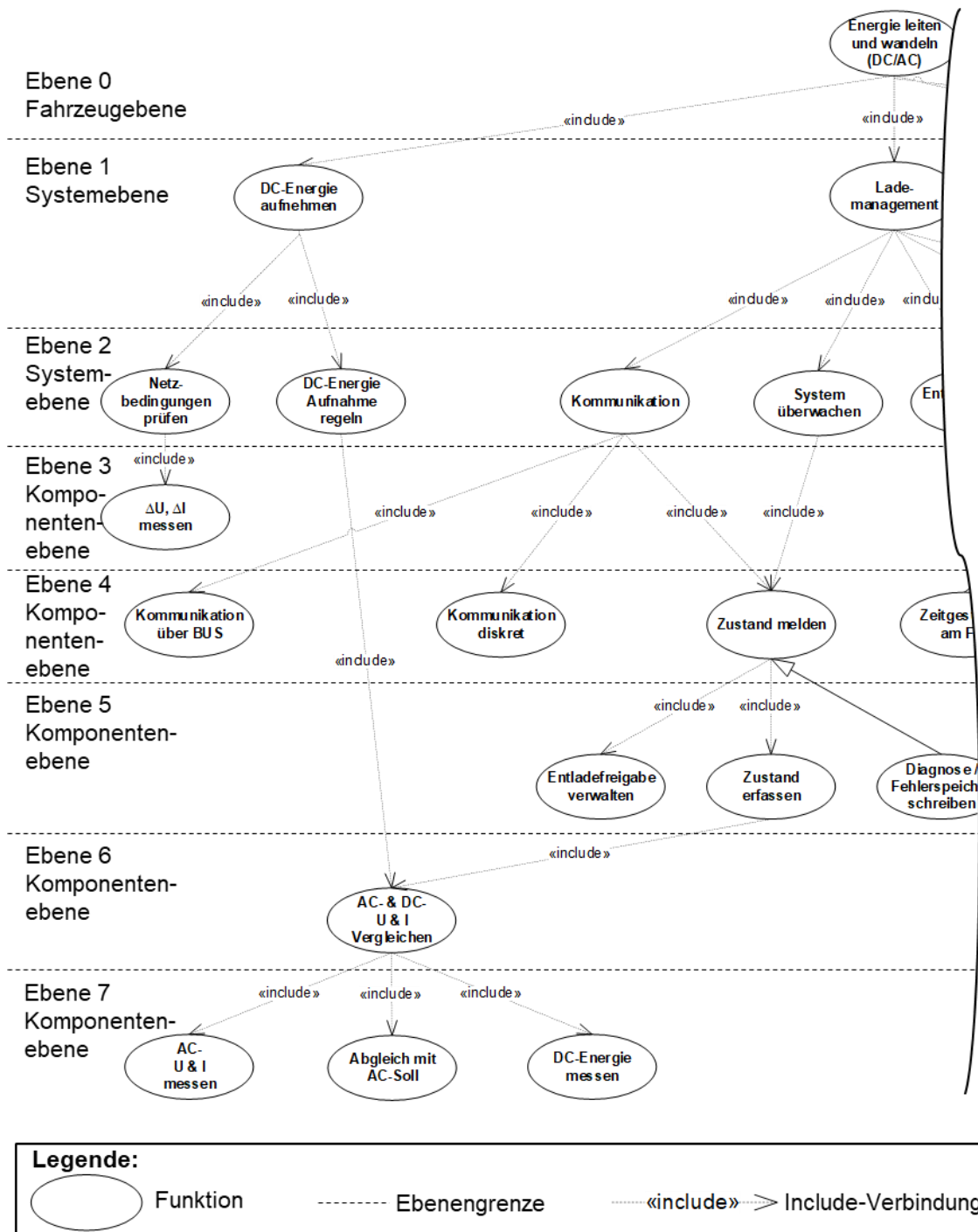


Bild 4-7: Einordnung von Funktionen in Ebenen

4.3.3 Gütekriterien

Insgesamt lassen sich drei Gütekriterien für die System-Funktionen identifizieren:

- **Formale Kriterien:** Mittels der formalen Kriterien wird bewertet, ob die richtige Darstellung gewählt wurde und ob sämtliche Elemente eine Verknüpfung haben. Die Bewertung erfolgt anhand der SysML-Richtlinien Version 1.5 [OMG17].

- Semantische Kriterien: Die Bewertung der Semantik erfolgt nach den Vorgaben in Kapitel 4.3.2.
- Disziplin Kriterien: Anhand des Kriteriums Disziplin wird überprüft, ob die Funktionen der unterste Ebene der Funktionshierarchie eindeutig einer Disziplin aus dem Bereich Mechanik, Elektronik oder Software zugeordnet werden kann. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, muss die betreffende Funktion weiter dekomponiert werden.

4.4 System-Eigenschaftserfassung

Systemeigenschaften sind, nach der Definition in Kapitel 2.1.11, eine systemspezifische Ausprägung einer Funktionalität zur Erreichung einer kundenerlebbarer Systemgesamtfunktion. Eine Systemeigenschaft kann folglich in Form einer Detaillierung einer Funktion beschrieben sein.

4.4.1 Definition

Ausgehend von der Definition einer Systemeigenschaft, dass diese eine systemspezifische Ausprägung einer kundenerlebbarer Systemgesamtfunktionalität darstellt, werden die Systemeigenschaften über eine Verknüpfung der Funktionalitäten des Systems und den Merkmalen des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks erarbeitet. Da es sich um eine kundenerlebbarer Systemgesamtfunktionalität handelt, sind die Funktionalitäten der ersten und zweiten Ebene zu verwenden (vgl. Kapitel 4.3.2). Die Verknüpfung erfolgt hierbei über sogenannte Frage-Satzmuster.

4.4.2 Vorgehen

Ausgehend von den System-Funktionen und den Merkmalen des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks findet eine Verknüpfung dieser beiden Artefakte über sogenannte Satzmuster statt. Diese Satzmuster sind in Fragenform aufgebaut.

Insgesamt stehen fünf Frage-Satzmuster zur Verfügung:

- Im Hinblick auf <Merkmal> welches Charakteristikum besitzt das System bezüglich <System-Funktion>?
- Unter dem Aspekt <Merkmal> und <System- Funktion > welche Eigenschaften muss das System besitzen?
- Gibt es Eigenschaften, die das System bezüglich <Merkmal> und <System- Funktion > besitzen muss?
- Welche Attribute muss das System durch eine Verknüpfung von <Merkmal> und <System- Funktion > besitzen?

- Wie ist das System bezüglich <System-Funktion > vor dem Hintergrund <Merkmal> charakterisiert?

Die Antworten auf die Frage-Satzmuster stellen die Systemeigenschaften dar.

Hierbei werden zunächst die zehn wichtigsten Merkmale des System-Merkmal-Netzwerks jeweils mit den System-Funktionen der ersten und zweiten Ebene verknüpft. Eine Einschränkung in der Initialerfassung der Systemeigenschaften auf die zehn wichtigsten Merkmale des System-Merkmal-Netzwerks ist nötig, um eine inhaltliche Beherrschbarkeit der Methode zu garantieren. Die Systemeigenschaften bilden bezüglich der Frage-Satzmuster ein Verhältnis 1:n aus. Somit ergeben sich bei beispielsweise drei System-Funktionen auf der Ebene eins und zwei insgesamt 30 Frage-Satzmuster. In einer weiteren Bearbeitung der System-Eigenschaftserfassung kommen System-Funktionen tieferer Ebenen zum Einsatz.

4.5 Das Systemmodell und die System-Wirkkettenanalyse

Bevor die folgende Phase System-Wirkkettenanalyse ab Kapitel 4.5.3 definiert wird, wird das Systemmodell als Darstellungs- und Arbeitsmedium erläutert. Das Systemmodell stellt alle bisherigen Artefakte und Resultate dar und wird in der folgenden Phase erweitert. Die Phase System-Wirkkettenanalyse hat zwei Hauptbestandteile. Diese sind zum einen die Verknüpfung des Systemmodells mit den Systemeigenschaften (Kapitel 4.5.3), zum anderen die Dekomposition der Schnittstellen und Wechselwirkungen (Kapitel 4.5.4).

4.5.1 Definition des Systemmodells

Das Systemmodell ist eines der Hauptarbeitsmedien und zentrales Element des vorgestellten Gesamtverfahrens. Das Systemmodell wird in Form sogenannter Wirkkettenmodelle dargestellt.




Das Wirkkettenmodell auf Systemumfeldebene gibt einen Überblick über die Systemgrenze und benachbarte Systeme und Komponenten und die Umwelt. Die Umwelt repräsentiert hier die Gesamtfahrzeugumwelt. Die Darstellung auf Systemumfeldebene entspricht einer Black-Box-Darstellung des Systems.

Die White-Box-Betrachtung entsteht durch eine weitere Ausdetaillierung der System-Black-Box mit den darin enthaltenen Komponenten Schnittstellen und Wechselwirkungen. Sämtliche Schnittstellen/Wechselwirkungen auf Systemumweltebene sind in dieser Betrachtungsebene auf die Subkomponenten zu dekomponieren. Dies ist in Kapitel 4.5.4 beschrieben.

4.5.1.1 Elemente des Systemmodells

Das Wirkkettenmodell wurde über den Stand der Technik hinaus durch eine Aufteilung der verschiedenen Wirkungsarten und durch die Modellelemente Merkmale, Funktionen und Eigenschaften erweitert. Hierdurch ist es möglich, eine „visuelle“ Durchgängigkeit von Merkmalen über Eigenschaften hin zum System, Komponenten und Bauelementen darzustellen. Diese im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Modellkonstrukte sind in Tabelle 5 abgebildet.

Tabelle 5: Neue Modellkonstrukte

Modellkonstrukt	Graphische Notation	Quelle
Merkmal		Merkmale sind das Ergebnis der Anwendung der Methode ganzheitliches System-Merkmal-Netzwerk.
Systemeigenschaft		Eigenschaften sind das Ergebnis der Phase „System-Eigenschaftenerfassung“.
Funktionen		Funktionen sind das Ergebnis der Anwendung Phase „System-Funktions-erfassung“. Diese verbinden die Merkmale mit den Eigenschaften.

4.5.1.2 Wechselwirkungen und Schnittstellen

Die Anzahl der Wechselwirkungsarten oder Attribute wurden im Rahmen dieser Arbeit erweitert, um den Anforderungen an die Entwicklung neuartiger Systeme im Automobil gerecht zu werden. Gegenüber den fünf verschiedenen Wechselwirkungs- und Schnittstellenarten von DETTMERING [DET08] können nun insgesamt acht unterschieden werden. Die Wechselwirkungs- und Schnittstellenarten sind: Mechanik, thermische Energie, Information, Stoff/Material, Elektrik, HV-Energie/-leistung, Optik/visuelle Wirkung und Akustik/Luftschall.

Die Aufgliederung der Flussarten Stoff, Energie und Information in die acht Arten der Wirkkettenmodellierung verhilft dem Anwender der Methode zu einem schnelleren Erfassen des Modells und der Identifikation der Hauptwechselwirkungen.

4.5.2 Formale Kriterien für die Wirkkettenerstellung

Nach der Erstellung der Wirkkette können verschiedene formale Kriterien für die Wirkkette herangezogen werden, um das Modell zu bewerten. Diese sind im Einzelnen:

- Haben alle Schnittstellen/Wechselwirkungen eine Quelle und eine Senke?
- Haben alle systeminternen Komponenten und Bauelemente mindestens eine ausgehende und eine eingehende Schnittstelle/Wechselwirkung.
- Sind alle ebenenübergreifenden Schnittstellen/Wechselwirkungen in den betroffenen Ebenen vorhanden.
- Sind alle Schnittstellen/Wechselwirkungen beschrieben.
- Ist die Beschreibung der Schnittstellen/Wechselwirkungen inhaltlich verständlich.
- Sind alle systeminternen und systemexternen Systeme, Komponenten und Bauelemente beschrieben und falls möglich mit einer Verantwortlichkeit gekennzeichnet.
- Sind alle relevanten Disziplinen bei der Erstellung berücksichtigt? Hierbei kann der Teilnehmerkreis bei der Erstellung und das Vorhandensein sämtlicher Wechselwirkungsarten betrachtet werden. Der Teilnehmerkreis wurde mithilfe der in der Automobilindustrie vorhandenen Rollen (vgl. Kapitel 2.3.6) bestimmt und in der VW80010 [VW80010] dokumentiert.

4.5.3 Verknüpfung der Systemeigenschaften zum Systemmodell

Wie eingangs beschrieben stellt das Systemmodell das zentrale Element des vorgestellten Vorgehens dar. Daher werden die Systemeigenschaften nach ihrer Definition und Erarbeitung anhand Kapitel 4.4 in das Systemmodell überführt.

4.5.3.1 Definition

Die Definition des Systemmodells und dessen Modellierungselementen in Kapitel 4.5.1 beinhaltet graphische Notationen für Systemmerkmale, System-Funktionen und Systemeigenschaften. Hierdurch ist es möglich, diese Artefakte des Gesamtverfahrens im zentralen Systemmodell abzubilden. Dadurch ist eine Nachverfolgung über alle Artefakte garantiert. Zudem findet eine Darstellung der Beeinflussung der Eigenschaften untereinander statt.

4.5.3.2 Vorgehen

Zunächst werden die Systemmerkmale im Systemmodell dargestellt. Ausgehend von diesen findet eine Verknüpfung hin zu den Systemeigenschaften mittels der System-Funktionen statt. Diese Verknüpfung ist die graphische Repräsentation der in Kapitel 4.4 vorgestellten Satzmuster.

Sind sämtliche Systemmerkmale, System-Funktionen und Systemeigenschaften im Systemmodell dargestellt, wird die Eigenschaftsbeeinflussung dokumentiert. Die Eigenschaftsbeeinflussung gibt an, ob sich Systemeigenschaften begünstigen oder negativ beeinflussen.

Ausgehend von den im Systemmodell dargestellten Eigenschaften werden aus diesen Schnittstellen und Wechselwirkungen abgeleitet (Bild 4-8). Hierbei ist darauf zu achten, dass die Eigenschaft das Gütekriterium Spezifikationswürdigkeit (vgl. 4.6.2.3) besitzt.

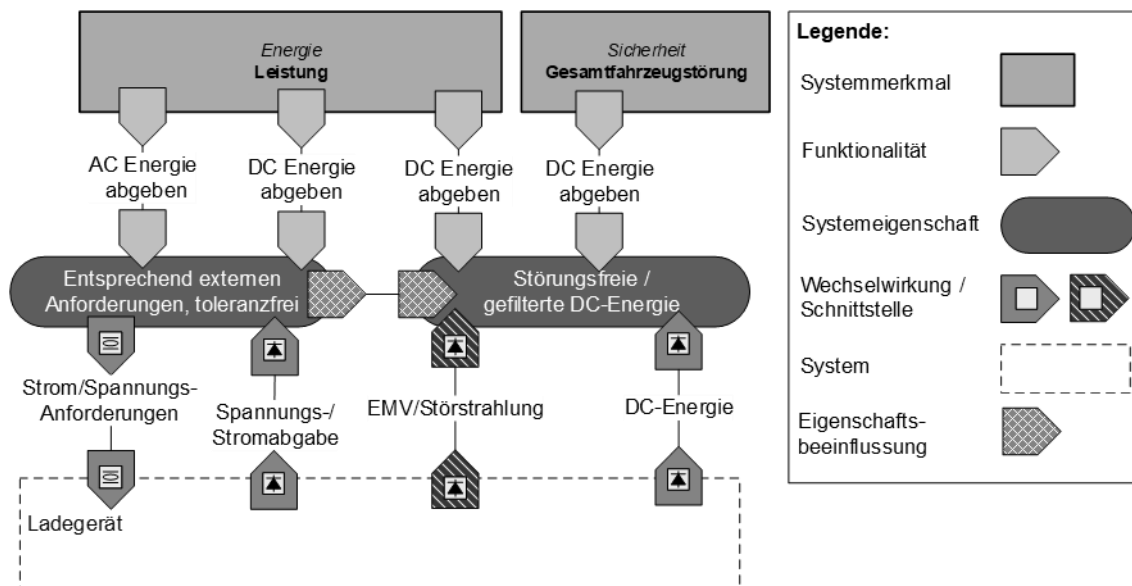


Bild 4-8: Verknüpfung von Systemmerkmalen, System-Funktionen und Systemeigenschaften mit dem Systemmodell

Mittels der Methode „Verknüpfung der Systemeigenschaften zum Systemmodell“ findet eine modellhafte Abbildung eines sogenannten House of Quality statt. Hierbei repräsentieren die Merkmale und die Funktionen die Kundenanforderungen (VoQ) und die Systemeigenschaften die technische Umsetzung. Die Verknüpfung dieser beiden Elemente wird durch die im Modell dargestellte Verbindung der Systemeigenschaften mit den Merkmalen über die Funktionen repräsentiert. In der obersten Matrizze, dem „Dach“, des House of Quality wird erfasst, wie sich die Elemente der technischen Umsetzung gegenseitig beeinflussen. Die Eigenschaftsbeeinflussung stellt dies im Modell dar. Durch Ableitung von Wechselwirkungen und Schnittstellen aus den Eigenschaften findet eine weitere Verfeinerung der technischen Anforderungen an das System statt (Bild 4-8). Die Auslegung des zu entwickelnde Systems ist an dieser Stelle lösungsneutral, da das System in einer Black-Box-Darstellung vorliegt.

4.5.4 Wirkketten-Dekomposition

Die sogenannte Dekomposition beschreibt das Aufteilen und Verteilen von Schnittstellen auf die Elemente der Wirkkette in einer tieferen Betrachtungsebene. Hierbei findet der Übergang von einer System Black-Box- hin zu einer White-Box-Darstellung statt.

4.5.4.1 Definition

Wechselwirkungen und Schnittstellen können abgesehen vom Gesamtsystem einzelne oder mehrere Subkomponenten des Systems betreffen oder beeinflussen. Findet eine Ausdetaillierung des Systems oder dessen Subkomponenten statt, so sind die Wechselwirkungen und Schnittstellen mit den Objekten der nächst tieferen Betrachtungsebene zu verknüpfen. Dieser Vorgang beschreibt die sogenannte Dekomposition.

4.5.4.2 Vorgehen

Initial werden alle aus den Eigenschaften abgeleiteten Wechselwirkungen und Schnittstellen an der Systemgrenze des betrachteten Systems platziert. Betrifft eine Schnittstelle/Wechselwirkung ein oder mehrere bestimmte Subelement des Systems, so wird diese an den Rand des Subelementes gelegt. Dies ist mit allen Wechselwirkungen/Schnittstellen durchzuführen. Für das Gesamtsystem gültige Wechselwirkungen werden an der Systemgrenze belassen.

Die Dekomposition beginnt mit der Systemhauptschnittstelle. Die Systemhauptschnittstelle ist derjenige Ausgang des Systems, der mit der Funktion auf höchster Ebene korrespondiert. Beispielsweise ist die Systemhauptschnittstelle eines Verbrennungsmotors ein aus dem System abgegebenes Drehmoment. Die Systemhauptschnittstelle eines Ladegerätes im Fahrzeug ist die Energieabgabe.

Ausgehend von dieser Schnittstelle wird die erste Subkomponente des Systems in der White-Box-Darstellung abgebildet. Diese ist je nach betrachtetem System eine mechanische-, thermische-, informations-, Material-, elektrische, optische- oder akustische Anbindung. Ausgehend hiervon wird die Hauptschnittstelle dieser Subkomponente identifiziert. Basierend hierauf wird diejenige Subkomponente in das System eingezeichnet, die diese Schnittstelle bereitstellen kann. Ist diese Vorgänger-Subkomponente nicht auf Antriebe identifizierbar, so findet ein Abgleich mit den Funktionen statt. Es wird diejenige Funktionalität identifiziert, die die Vorgänger Subkomponente zu realisieren hat. Hierdurch ist eine Identifikation der technischen Umsetzung eben dieser möglich.

In diesem iterativen Prozess (Bild 4-9) wird ausgehend vom Systemausgang und dessen Hauptschnittstelle das System mit dessen Subkomponenten abgebildet. Dies geschieht solange, bis die Hauptschnittstelle dieser Subkomponente von systemexternen Elementen bereitgestellt werden können. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist eine System White-Box-Darstellung. Exemplarisch ist dies für ein Hochvolt-System im Fahrzeug in Bild 4-10

dargestellt. Abschließend werden die Schnittstellen der Systemeigenschaften nach oben genanntem Vorgehen auf die Systemsubkomponenten gelegt.

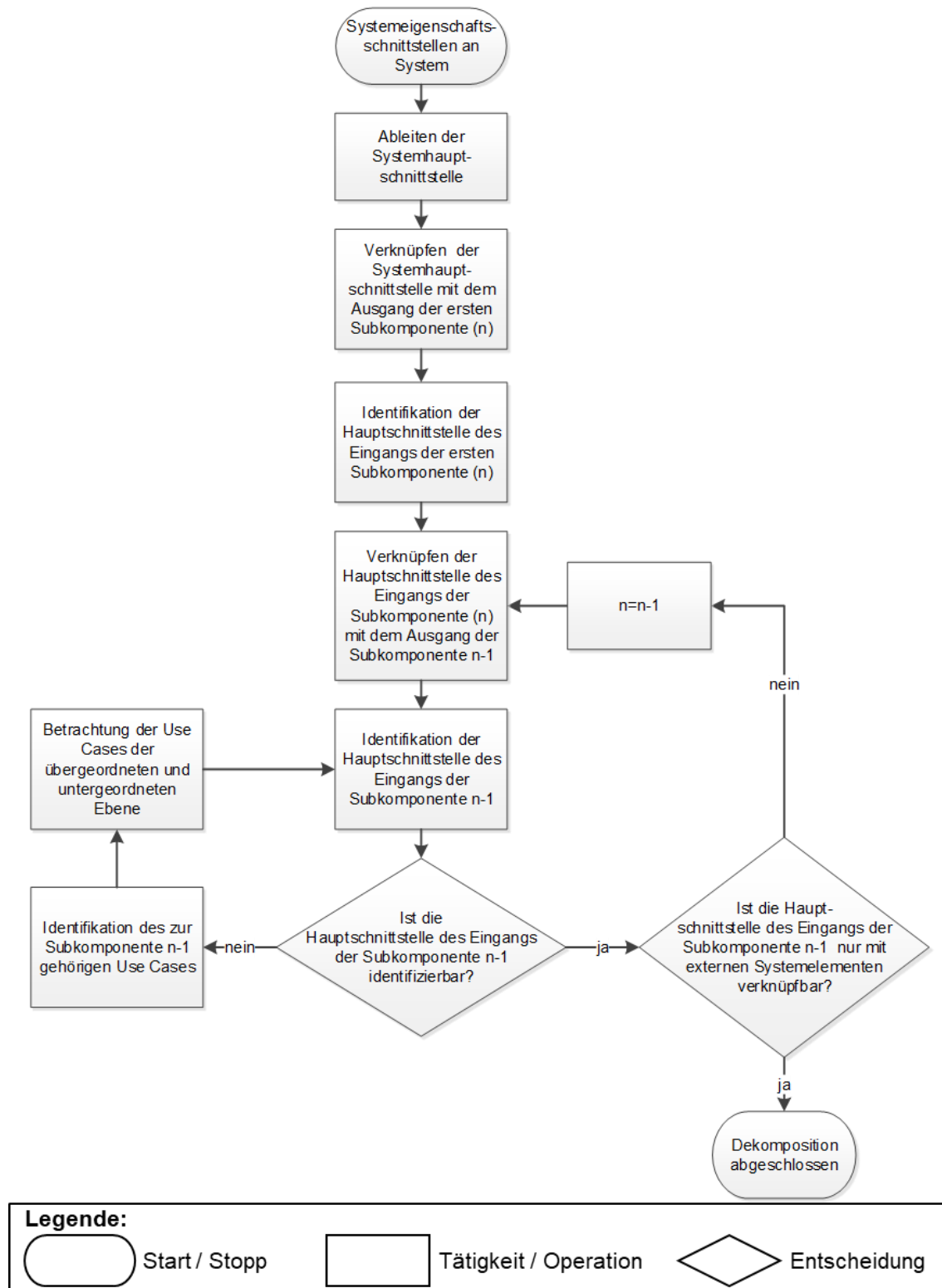


Bild 4-9: Flussdiagramm zur Durchführung der Methode „Dekomposition“

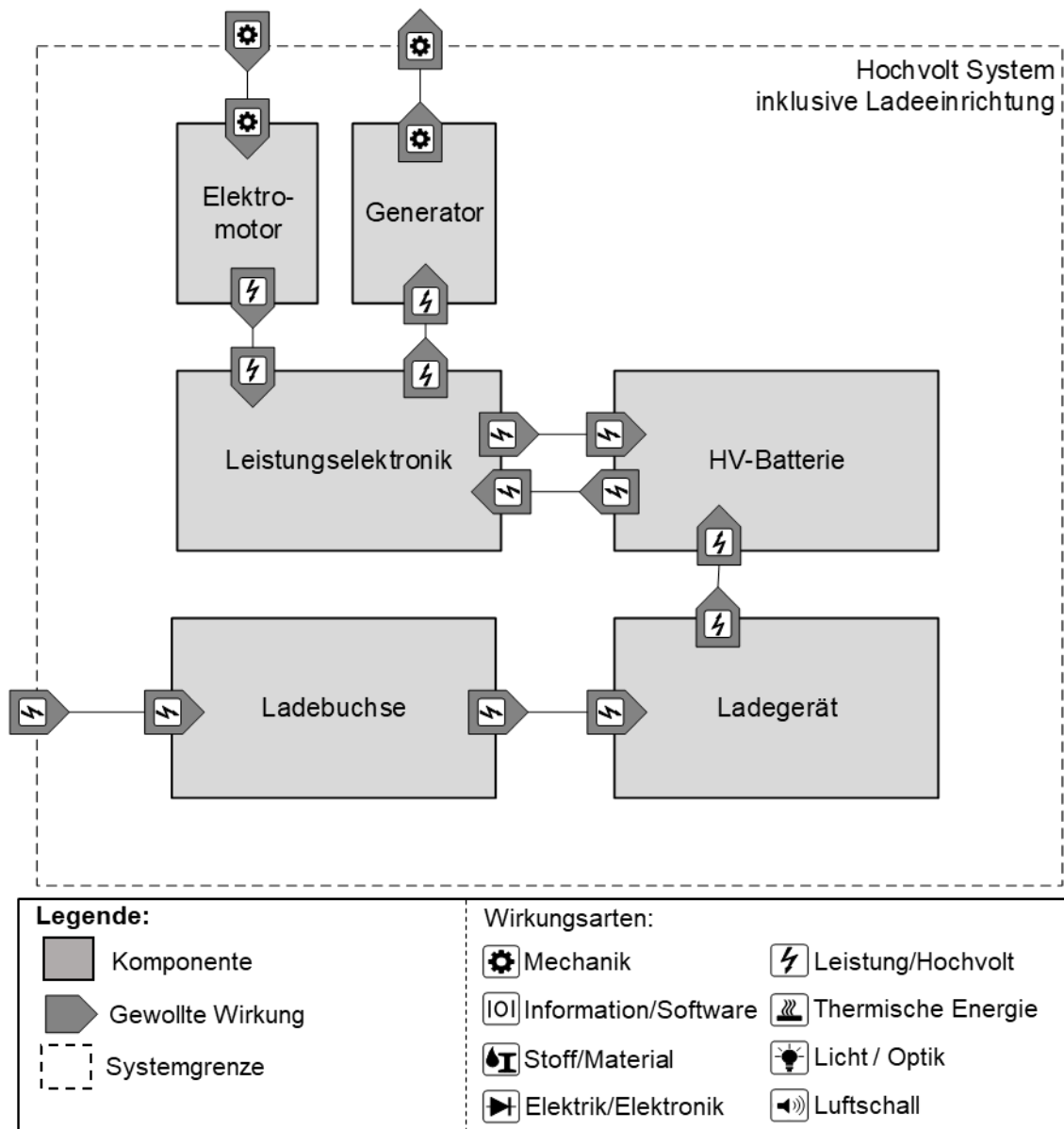


Bild 4-10: Dekomposition mittels Hauptflüssen anhand des Beispiels Hochvolt-System

Sind alle relevanten Schnittstellen und Wechselwirkungen auf die Subkomponenten des Systems gelegt worden, so findet die konkrete Systemauslegung statt. Hierbei ist es möglich, konkrete bereits existierende Systemsubkomponenten zu benennen und die Anforderungen an das System in einem Lastenheft zu dokumentieren.

4.6 Vorgehens- und Artefaktvalidierung

Ist das Systemmodell analog dem definierten Vorgehen aufgebaut, erfolgt die Validierung des Vorgehens und der einzelnen Artefakte auf zwei Arten. Zunächst findet in der Methode „Validierung Objektfunktionen“ der Abgleich des Systemmodells mit den Systemfunktionen statt. Mittels der Methode Spezifikationswürdigkeit wird im Anschluss

überprüft, ob sich die erarbeiteten Artefakte nutzen lassen, um Anforderungen der richtigen Güte zu definieren.

4.6.1 Validierung Objektfunktionen

Mittels der Validierung der Objektfunktionen ist es möglich, das Vorhandensein von Funktionen in einer physikalischen Systemausprägung zu überprüfen und das vorgestellte Gesamtverfahren inhaltlich zu überprüfen.

4.6.1.1 Definition

Die Methode „Validierung Objektfunktionen“ dient der inhaltliche Überprüfung der vorangegangenen Schritte und Artefakte „System-Eigenschaftens Erfassung“, „Wirkketten Eigenschaftsschnittstellen“, „Wirkkette Systemschnittstellen“ und Wirkkette Komponentenschnittstellen“. Die Methode basiert auf dem von KAISER vorgestellten Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme [Kai13].

Das Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme nach Kaiser beinhaltet mehrere Bestandteile. Kern der hier vorgestellten Methode bildet das Rahmenwerkelement „Richtlinien und Bedingungen der Modellierung“. Hierbei werden die Elemente des Systemmodells basierend auf deren Ein- und Ausgängen verschiedenen Klassen zugeordnet (Bild 4-11).

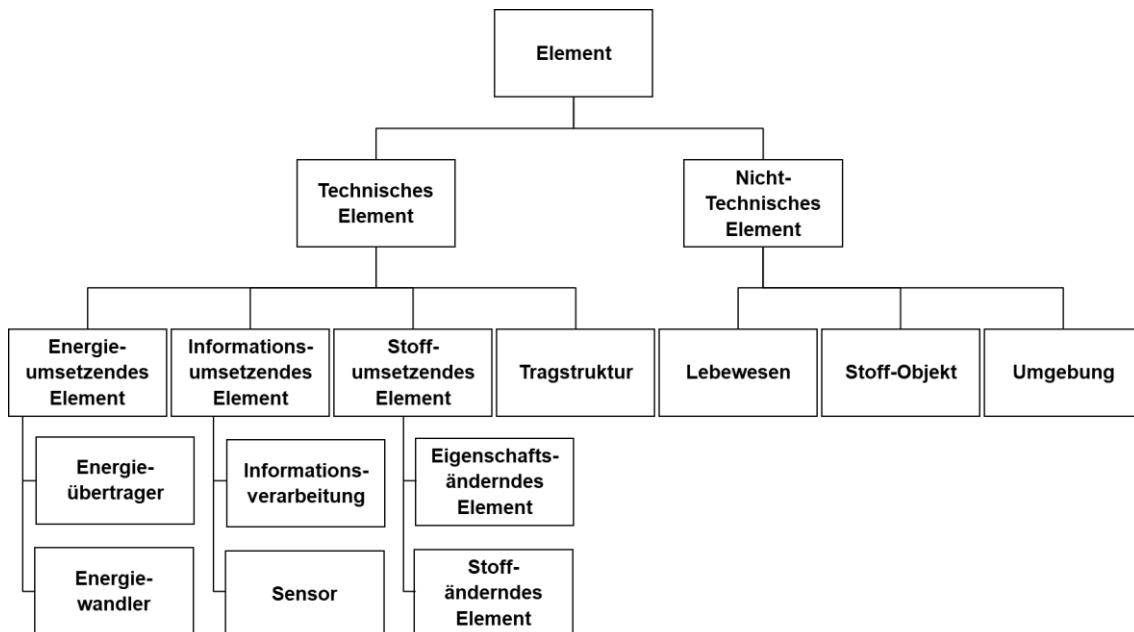


Bild 4-11: Elementklassen nach KAISER [Kai13]

Ausgehend von Bedingungen, die den Hauptfluss auf Ein- und Ausgangsseite eines Systemmodellelementes betreffen, findet die Einordnung in die verschiedenen Elementklassen statt:

„Bedingung: Energieumsetzende Elemente haben eine ein- und ausgehende Beziehung vom Typ «Energie».

Bedingung: Informationsumsetzende Elemente haben eine ein- und ausgehende Beziehung vom Typ «Information».

Bedingung: Stoffumsetzende Elemente haben eine ein- und ausgehende Beziehung vom Typ «Stoff».

Bedingung: Tragstrukturen haben mindestens eine Beziehung vom Typ «mechanische Verbindung».“

Durch eine weitere Verfeinerung der Elementklassen lassen sich weitere Klassifikationen für Elemente identifizieren (Bild 4-12). Diese Verfeinerung wurde für sämtliche Elementklassen durchgeführt.

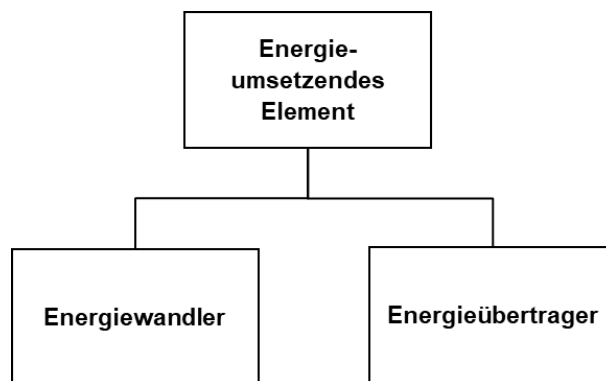


Bild 4-12: Klassifikation der energieumsetzende Elemente [Kai13]

4.6.1.2 Vorgehen

Jedem Element der Wirkkette ist eine Funktionalität zuzuordnen. Die Erweiterung dient dort der automatisierten Ausleitung einer Funktionsarchitektur aus einer Wirkkette. Hierdurch ist es möglich, zu überprüfen, ob die in der Phase „System-Funktionserfassung“ definierten Funktionen sich in einem Element in einer Wirkkette wiederfinden (Bild 4-13).

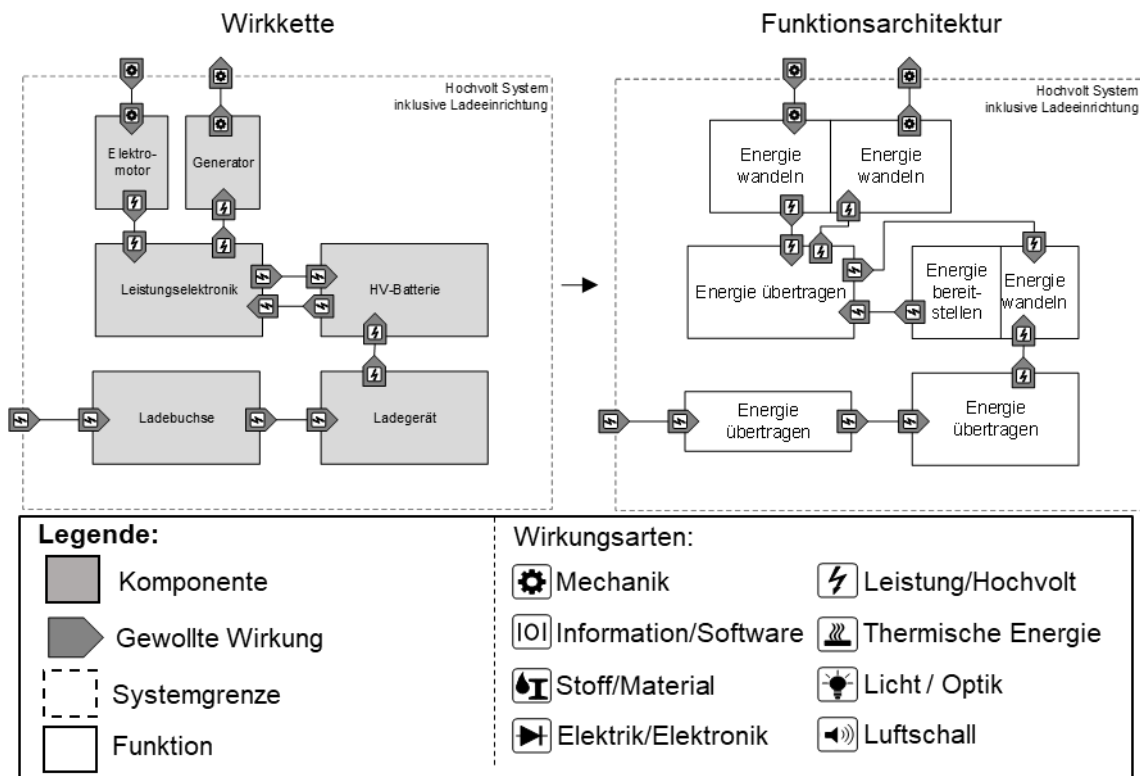


Bild 4-13: Ausleitung einer Funktionsarchitektur aus einer Wirkkette

Bei Anwendung des Gesamtverfahrens werden aus den „System-Funktionen“ die „Systemeigenschaften“ abgeleitet. Darauffolgend werden aus den „Systemeigenschaften“ „Systemschnittstellen“ ausgeleitet, die anschließend mittels „Dekomposition“ zu „Komponentenschnittstellen“ im Systemmodell werden. Durch die Methode „Validierung Objektfunktionen“ werden den Elementen in der Wirkkette deren inhärenten Funktionen zugeordnet und ein Quervergleich mit den „System-Funktionen“ durchgeführt. Hierdurch ist es möglich, die gesamte Methodenkette ausgehend von den „System-Funktionen“ inklusive deren Inhalte und sämtliche Schnittstellen im Systemmodell zu verifizieren. Die Ableitung der Funktion eines Elementes der Wirkkette erfolgt anhand dessen Hauptschnittstellen und der Richtlinien in Tabelle 6.

Tabelle 6: Funktionen von Elementen der Wirkkette basierend auf deren Hauptschnittstellen

Element-Hauptschnittstellen in der Wirkkette		Funktion
Eingangsschnittstelle	Ausgangsschnittstelle	
Mechanik	Mechanik	Kraft oder Bewegung wandeln oder leiten
Mechanik	Information/Software	Kraft oder Bewegung messen

Element-Hauptschnittstellen in der Wirkkette		Funktion
Eingangsschnittstelle	Ausgangsschnittstelle	
Mechanik	Elektrik/Elektronik	Kraft oder Bewegung messen
Mechanik	Akustik/Luftschall	Geräusch dämpfen oder mindern
Mechanik	Stoff/Material	Kraft oder Bewegung umwandeln
Thermik/thermische Energie	Thermik/thermische Energie	Wärme wandeln oder leiten
Thermik/thermische Energie	Stoff/Material	Temperatur abführen
Thermik/thermische Energie	Information/Software	Temperatur messen
Thermik/thermische Energie	Elektrik/Elektronik	Temperatur messen
Information/Software	Information/Software	Information wandeln oder leiten
Information/Software	Elektrik/Elektronik	Informationsmedium wandeln, BUS nach diskrete Leitung
Stoff/Material	Stoff/Material	Medium/Stoff wandeln oder leiten
Stoff/Material	Mechanik	Druck in Kraft oder Bewegung umwandeln
Stoff/Material	Thermik/thermische Energie	Wärme erzeugen
Stoff/Material	Information/Software	Physikalische oder chemische Eigenschaften messen
Stoff/Material	Elektrik/Elektronik	Physikalische oder chemische Eigenschaften messen
Stoff/Material	Akustik, Luftschall	Geräusch erzeugen
Elektrik/Elektronik	Elektrik/Elektronik	Strom/Spannung wandeln oder leiten

Element-Hauptschnittstellen in der Wirkkette		Funktion
Eingangsschnittstelle	Ausgangsschnittstelle	
Elektrik/Elektronik	Mechanik	Kraft oder Bewegung erzeugen
Elektrik/Elektronik	Thermik/thermische Energie	Wärme erzeugen
Elektrik/Elektronik	Information/Software	Informationsmedium wandeln, diskrete Leitung nach BUS
Elektrik/Elektronik	Optik/visuelle Wirkung	Optische Rückmeldung oder Beleuchtung erzeugen
Elektrik/Elektronik	Akustik, Luftschall	Geräusch erzeugen
Optik/visuelle Wirkung	Optik/visuelle Wirkung	Licht wandeln oder leiten
Optik/visuelle Wirkung	Information/Software	Optische Messung durchführen
Optik/visuelle Wirkung	Elektrik/Elektronik	Optische Messung durchführen
Akustik, Luftschall	Akustik, Luftschall	Geräusch wandeln oder leiten
Akustik, Luftschall	Information/Software	Geräusch messen
Akustik, Luftschall	Elektrik/Elektronik	Geräusch messen

Sind die Funktionen der einzelnen Elemente der Wirkkette abgeleitet, so erfolgt der Abgleich mit den System-Funktionen. Hierbei ist sicherzustellen, dass für jede der Funktionalitäten mindestens eine Funktion in der Wirkkette vorhanden ist.

Der Abgleich kann hierbei auf zwei Arten erfolgen. Durch die nahtlose Verknüpfung der „System-Funktionserfassung“ über die „Systemeigenschaften“ hin zu Schnittstellen, die mit den Elementen der Wirkkette verknüpft sind, kann automatisiert überprüft werden, ob die Elemente mit deren zugeordneten (Sub-)Funktion in Verbindung stehen. Zudem kann durch einen manuellen Vergleich der abgeleiteten Funktionen der Elemente der Wirkkette mit den Funktionen ein manueller Abgleich durchgeführt werden.

Die Methode „Validierung Objektfunktionen“ bietet darüber hinaus noch die Möglichkeit, die Abgrenzung des Systems zu überprüfen. Findet sich für eine System-Funktion eine adäquate Funktionen in einem Systemumfeldelement der Wirkkette, wurde bei der Erstellung der Wirkkette das System falsch abgegrenzt.

Als Beispiel dient die Funktion „Drehmoment wandeln“ aus den Systemfunktionen für einen elektrischen Antrieb. Ist in der Wirkkette das Element *Getriebe* außerhalb der Systemgrenzen, so befinden sich die System-Funktionen und die Wirkkette in einem anderen Kontext. Eine Überprüfung des Kontextes und eine Anpassung der System-Funktionen oder der Wirkkette sind daher nötig.

4.6.2 Inhaltliche Gütekriterien/Spezifikationswürdigkeit

Das Erarbeiten der Systemarchitektur und der Eigenschaften dient in dem vorgestellten Gesamtverfahren zur Ableitung/Dekomposition und Erfassung der hauptrelevanten Anforderungen. Daher kann für jede Eigenschaft und für jede Schnittstelle/Wechselwirkung der Wirkkettenmodellierung überprüft werden, ob dies erreicht wurde. Das Erreichen dieses Ziels wird mittels des Gütekriteriums „Spezifikationswürdigkeit“ ausgedrückt. Da es die konkrete Ausprägung von Schnittstellen/Wechselwirkungen und Eigenschaften bewertet, ist es als inhaltliches Gütekriterium zu betrachten.

4.6.2.1 Anforderungen an eine Spezifikationswürdigkeit

Mittels des Gütekriteriums „Spezifikationswürdigkeit“ wird überprüft, ob aus einer Wechselwirkung/Schnittstelle oder Eigenschaft eine Anforderung abgeleitet werden kann, die den in Kapitel 2.1.9 definierten Qualitätskriterien entspricht.

Im „klassischen“ Anforderungsmanagement wird überprüft, ob alle Anforderungen den geforderten Qualitätskriterien entsprechen. Mittels der Spezifikationswürdigkeit wird hingegen überprüft, ob eine Wechselwirkung/Schnittstelle oder Eigenschaft die benötigte Voraussetzung erfüllt, um eine qualitativ hochwertige Anforderung abzuleiten. Hierbei wird auf die hauptrelevanten Anforderungen an das System und dessen Subkomponenten fokussiert. Durch dieses Vorgehen ist es möglich, den Arbeitsaufwand zu reduzieren, da erst dann eine Spezifikation erarbeitet wird, sobald die benötigten Voraussetzungen vorhanden sind und diese als hauptrelevant identifiziert wurde. Die Anforderungen an die Spezifikationswürdigkeit leiten sich indirekt aus den Qualitätskriterien für Anforderungen ab.

4.6.2.2 Spezifikationswürdigkeit von Wechselwirkungen/Schnittstellen

Aufgrund von einer übersichtlichen Darstellung des Systemmodells ist es sinnvoll, Wechselwirkungen und Schnittstellen der gleichen Art im Modell zu einer Wechselwirkung/Schnittstelle zusammenzufassen. Mittels des in Bild 4-14 dargestellten Ablaufes ist es möglich zu evaluieren, ob hierdurch die Spezifikationswürdigkeit von Wechselwirkungen/Schnittstellen nach wie vor gegeben ist.

Insbesondere Schnittstellen, die einen Informationsaustausch zweier Objekte visualisieren, werden häufig zusammengefasst. Dies ist nötig, da in einem modernen Fahrzeug

zwischen den Systemen und Komponenten eine Vielzahl von Informationen ausgetauscht wird. Die Darstellung jeder Information in Form einer eigenen Schnittstelle würde die Übersichtlichkeit eines Systemmodells nachhaltig einschränken.

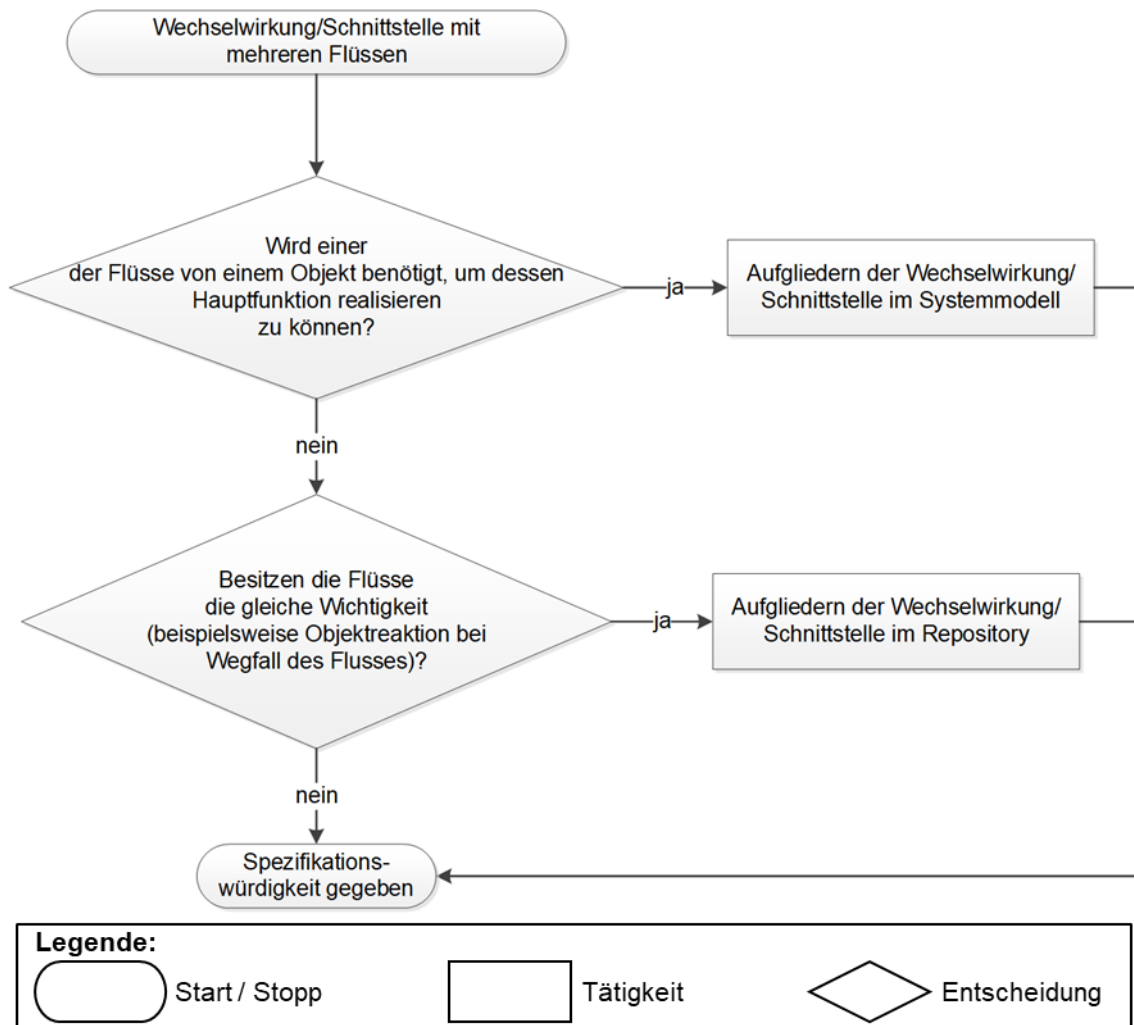


Bild 4-14: Flussdiagramm zur Evaluierung der Spezifikationswürdigkeit von Wechselwirkungen/Schnittstellen

In einem Systemmodell findet sich beispielsweise zwischen einer Ölpumpe im Fahrzeug und einem Steuergerät mit der Pumpenansteuerung eine bidirektionale CAN-Schnittstelle. Diese Schnittstelle beinhaltet mehrere Informationsartefakte, die zwischen Pumpe und Steuergerät ausgetauscht werden. Hierunter sind Steuerbefehle, Zustandsrückmeldungen und Diagnoseabfragen. Mittels des in Bild 4-14 vorgestellten Vorgehens, kann nun überprüft werden, ob dies im Sinne der Spezifikationswürdigkeit dieser Schnittstelle zulässig ist. Die Hauptfunktion der Pumpe ist es, einen Medientransport zu realisieren. Daher ist die Informationsschnittstelle entgegen den Medienschnittstellen an der Pumpe nicht für dessen Hauptfunktion verantwortlich. Hingegen besitzen die Informationsartefakte eine unterschiedliche Wichtigkeit bezüglich deren Vorhandensein. Wird eine Diagnoseinformation seitens der Pumpe nicht zurückgeliefert, ist die Pumpe dennoch einsatzbereit und kann ihre Hauptfunktion wahrnehmen. Fällt jedoch die

Ansteuerungsschnittstelle aus, so ist die Pumpe hierzu nicht mehr in der Lage. Daher muss die Schnittstelle im Systemmodell weiter aufgegliedert werden.

4.6.2.3 Spezifikationswürdigkeit von Eigenschaften

Die Spezifikationswürdigkeit von Eigenschaften ist hauptsächlich davon abhängig, ob die richtige Granularität der Eigenschaft gewählt wurde. Grobgranulare Eigenschaften lassen sich aufgrund ihres unspezifischen Charakters schwer oder gar nicht in Form von physikalischen Wechselwirkungen und Schnittstellen darstellen. Auch eine Spezifikation im Sinne einer qualitativ hochwertigen Anforderung (vgl. Kapitel 2.1.9) ist schwer möglich und fehlerbehaftet.

Die Eigenschaft eines Scheinwerfersystems „Optimale Ausleuchtung der Fahrbahn“ ist eine im Sinne der Spezifikationswürdigkeit unzulässige Eigenschaft. Diese Eigenschaft stellt keine Gesetzesanforderung an ein Scheinwerfersystem im Fahrzeug dar. Im Grundsatz beinhaltet die Eigenschaft „Optimale Ausleuchtung der Fahrbahn“ ein optisches Feedback der durch das Scheinwerfersystem beeinflussten Fahrzeugumwelt auf einen Fahrer. Hierbei treten mehrere Randbedingungen auf, die jeweils einzeln spezifiziert werden müssen.

Zur Identifikation der richtigen Granularität dieser Eigenschaft zur Erreichung einer Spezifikationswürdigkeit bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten (Bild 4-15). Zum einen kann mittels der Dekomposition der Eigenschaft im Systemmodell durch spezifizierbare Wechselwirkungen/Schnittstellen eine Spezifikationswürdigkeit erreicht werden. Zum anderen kann durch eine Einbeziehung feingranularer Funktionen die Eigenschaft selbst feingranularer und hierdurch spezifikationswürdig werden.

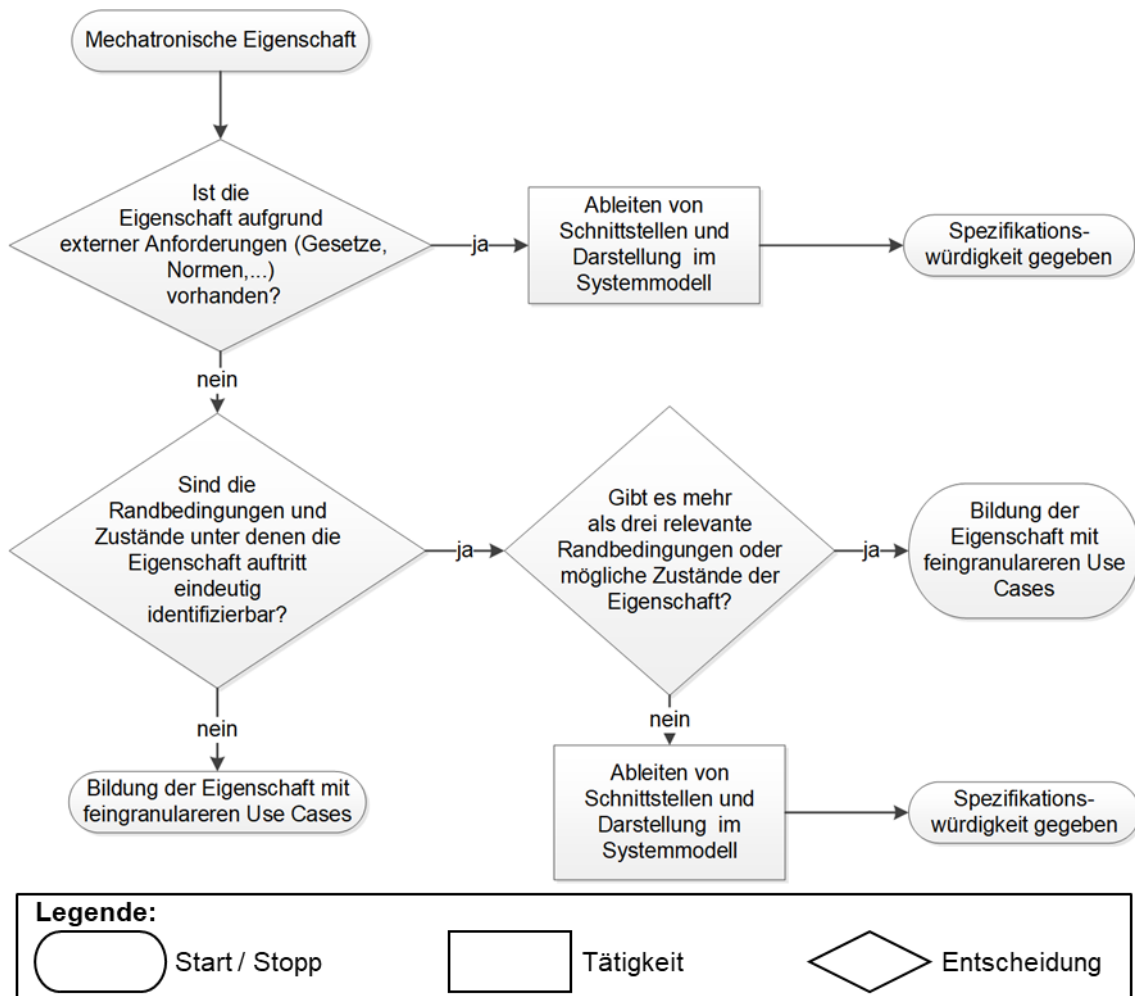


Bild 4-15: Flussdiagramm zur Evaluierung der Spezifikationswürdigkeit von Eigenschaften

Da diese Eigenschaft durch eine Vielzahl externer Fahrzeugrandbedingungen beeinflusst wird, ist eine Aufgliederung in Wechselwirkungen/Schnittstellen nicht zielführend. Jedoch kann die System-Funktion „*Fahrbahn ausleuchten*“ beispielsweise in die Funktionen „*Fahrbahn bei Regen ausleuchten*“, „*Fahrbahn bei Schnee ausleuchten*“ und „*trockene Fahrbahn ausleuchten*“ weiter dekomponiert werden. Darüber hinaus gliedert sich die Funktion „*Fahrbahn bei Regen ausleuchten*“ in die Unterfunktionen „*Eigenblendung vermeiden*“ und „*Regen erkennen*“ auf.

Die Funktion „*Eigenblendung vermeiden*“ kann in mittels eines Reflektionsindex der Straße eindeutig in der Anforderung x Im festgeschrieben werden. „*Regen erkennen*“ beinhaltet die Anforderung, dass das System fähig sein muss, zu identifizieren, wie der Witterungszustand ist. Ob diese Anforderung von dem System selbst oder durch eine Schnittstelle seitens des Fahrzeuges umgesetzt wird, wird mittels des Systemmodells ersichtlich.

4.7 Lessons Learned

Im vorgestellten Gesamtverfahren werden weitere Entwicklungserkenntnisse in Form von Lessons Learned erfasst und dokumentiert. Dies geschieht mittels sogenannter objektunabhängiger Lessons Learned.

4.7.1 Quellen von Lessons Learned

Lessons Learned werden kontinuierlich über den Projektverlauf und bei Projektabschluss erfasst. Es lassen sich hierbei unterschiedliche Quellen für Lessons Learned identifizieren. Dies sind im Einzelnen: das Systemmodell, Hardware- oder Mechanikreviews von Systemen, Test und Absicherung, die Produktion und der Kundendienst.

Die Lessons Learned aus den verschiedenen Quellen stellen im Kern gelöste Problemstellung während und nach der Entwicklung eines Systems dar. Zur Erfassung und späteren Wiederauffindbarkeit der gelösten Problemstellung ist ein intuitives und eindeutiges Verfahren nötig.

4.7.2 Vorgehen

Die Kategorisierung der Lessons Learned geschieht anhand der Produktgruppe, in der die Lessons Learned aufgetreten ist und anhand der Merkmale des ganzheitlichen System-Merkmal-Netzwerks. Hierbei werden drei der 107 Merkmale genutzt, die die Lessons Learned am besten umschreiben. Hierdurch ist es möglich, bei der Suche von Lessons Learned auch solche mit einzubeziehen, die eine andere Produktgruppe beschreiben. Zudem bietet sich die Möglichkeit einer unspezifischen Suche, bei der nur nach einem Merkmal gesucht wird, bis zu einer spezifischen Eingrenzung, bei der alle drei Merkmalen in die Suche einbezogen werden, durchzuführen. Zur Erfassung der Lessons Learned dient ein Formblatt (Bild 4-16).

Lessons Learned				
Ursprung:		Realteil	Modell	Sonst.:
Thema:				
Klassifikation	Merkmale des System-Merkmal-Netzwerk, die die Lessons Learned beschreiben			
	Merkmal 1:			
	Merkmal 2:			
	Merkmal 3:			
	Produktgruppe:			
Beschreibung	spezifischer Auftrittsort:			
	Fehlerbeschreibung / Fehlerbild oder Best Practice:			
	Abstellmaßnahme			
	(Fehler-)ursache:			
Ansprechpartner:		Max Mustermann Abteilung, Firma		Eindeutige Identifikationsnummer: xyz

Bild 4-16: Formblatt zur Erfassung von Lessons Learned

Das Formblatt in Bild 4-16 enthält verschiedene Bereiche. Im Bereich Ursprung kann die Herkunft der Lessons Learned hinterlegt werden. Dies kann ein realexistierendes Teil oder System, das Systemmodell oder ein sonstigen Ursprung haben. Eine Überschrift für die Lessons Learned kann im Feld „Thema“ hinterlegt werden. Der Bereich „Klassifikation“ enthält die auszuwählenden Merkmale des System-Merkmal-Netzwerks und die Produktgruppe. In der Beschreibung kann anhand einer Ursache-, Wirkungs- und Lösungsbeschreibung die Lessons Learned umfassend spezifiziert werden. Abschließend befinden sich die Kontaktdaten des Ansprechpartners zu dieser Lessons Learned und die eindeutige Identifikationsnummer dieser Lessons Learned. Die eindeutige Identifikationsnummer ist stets nur einer Lessons Learned zugeordnet und darf nur einmal vergeben werden. Wird beispielsweise eine Lessons Learned durch eine neue und verbesserte Lösung obsolet, so ist in der veralteten Lessons Learned auf die neue zu referenzieren. Das hier vorgestellte Vorgehen zur Erfassung von Lessons Learned kann in einer beliebigen Datenbankapplikation abgebildet werden.

Objektunabhängige Lessons Learned zeichnen sich dadurch aus, dass die Beschreibung der Lösung kein konkret abgrenzbares Objekt enthält. Das Fehlen eines solchen Objektes in der Lösungsbeschreibung bedeutet, dass die Lösung allgemeingültig für mehrere Systeme/Komponenten angewendet werden kann. Die Beschreibung der Lösung ist somit rein textbasiert. Hierdurch hat der Transfer in das zu entwickelnde System händisch zu erfolgen. Die Beschreibung der objektunabhängigen Lessons Learned muss zudem eindeutig formuliert sein. Ein Beispiel für eine solche Lessons Learned ist in Bild 4-17 dargestellt.

Lessons Learned				
Ursprung:		Realtail	Modell	Sonst.:
Thema:		Bedienhebel schaltet selbstständig		
Klassifikation	Merkmale des System-Merkmal-Netzwerk, die die Lessons Learned beschreiben			
	Merkmal 1:	dynamische Kräfte		
	Merkmal 2:	Gewicht		
	Merkmal 3:	Haptik		
	Produktgruppe:	Schalter / Bedienelement		
Beschreibung	spezifischer Auftrittsort:	Tempomathebel		
	Fehler-beschreibung / Fehlerbild oder Best Practice:	Tempomathebel schaltet selbstständig beim Überfahren von Unebenheiten		
	Abstell-maßnahme	Reduzierung des Hebelgewichts		
	(Fehler-) ursache:	- Haptik sehr weich ausgelegt (Kundenwunsch) - Hebelgewicht zu hoch		
	Ansprechpartner:	Max Mustermann Abteilung, Firma		Eindeutige Identifikationsnummer: 146732

Bild 4-17: Beispiel einer objektunabhängigen Lessons Learned

4.7.3 Einbeziehung der Lessons Learned in den vorgestellten Gesamtansatz

Eine frühzeitige Einbeziehung von Lessons Learned in ein Systementwicklungsprojekt wird durch das vorgestellte Vorgehen ermöglicht. Dadurch, dass die Lessons Learned anhand der Merkmale der Elementklassifikation kategorisiert sind, stehen bereits nach Anwendung der Methode sämtliche relevanten Lessons Learned zur Verfügung. Ausgehend von den relevanten Systemmerkmalen kann ein Abgleich mit einer Lessons Learned Datenbank durchgeführt werden. Befindet sich in dieser eine Lessons Learned, die die relevanten Merkmale eines Systems enthält, so ist diese mit in die Entwicklung einzubeziehen.

4.8 Repository

Das Repository dient als Medium zur Datenhaltung und beinhaltet die Methoden Produktionseinfluss und Test und Absicherung. Grundsätzlich lässt sich das Repository in jeder Datenbankapplikation abbilden, im hier dargestellten Vorgehen ist es, aufgrund seiner hohen Verbreitung, in der Applikation Microsoft Excel realisiert.

Das Repository beinhaltet sämtliche Methodenergebnisse und ist in verschiedene Kategorien unterteilt. Die Kategorien im Tool Excel sind in Bild 4-18 dargestellt.

5 Validierung des Gesamtvorgehens

Im folgenden Kapitel wird das in Kapitel 4 vorgestellte *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele validiert. Das vorgestellte Vorgehen wurde in mehreren Entwicklungsprojekten der AUDI AG erfolgreich eingesetzt.

Das Gesamtvorgehen wird anhand des aktuellen Entwicklungsprojektes Brennstoffzelle exemplarisch in Kapitel 5.1 angewendet. Im Anschluss werden Beispiele aus anderen Entwicklungsprojekten aufgeführt, wo durch die Anwendung des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* neue und vorher unbekannte Anforderungen identifiziert werden konnten. Abschließend wird in Kapitel 5.4 das validierte Vorgehen hinsichtlich der Anforderungen (vgl. Kapitel 2.6) bewertet.

5.1 Anwendungsbeispiel: Brennstoffzelle

In diesem Kapitel wird das *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme* anhand der Entwicklung eines Brennstoffzellenantriebes bewertet. Zum Einsatz sollen neuartige Brennstoffzellen kommen [Kar16-ol]. Durch eine Brennstoffzelle wird mittels einer chemischen Reaktion aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie gewonnen. Neben elektrischer Energie fällt als Reaktionsprodukt reines Wasser an.

Die elektrische Energie, die in der Brennstoffzelle gewonnen wird, dient dem Fahrzeugantrieb mittels Elektromotoren. Als weiteres Element eines solchen Antriebssystems wird eine Hochvoltbatterie benötigt. Diese wird beim Zwischenspeichern von elektrischer Energie bei beispielsweise einem Rekuperationsvorgang (Rückgewinnung von elektrischer Energie aus der kinetischen Energie des Fahrzeuges beim Bremsen) benötigt. Eine schematische Darstellung eines Brennstoffzellenfahrzeuges ist in Bild 5-1 zu sehen.

Mittels des ausgewählten Anwendungsbeispiels wird, ausgehend von Fahrzeuganforderungen, gezeigt, wie das *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* angewendet wird. Die Themen Spezifikationswürdigkeit und Lessons Learned werden hierbei direkt in die einzelnen Phasen integriert. Das in Kapitel 4.8 definierte Repository wird bei Durchführung der Einzelmethode durch das Projektteam befüllt.

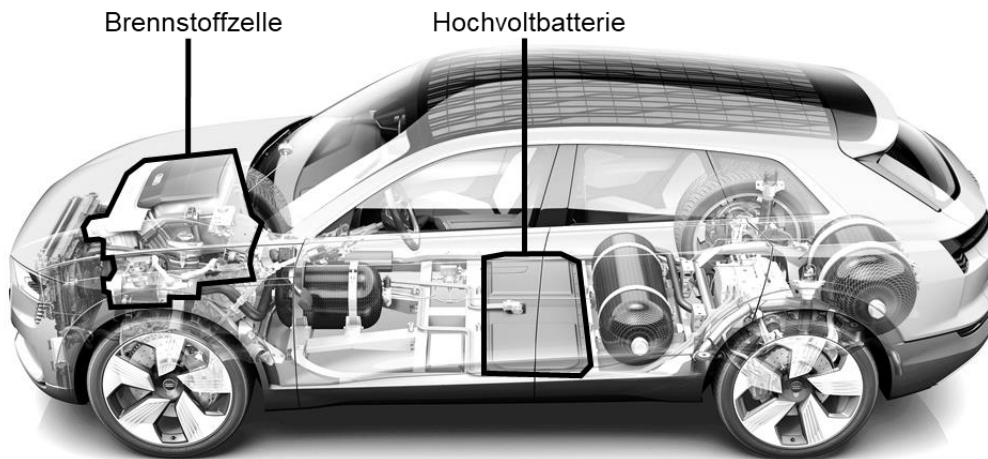


Bild 5-1: Schematische Darstellung eines Fahrzeuges mit Brennstoffzelle (Quelle: AUDI AG)

5.1.1 Phase 1: System-Merkmalserfassung

Hier schätzen die Projektmitglieder die Relevanz der einzelnen Merkmale für das zu entwickelnde System ein. Mittels der Beziehungsmatrix (Bild 4-4) ergeben sich die für das System relevanten Merkmale. Das Ergebnis ist in Tabelle 7 dargestellt, in der die 20 relevanten Merkmale abgebildet sind.

Die Ergebnisse werden in zwei unterschiedlichen Klassen dargestellt. Zum einen werden die Merkmale, die von den Projektmitgliedern als relevant eingestuft wurden, aufgeführt, zum anderen, die Merkmale, die rein aufgrund der Abhängigkeiten eine hohe Relevanz für das System haben.

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass sehr häufig Merkmale aus der Kategorie *Ergonomie* aufgeführt sind. Diese Kategorie wurde von den Projektmitgliedern jedoch als nicht relevant für das System eingestuft. Die Einstufung erfolgte aufgrund der Einschätzung, dass ein Kunde nie direkt mit dem System in Interaktion treten kann. Aufgrund dieses Ergebnisses werden die Stakeholder Marketing und Vertrieb unmittelbar in das Projekt integriert. Die Bereiche Marketing und Vertrieb haben aufgrund einer Vielzahl von Untersuchungen ein fundiertes Wissen über das Kundennutzungsverhalten eines Fahrzeuges. Die Einschätzung der Bereiche Marketing und Vertrieb zu dem geplanten System ist, dass aufgrund des Neuheitsgrades des Systems, der Kunde einen erhöhten Informationsbedarf über den aktuellen Zustand und die Funktionsweise des Systems im Fahrbetrieb hat.

Dadurch entstehen zusätzliche Anforderungen an das System, die in der weiteren Anwendung des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* Beachtung finden.

Tabelle 7: Ergebnis der Methode ganzheitliches System-Merkmal-Netzwerk beim Brennstoffzellen-Hochvolt-Batterie-System

Relevante Systemmerkmale des Brennstoffzellen-Hochvolt-Batterie-System				
Nr.	als relevant eingestuft		als nicht relevant eingestuft	
	Kategorie	Merkmal	Kategorie	Merkmal
1	Energie	Leistung	Ergonomie	Gebrauchssicherheit
2	Sicherheit	Systemfunktionsstörung	Ergonomie	Fehlbedienung
3	Kontrolle	Prüfvorschriften (TÜV, Gesetze,...)	Energie	Wellen (physikalisch).
4	Sicherheit	Gesamtfahrzeugsstörung	Optik (physikalisch)	Relevant für Benutzer
5	Sicherheit	Betriebssicherheit	Kräfte	Resonanzen
6	Energie	Verlust	Kräfte	Federeigenschaften
7	Geometrie	Dichtigkeit	Kräfte	dynamisches Verhalten
8	Energie	Erwärmung	Kräfte	Häufigkeit
9	Energie	Kühlung	Kräfte	Last
10	Fzg.-Eigenschaften	Umwelteinflüsse (Steinschlag,...)	Kinematik	Bewegungsart
11	Stoff	Verschmutzung	Kinematik	Geschwindigkeit
12	Sicherheit	Unmittelbare Sicherheitstechnik	Kinematik	Beschleunigung
13	Energie	Störung / EMV	Kräfte	Richtung
14	Instandhaltung	Reparatur	Ergonomie	Beleuchtung
15	Gebrauch	Verschleiß	Ergonomie	Gebrauchstauglichkeit
16	Sicherheit	Schutzsystem	Signal	Funk
17	Signal	Betriebsüberwachung	Ergonomie	Formgestaltung
18	Zustand	Melden	Ergonomie	Bedienungsart
19	Signal	Stecker	Gebrauch	Sichtbereich
20	Signal	Signalstabilität	Geometrie	Varianten

5.1.2 Phase 2: System-Funktionserfassung

Als nächster Schritt wird ausgehend vom Kunden eine Funktionshierarchie erstellt. Dies geschieht mittels der in Kapitel 4.3 formulierten wiederkehrenden Fragestellung durch die Projektmitglieder.

Durch das Projektteam werden insgesamt acht kundenrelevante System-Funktionen auf Gesamtsystemebene identifiziert. Diese sind: „*Fahrbetrieb gewährleisten*“, „*Sicherheit gewährleisten*“, „*Systemstart gewährleisten*“, „*Systemstopp gewährleisten*“, „*Innenraumklimatisierung sicherstellen*“, „*Gesetzesanforderungen gewährleisten*“, „*Diagnose sicherstellen*“ und „*Wartung gewährleisten*“. Analog des in Kapitel 4.3 definierten Vorgehens werden diese durch die Projektmitglieder in Form einer Funktionshierarchie

dekomponiert. Die System-Funktionen werden hierzu permanent mit den definierten Gütekriterien abgeglichen. Ein Auszug aus der Systemfunktion „Fahrbetrieb gewährleisten“ ist in Bild 5-2 dargestellt.

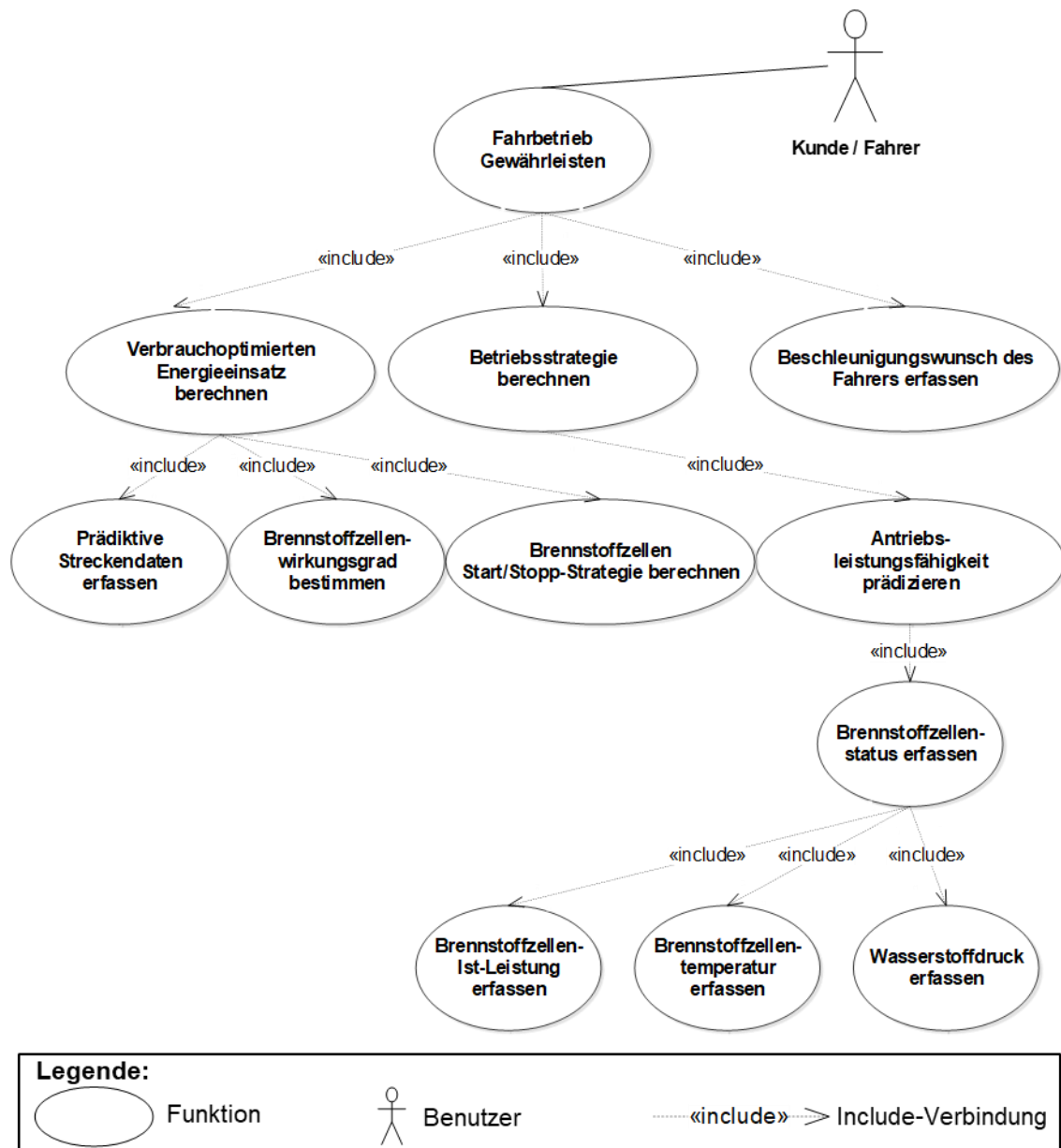


Bild 5-2: Auszug aus der System-Funktion „Fahrbetrieb gewährleisten“ des Brennstoffzellen-Hochvolt-Batterie-Systems

5.1.3 Phase 3: System-Eigenschaftserfassung

Mittels der in Kapitel 4.4 definierten Satzmuster werden im Rahmen des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* die Systemeigenschaften abgeleitet. Diese Satzmuster in Form von Fragen können durch die Projektmitglieder einzeln beantwortet werden. Dies ist nötig, da

nicht alle Projektmitglieder in einem interdisziplinären Entwicklungsteam zu jeder System-Funktion Informationen beisteuern können. Exemplarisch werden hier das Merkmal „Energie - Leistung“ und die Funktion der 2. Ebene „Prädiktive Streckendaten erfassen“ zu Systemeigenschaften kombiniert. Das sich ergebende Satzmuster lautet: „Gibt es Eigenschaften, die das System bezüglich Prädiktive Streckendaten erfassen und Energie - Leistung besitzen muss?“

Die Eigenschaften, die zunächst durch das Projektteam erarbeitet werden, entsprechen nicht den in Kapitel 4.6.2.3 definierten Gütekriterien. Die Ursache hierfür ist, dass sich mehrere Zustände und Randbedingungen für die Eigenschaften identifizieren lassen. Deswegen wurde die Funktion „Prädiktive Streckendaten erfassen“ in „Topologie prädiktiv erfassen“ und „Kurvenverlauf prädiktiv erfassen“ dekomponiert. Das sich nun ergebende Satzmuster „Gibt es Eigenschaften, die das System bezüglich Topologie prädiktiv erfassen und Energie - Leistung besitzen muss?“ ermöglicht das Erarbeiten von Eigenschaften, die den Gütekriterien entsprechen. Diese sind unter anderem: „Hochvoltbatterie (für Rekuperation) vor Bergabfahrt entladen“, „Leistung der Brennstoffzelle vor Bergabfahrt drosseln“ und „Gesamtsystemleistung vor Bergauffahrt maximieren“.

Die in Kapitel 5.1.1 identifizierte Anforderung seitens Marketing und Vertrieb wird mittels der System-Eigenschaftserfassung und der darauf folgende Phase Wirkkette-Eigenschaftsabbildung in Schnittstellen und technische Anforderungen an das System übersetzt. Durch Verknüpfung des Merkmals „Ergonomie - Gebrauchssicherheit“ und der Funktion „Antriebsleistungsfähigkeit präzisieren“ werden durch die Satzmuster weitere System-Eigenschaften durch das Projektteam erarbeitet. Eine dieser Eigenschaften besagt, dass die aktuelle elektrische Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle dem Kunden visualisiert werden muss. Da die elektrische Leistungsfähigkeit maßgeblich von der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle abhängt, wird die Eigenschaft „temperaturabhängige Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle visuell darstellen“ formuliert.

Zur Bildung weiterer System-Eigenschaften wurden objektunabhängige Lessons Learned (vgl. Kapitel 4.7) herangezogen. Die Merkmale „Energie - Leistung“, „Sicherheit - Betriebssicherheit“ und „Energie - Störung/EMV“ liefern eine Lessons Learned aus einem anderen Entwicklungsprojekt. Die Fehlerursache einer ungewollten Rekuperation führt dazu, dass das Hochvoltnetz sämtliche angeschlossenen Komponenten und Systeme trennt. Dies geschieht zum Schutz vor einem zu hohen Energieeintrag. Für ein Brennstoffzellensystem ist dies jedoch äußerst kritisch. Da die chemische Reaktion innerhalb der Brennstoffzelle eine gewisse Nachlaufzeit bis zum Stillstand hat, führt eine abrupte Trennung des Hochvoltnetzes zu einer systeminternen Überladung. Aus diesem Sachverhalt heraus werden die Eigenschaften „Überladungsselbstschutz“ und „Notabschaltung mit Energiepufferung bei Hochvoltnetzverlust“ gebildet. Sämtliche Eigenschaften werden als Anforderungen in das Lastenheft des Systems übernommen.

5.1.4 Phase 4: System-Wirkkettenanalyse

In der nächsten Phase des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* werden die erarbeiteten Merkmale, System-Funktionen und Eigenschaften in der Wirkkette dargestellt. Anschließend werden weitere Schnittstellen des Systems mittels der Eigenschaften identifiziert und ebenfalls abgebildet.

Aus der Eigenschaft „*Hochvoltbatterie (für Rekuperation) vor Bergabfahrt entladen*“ wird durch das Projektteam unter anderem die elektrische Hochvoltschnittstelle „*Aufnahme Rekuperationsenergie*“ abgeleitet. Die Anforderungen der nicht-technischen Stakeholder Marketing und Vertrieb werden auf gleiche Weise in technische Schnittstellen übersetzt. Beispielhaft ist dies in Bild 5-3 dargestellt.

Um die Systemeigenschaftsschnittstellen am System zu dekomponieren, wird das Flussdiagramm in Bild 4-9 durch die Projektbeteiligten angewendet. Die Schnittstelle „*Aufnahme Rekuperationsenergie*“ wird zunächst mit der Hochvoltbatterie verknüpft. In einer Betrachtungsebene, die die Hochvoltbatterie weiter dekomponiert, wird diese Schnittstelle auf die einzelnen Batteriezellen gelegt.

Neben den Systemeigenschaftsschnittstellen werden noch sämtliche weiteren Schnittstellen, die das System mit seinem Umfeld hat, dekomponiert. Das Vorgehen wird iterativ mit allen Schnittstellen an der System Black-Box durchgeführt.

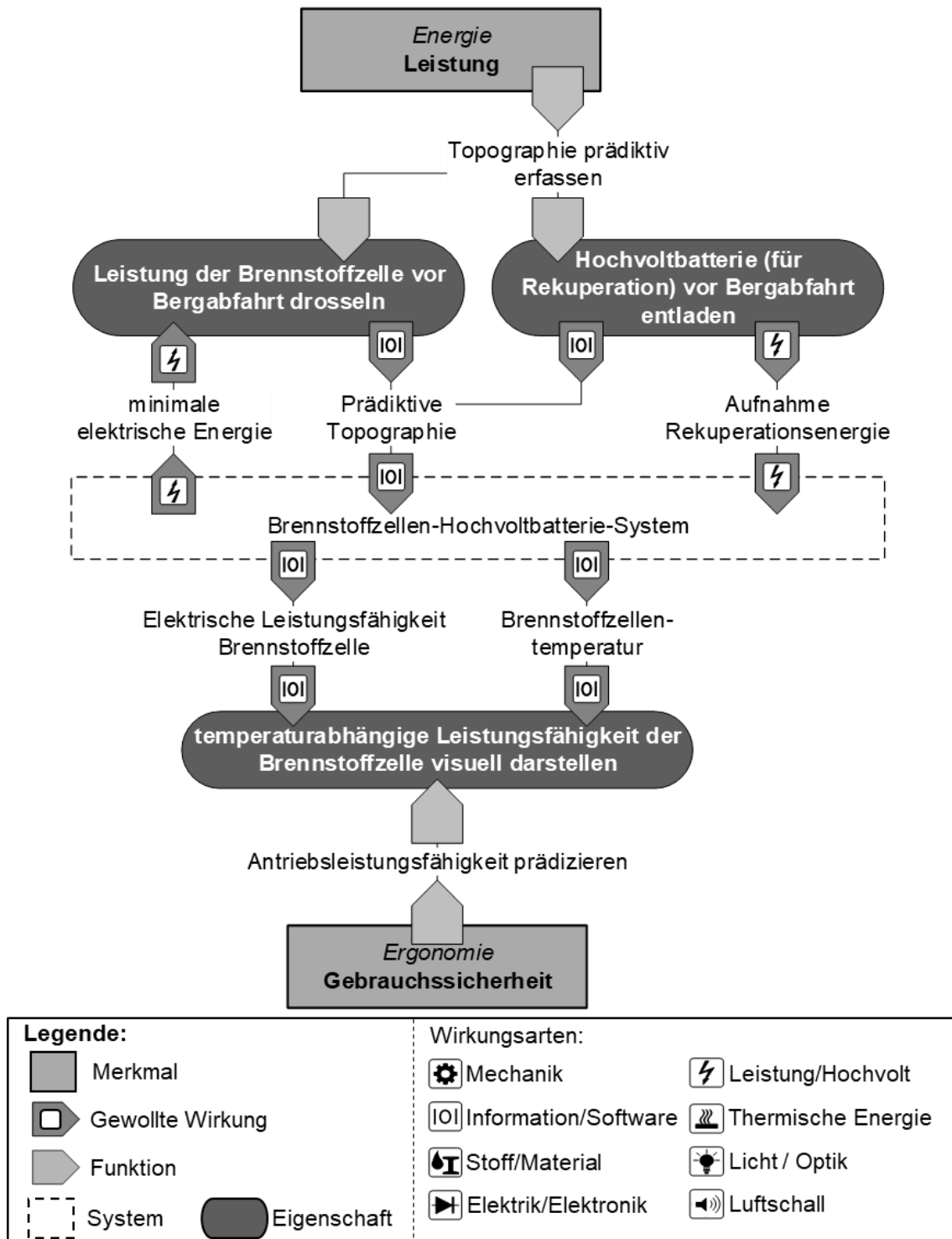


Bild 5-3: Exemplarische Abbildung der Eigenschaften in der Wirkkette des Brennstoffzellen-Hochvoltbatterie-Systems

5.1.5 Phase 5: Vorgehens- und Artefaktvalidierung

Abschließend wird die Methode „Validierung Objektfunktionen“ im Entwicklungsprojekt angewendet. Hierbei werden aus den Hauptschnittstellen der Systemelemente deren

Funktion abgeleitet. Es zeigt sich, dass für jede Funktion der System-Funktionserfassung ein Systemelement vorhanden ist. Durch diese Überprüfung ist sichergestellt, dass das gesamte Vorgehen und die erarbeiteten Artefakte durch das Projektteam gemäß den Vorgaben aus Kapitel 4 durchgeführt wurde.

5.2 Weitere Anwendungsbeispiele

Das *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* wurde in mehreren Entwicklungsprojekten angewandt. Im Folgenden werden weitere Beispiele aufgeführt.

5.2.1 Thermoelektrischer Generator

Mittels eines sogenannten thermoelektrischen Generators (TEG) kann elektrische Energie aus einer Temperaturdifferenz gewonnen werden. Die Technologie eines solchen Systems basiert auf dem sogenannten Seebeck-Effekt von Halbleitermaterialien, der Temperaturunterschiede direkt in elektrische Energie wandelt [RDK+16]. Bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wird die Temperaturdifferenz durch eine Integration des TEG in den Motorkühlkreislauf und den Abgasstrang generiert. Eine motornahe Einbauposition eines TEG ist in Bild 5-4 dargestellt.

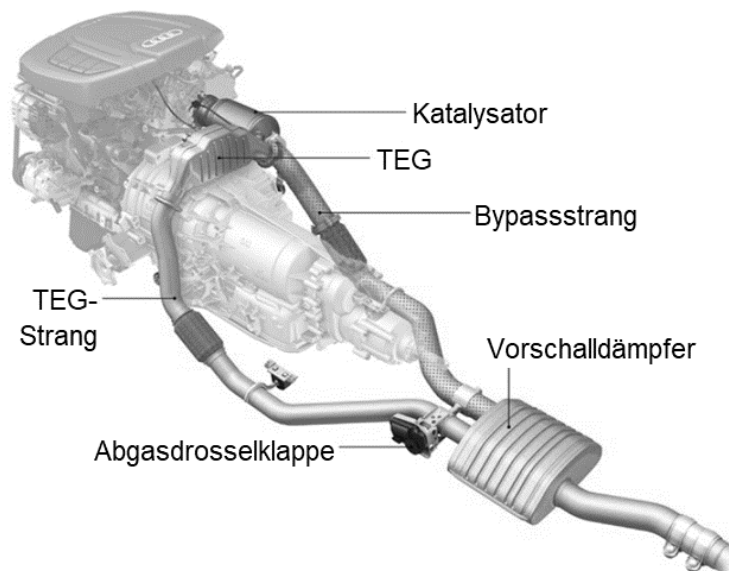


Bild 5-4: Motornahe Einbausituation eines thermoelektrischen Generators [RDK+16]

Die Anwendung der Methode ganzheitliches System-Merkmal-Netzwerk ergab, dass für den TEG die System-Merkmale *Betriebssicherheit* und *Gebrauchssicherheit* eine hohe Signifikanz haben. Diese System-Merkmale wurden jedoch von allen Projektbeteiligten aufgrund der nicht für den Kunden zugänglichen Verbausituation als nicht relevant eingestuft.

Im Anschluss an die System-Merkmal-Analyse werden die System-Funktionen erstellt. Eine der disziplinspezifischen Funktionen, die durch die Projektbeteiligten erarbeitet wurden, lautet: „Kühlmitteldurchströmung schalten“.

Die Systemeigenschaften werden analog dem in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehens mittels Satzmuster erarbeitet. Eines der Satzmuster lautet: *Unter dem Aspekt „Betriebssicherheit“ und „Kühlmitteldurchströmung schalten“, welche Eigenschaften muss das System besitzen?* Durch diese Fragestellung wurde im Projektteam die Notwendigkeit eines Kühlkreislauf-Überdruckventils im TEG erarbeitet. Ein Überdruckventil zum Schutz des TEG stellt eine neue Anforderung, die in einem Lastenheft dokumentiert werden muss, dar. Weitere Anforderungen an das System ergeben sich aus der Eigenschaftsbildung mit dem Merkmal *Gebrauchssicherheit*. Trotz der nicht kunden zugänglichen Verbausituation kann bei einem fehlerhaften Schalten des Überdruckventils heiße Kühlflüssigkeit aus dem Fahrzeug austreten. Dies ist insbesondere bei einem abgestellten Fahrzeug und im Kundendienstfall relevant. Hieraus werden für das System weitere relevante Anforderungen und Schnittstellen ausgeleitet.

Durch Anwendung des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* konnten im Entwicklungsprojekt TEG eine Vielzahl neuer funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen erarbeitet werden. Dies ist unter anderem die Anforderung, dass das Überdruckventil durch den Kundendienst deaktiviert werden können muss.

5.2.2 Digitales-Matrix-Licht

Beim Digitalen-Matrix-Licht handelt es sich um Hauptscheinwerfer, die mittels einer sogenannten Digital Micromirror Device eine hochauflösende Lichtverteilung generieren. Die Digital Micromirror Device besteht aus einer Matrix von Mikrospiegelaktoren. Diese können je nach Lage einen Lichtstrom aus dem Scheinwerfer leiten oder in eine Lichtfalle abstrahlen. Die schematische Funktionsweise ist in Bild 5-5 dargestellt.

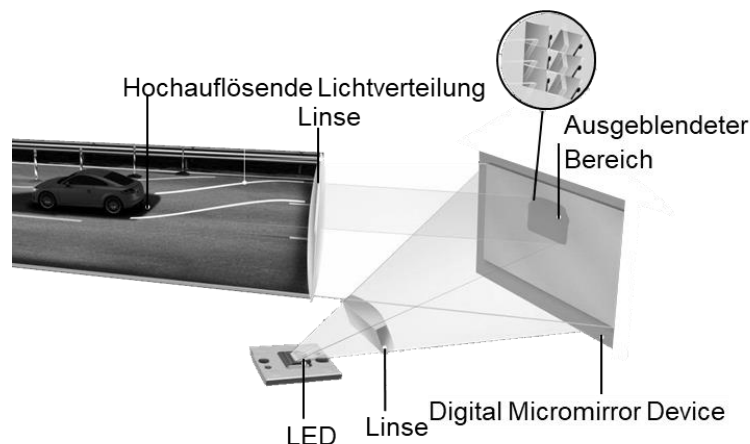


Bild 5-5: Schematische Funktionsweise des Digitalen-Matrix-Licht (Quelle: AUDI AG)

Auf Basis des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* werden die System-Merkmale, die System-Funktionen und die Systemeigenschaft durch die im Projekt beteiligten Entwickler erarbeitet. Diese werden anschließend im Wirkkettenmodell abgebildet. Ein Auszug des Wirkkettenmodells ist in Bild 5-6 dargestellt.

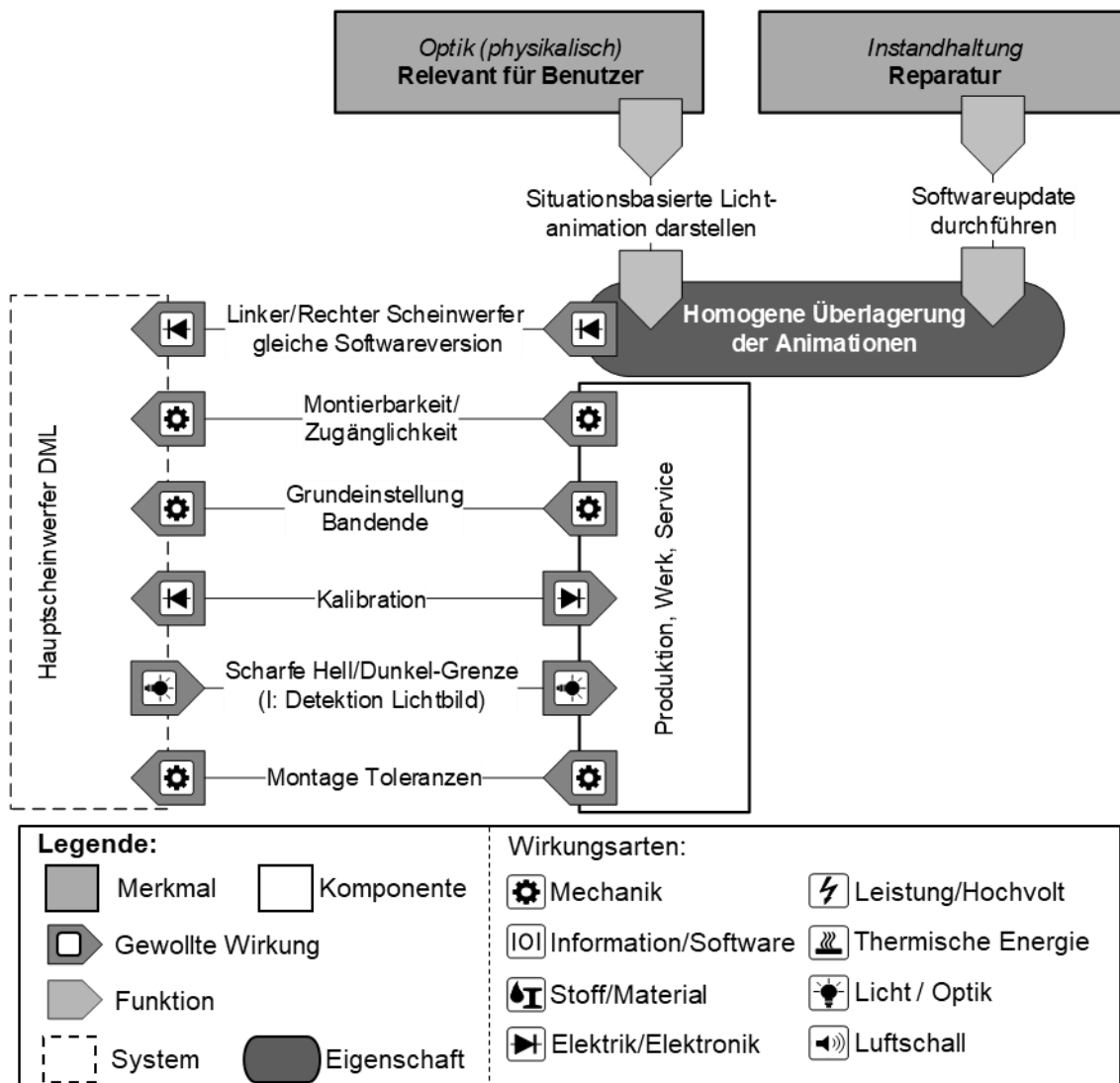


Bild 5-6: Auszug aus dem Systemmodell des Digitalen-Matrix-Licht

Aufgrund der neuen Technologie Digital Micromirror Device ergeben sich neue Anforderungen und Schnittstellen für das Scheinwerfersystem. Da die Lichtverteilung und die Lichtanimation aus dem linken und rechten Hauptscheinwerfer generiert werden, ist eine homogene Überlagerung der Lichtverteilungen für ein gutes Kundenerlebnis entscheidend. Damit dies über Lebensdauer garantiert werden kann, müssen bei einem Softwareupdate des Fahrzeuges beide Hauptscheinwerfer und deren Digital Micromirror Devices automatisch mit der gleichen Softwareversion versehen werden. Dies wurde mittels der Eigenschaftsdarstellung im Wirkkettenmodell erkannt und in eine Schnittstelle und Anforderung überführt.

Ferner kommen im Entwicklungsprojekt Lessons Learned aus anderen Entwicklungsprojekten zum Einsatz. Hierdurch konnte frühzeitig die Schnittstelle „Montierbarkeit“ und „Zugänglichkeit“ durch Produktion und Kundendienst als relevant identifiziert werden. Die Identifizierung dieser Lessons Learned erfolgte anhand der Systemmerkmale. Hieraus wurden Anforderungen an Gestalt und Steckerposition des Scheinwerfers abgeleitet und im Lastenheft dokumentiert.

Durch das *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* wurde eine Reihe von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen für das Lastenheft identifiziert und spezifiziert. Die Systemmodelle wurden in den jeweiligen Kapiteln des Lastenheftes verortet.

5.3 Weiterführende Erkenntnisse aus der Validierung des Vorgehens

Im Zuge der Validierung in einer Vielzahl von Entwicklungsprojekten ergeben sich weitere Erkenntnisse. Diese werden der Vollständigkeit halber im Folgenden aufgeführt, betreffen jedoch nicht das durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil.

5.3.1 Die veränderten Rollen durch den Einsatz des Gesamtverfahrens

Aus der Validierung des Gesamtverfahrens in Kapitel 5 ergibt sich für die zwei Rollen Systems Engineer und Requirements Owner eine neue Rollendefinition.

5.3.1.1 Der Systems Engineer

Entgegen der klassischen Definition beispielsweise durch WEILKINS nimmt der Systems Engineer in dem vorgestellten Vorgehen keine durchgängig projektbegleitende Rolle ein [Wei06]. Durch eine Externalisierung und Verankerung der Expertise eines Systems Engineers in anwenderunabhängige Systems Engineering Methoden ist eine durchgängige Projektbegleitung nicht mehr nötig. Die Rolle verändert sich bezüglich ihrer Aufgaben hin zu einer unterstützenden und bewertenden Rolle.

Zu Beginn eines Systementwicklungsprozesses werden die einzelnen Methoden dem Entwicklungsteam durch den Systems Engineer vorgestellt. Die Methoden werden anschließend in Eigenverantwortung durch das Entwicklungsteam angewandt. Mittels der Gütekriterien pro Methode kann der Systems Engineer nach Methodenabschluss überprüfen, ob die Methode formal korrekt eingesetzt wurde. Durch das Gütekriterium „Spezifikationswürdigkeit“ ist darüber hinaus auch eine inhaltliche Prüfung der Methoden bezüglich den Faktoren Granularität und Betrachtungsfokus möglich. Der Systems Engineer unterstützt darüber hinaus das Entwicklungsteam bei punktuellen Fragestellungen bezüglich des Methodeneinsatzes. Die inhaltliche Verantwortung obliegt dem Entwicklungsteam.

5.3.1.2 Der Requirements Owner

Laut SHEARD ist der Requirements Owner für die Überführung der Kundenbedürfnisse in Anforderungen inklusive deren Rückverfolgung verantwortlich [She96]. Bei Durchführung des Gesamtverfahrens und Einhaltung aller Gütekriterien wird mittels des Methodeneinsatzes diese Rolle obsolet. Aufgabe des Gesamtverfahrens ist es, aus anfänglich unscharfen Kundenanforderungen und Rahmenbedingungen an ein Black-Box-System konkrete, spezifizierte Anforderungen für ein vollständig durchdrungenes System strukturiert zu erarbeiten. Die Rückverfolgung wird hierbei durch das Systemmodell und dem angeschlossenen Repository sichergestellt.

5.3.2 Objektorientierte Lessons Learned

Objektorientierte Lessons Learned zeichnen sich dadurch aus, dass die dokumentierte Lösung ein konkretes, klar abgrenzbares Objekt enthält. Dieses Objekt kann auch als ein sogenanntes Lösungsmuster bezeichnet werden. Im Rahmen der Validierung des Gesamtverfahrens hat sich die Dokumentation von vielfach wiederkehrenden Objekten in mechatronischen Systemen als zielführend erwiesen.

Nach ANACKER bildet die Wirkkette (Wirkstruktur) den Kern der Lösungsbeschreibung [Ana15]. Es werden die Systemelemente sowie deren Beziehungen untereinander abgebildet. Die Darstellung der prinzipiellen Wirkungsweise des Lösungsmusters verdeutlicht, wie die zuvor definierten Funktionen erfüllt werden. Die Beziehungen zwischen Lösungsmustern und Systemelementen der Wirkstruktur haben den Typ m:n.

Basierend auf der von ANACKER durchgeführten Arbeit beinhalten die objektorientierten Lessons Learned als zentrales Element ein abgrenzbares Objekt der Wirkkette. Dieses abgrenzbare Objekt kann bei der Erstellung einer Wirkkette für ein neues System in diese kopiert werden. Anschließend sind die Wechselwirkungen und Schnittstellen des Objektes im System zu verknüpfen. In Bild 5-7 ist ein solches Lösungsmuster/abgrenzbares Objekt für einen Stecker mit seinen Schnittstellen und Wechselwirkungen dargestellt.

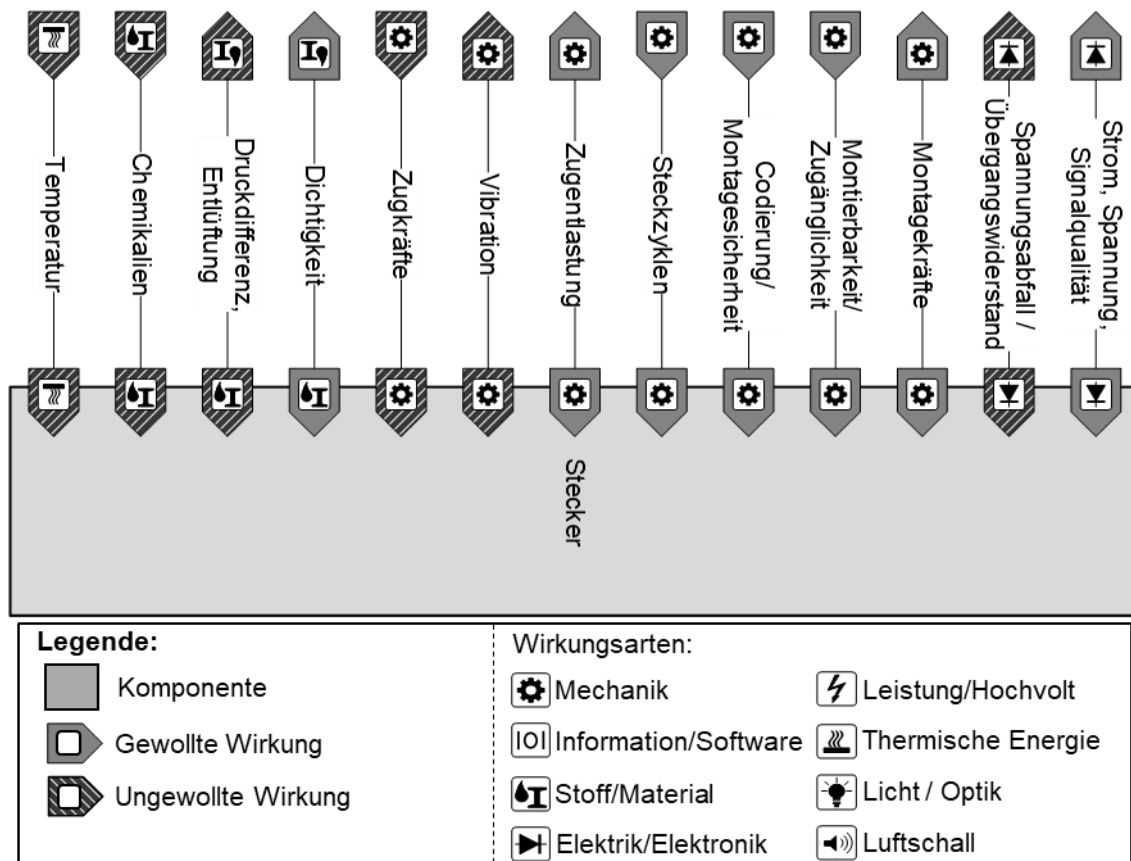


Bild 5-7: Lösungsmuster/abgrenzbares Objekt einer objektorientierten Lessons Learned

5.4 Bewertung der Arbeit gegenüber den Anforderungen

Das in Kapitel 4 definierte *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* wurde im vorliegenden Kapitel 5 anhand mehrerer Anwendungsbeispiele validiert. Die Erfüllung der in Kapitel 2.6 definierten Anforderungen durch das Gesamtverfahren wird im Folgenden bewertet. Hierzu erfolgt eine detaillierte Bewertung des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* bezüglich der Erfüllung jeder Anforderung.

A1) Funktionale und physikalische Anforderungen und Artefakte der richtigen

Granularität: Mittels des vorgestellten Gesamtverfahrens können sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen erarbeitet werden. Hierbei liefern die Einzelmethoden entweder Anforderungen direkt oder stellen Artefakte bereit, aus denen Anforderungen abgeleitet werden können. Die Überprüfung mittels der Methode *Spezifikationswürdigkeit* (vgl. Kapitel 4.6.2) sorgt zudem dafür, dass sämtliche erarbeiteten Anforderungen den Merkmalen der IEEE1233 [IEEE1233] entsprechen. Die Nachvollziehbarkeit des Ursprungs der einzelnen Anforderungen und Schnittstellen wird durch das Repository aus Kapitel 4.8 sichergestellt.

A2) Systemarchitektur und Umfelddarstellung: Den Kern des erarbeiteten Vorgehens bildet ein Systemmodell in Form einer Wirkkette. Dieses wurde im Rahmen dieser Arbeit erweitert, um neben Schnittstellen und Wechselwirkungen die Möglichkeit zu bieten, Merkmale und System-Funktionen abzubilden (vgl. Kapitel 4.5). Hierdurch erfüllt das Systemmodell alle Anforderungen, um direkt in ein Lastenheft als Systemarchitektur und Umfelddarstellung übernommen zu werden. Ferner liefert durch diese Erweiterung das Systemmodell eine transparente Darstellung des Entwicklungsgegenstandes. Diese ist für alle an der Entwicklung beteiligten Fachdisziplinen und nicht-technische Stakeholder nutzbar.

A3) Disziplinübergreifende Artefakte und Anforderungen: Moderne mechatronische Systeme im Automobil stellen ihre Sollfunktionalität vor Kunde nur sicher, wenn die Entwicklungsdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik ein nahtloses Zusammenspiel garantieren. Daher müssen auch alle Anforderungen der einzelnen Fachdisziplinen abgeleitet werden. Mittels des *durchgängigen Vorgehensmodells zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* wird dies ermöglicht. Das Vorgehen ist so aufgebaut, dass anfangs Merkmale, System-Funktionen und Systemeigenschaften abgeleitet werden, die einen interdisziplinären Charakter besitzen. Durch die Ableitung der disziplinspezifischen Funktionen (vgl. Kapitel 4.3) und Schnittstellen (vgl. Kapitel 4.5.3) ist sichergestellt, dass die Bedarfe aller Entwicklungsdisziplinen berücksichtigt sind.

A4) Entwicklungsszenarioabhängige Artefakte und Anforderungen: Sämtliche Einzelmethode des Gesamtverfahrens beginnen auf der mechatronischen Systemebene. Im weiteren Verlauf der Anwendung der Methoden findet eine Dekomposition in die weiteren Ebenen des V-Modells statt. Dies ist beispielsweise bei der System-Funktionserfassung der Fall. Je mehr Ebenen der System-Funktionen befüllt werden, umso mehr Funktionen werden auf Komponenten- und Bauteilebene identifiziert. Durch die Bildung von Eigenschaften mittels Funktionen auf einer tieferen Ebene ist es möglich, auch Komponenten- oder Bauteileigenschaften zu definieren. Darüber hinaus dient die Methode *Wirkketten-Dekomposition* in Kapitel 4.5.4 der Dekomposition von System-schnittstellen auf Komponenten- und Bauteilebene. Je nach Entwicklungsszenario können somit Anforderungen auf der System-, Komponenten- oder Bauteilebene erarbeitet werden.

A5) Stakeholderübergreifende Anforderungserfassung: In der Entwicklung mechatronischer System müssen auch Stakeholder mit begrenztem technischem Fachwissen mit in die Entwicklung einbezogen werden können. Hierzu dient die Methode *System-Eigenschaftserfassung*. Hierdurch können die technischen System-Funktionen durch eine Verknüpfung mit den Systemmerkmalen zu Systemeigenschaften verarbeitet werden. Die Systemeigenschaften decken sämtliche Anforderungen und Bedarfe der nicht-technischen Stakeholder ab. Durch die Ableitung von Schnittstellen und Wechselwirkungen aus den Eigenschaften werden die Bedarfe der Stakeholder mit begrenztem technischem Fachwissen in technische Anforderungen übersetzt.

A6) Neuentwicklung ohne Referenz: Durch die Anwendung der Methode *ganzheitliches System-Merkmal-Netzwerk* (vgl. Kapitel 4.2) wird zu Beginn des Entwicklungsvorgehens ein Schwerpunkt der zu betrachtenden Aspekte des Systems erarbeitet. Diese Ableitung kommt ohne eine Referenz in Form eines Vorgängerprojektes oder Prototypen aus. Zur Durchführung der Methode genügt eine Einschätzung des Projektteams.

A7) Verknüpfte Methoden und Sichten: Das in Kapitel 4 definierte *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* beinhaltet mehrere Einzelmethode. Diese Einzelmethode sind inhaltlich vollständig miteinander verknüpft. Durch die Integration der Merkmale, Funktionen und Eigenschaften in das Systemmodell erfolgt eine visuelle Verknüpfung der einzelnen Methoden zueinander. Das in Kapitel 4.8 definierte Repository garantiert zudem zusätzlich, dass sämtliche Methodenergebnisse durchgängig verknüpft sind.

A8) Intuitiv und Validierbar: In der industriellen Praxis fehlt es in der Entwicklung häufig an einem erfahrenen Systems Engineer und Anforderungsmanager. Ein Vorgehen zur Anforderungserfassung muss daher leicht verständlich und sich selbst validierend sein. Das in Kapitel 4 definierte Gesamtverfahren erfüllt diese Anforderungen. Zu jeder der einzelnen Methoden gibt es eine detaillierte Vorgehensbeschreibung, die durch unerfahrene Projektmitarbeiter umgesetzt werden kann. Ferner unterstützen Gütekriterien die Methodenerarbeitung. Die Methode *Validierung Objektfunktionen* bietet die Möglichkeit, die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Einzelmethode gesamtheitlich zu bestätigen.

A9) Verknüpfte Artefakte und Methodenergebnisse – Toolunabhängig: Durch die verknüpften Methoden und Sichten des gesamten Vorgehensmodells ist es möglich, inhaltliche Zusammenhänge toolunabhängig darzustellen. Das Repository (vgl. Kapitel 4.8) ist so ausgelegt, dass es in jeder Art von Datenbank umgesetzt werden kann. Somit können toolunabhängig sämtliche Zusammenhänge dargestellt werden. Die Modellierungen des Gesamtverfahrens sind ebenfalls so gestaltet, dass es keinen Toolzwang gibt.

A10) Lessons Learned: Die in Kapitel 4.7 beschriebene Methode *Lessons Learned* integriert objektunabhängige Erfahrungen in die Produktentwicklung. Diese dienen dem projektübergreifenden Erfahrungs- und Wissensaustausch. Hierdurch können Fehlinterpretationen oder falsche Anforderungen vermieden werden. Ferner ergibt sich durch die Verknüpfung der objektunabhängigen Lessons Learned mit den Merkmalen die Möglichkeit, diese frühzeitig in die Systeminterpretation zu integrieren.

Das *durchgängige Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* erfüllt sämtliche Anforderungen, die in Kapitel 2.6 aus der Problemstellung abgeleitet wurden. Der Nutzen der Einzelmethode und des Gesamtverfahrens konnte im vorliegenden Kapitel anhand von Entwicklungsprojekten der AUDI AG dargestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mechatronische Systeme im Automobil sind durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet. Diese Systeme entstehen durch das Zusammenspiel der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwaretechnik. Die Entwicklung dieser interdisziplinären Systeme unterliegt weiteren Komplexitätstreibern. Diese sind zum einen gestiegene Kunden- und Marktanforderungen, neue Gesetze oder die zunehmende Derivatisierung.

Neben dieser Komplexität befindet sich die Automobilindustrie aktuell in einem Umbruch. Zukünftig verändertes Kundenmobilitätsverhalten, die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs oder neue Vernetzungstechnologien sind nur einige Beispiele hierfür. Dieser Umbruch führt dazu, dass es viele mechatronische Systeme im Automobil gibt, die neue Technologien beinhalten. Diese neuen Technologien bedingen Neuentwicklungen einer Vielzahl von Systemen.

In der industriellen Praxis der Automobilindustrie gibt es zudem einige Randbedingungen. Diese sind unter anderem eine verkürzte Entwicklungszeit und ein steigender Kostendruck. Eine Besonderheit der Automobilindustrie ist das eng verzahnte Verhältnis aus OEM und der Zulieferindustrie. Zentrales Element dieser Zusammenarbeit ist ein Lastenheft, in dem sämtliche Anforderungen an ein mechatronisches System definiert sind. Dieses Lastenheft ist ein Vertragsdokument, das bei inhaltlichen Änderungen in einer laufenden Entwicklung zu einer Kostenerhöhung führt.

Die Spannung zwischen den Sachverhalten Kosteneffizienz, verkürzte Entwicklungszeit, neue Technologien und einem Lastenheft als Vertragsdokument macht das Thema Anforderungen zum Kern einer erfolgreichen Entwicklung moderner mechatronischer Systeme für ein Automobil. Die Anforderungen müssen ein Lastenheft nach Struktur des Verbandes der deutschen Automobilindustrie in frühen Phasen der Entwicklung vollständig füllen. Ferner müssen diese Anforderungen Eigenschaften wie Nachverfolgbarkeit oder Eineindeutigkeit erfüllen.

Aus dieser Problemstellung heraus ergeben sich verschiedene **Herausforderungen** in der Anforderungserhebung an mechatronische Systeme im Automobil. Diese sind, dass *Personal ohne ausgeprägte Systems Engineering Kenntnisse* vorhanden ist, eine *hohe Effizienz* des Vorgehens benötigt wird, der Einsatz von *Lessons Learned* abgebildet werden soll, eine *toolunabhängige Realisierung* und eine *eindeutige Vorgehensbeschreibung* gewährleistet werden muss. Basierend auf diesen Herausforderungen werden mehrere **Handlungsfelder** identifiziert. Es muss eine *durchgängige Gesamtmethode* das Erarbeiten von *Artefakten zur Beschreibung und Spezifikation von Anforderungen* in einem *flächendeckenden industriellen Einsatz* ermöglichen.

Im Stand der Technik dieser Arbeit wurden verschiedene Rahmenwerke des Requirement Developments, Vorgehen aus der Produktentwicklung und Ansätze aus dem Umfeld Automobilindustrie untersucht. Diese Analyse zeigt, dass sämtliche Rahmenwerke, Vorgehen und Ansätze die Bedarfe einer Anforderungserhebung in frühen Phasen der

Entwicklung, unter den gegebenen Rahmenbedingungen, nur teilweise erfüllen. Die verschiedenen Herausforderungen und Handlungsfelder, insbesondere eine eindeutige Vorgehensbeschreibung und die Möglichkeit eines flächendeckenden industriellen Einsatzes, werden nicht erfüllt. Dies zeigt die Notwendigkeit und den **Handlungsbedarf** nach einem *durchgängigen Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil*.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein *durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil* entwickelt. Dieses Vorgehensmodell unterstützt das interdisziplinäre Entwicklungsteam in frühen Phasen bei der Anforderungserhebung. Zusätzliche Randbedingungen aus einem industriellen Einsatz in der Automobilindustrie werden durch das Vorgehen mit adressiert. Diese sind unter anderem eine toolunabhängige Umsetzung und fehlende Rollen bei der Anforderungserfassung. Das vorgestellte Vorgehen besteht im Kern aus folgenden Elementen:

- Ein **Vorgehensmodell**, das aus mehreren Einzelmethode besteht. Diese Einzelmethode sind inhaltlich verknüpft. Durch eine eindeutige Vorgehensbeschreibung und Gütekriterien sind die Einzelmethode und das Gesamtverfahren durch einen unerfahrenen Anwender im Bereich Anforderungserhebung intuitiv einsetzbar. Das Vorgehensmodell validiert sich bei durchgängiger Anwendung zudem selbst.
- **Artefakte**, aus denen Anforderungen erstellt werden können. Es werden im Rahmen des Vorgehensmodells mehrere Artefakte erarbeitet, die zur Identifikation und Spezifikation von interdisziplinären und disziplinspezifischen Anforderungen dienen. Die Übersetzung der Anforderungen von Stakeholdern mit begrenztem technischem Fachwissen in technische Anforderungen erfolgt im Verlauf des Gesamtverfahrens.
- Ein **Systemmodell** und ein **Umfeldmodell** sind ebenfalls ein Ergebnis des vorgestellten Vorgehens. Diese werden benötigt, um Stakeholdern mit begrenztem technischem Fachwissen den Entwicklungsgegenstand und dessen Schnittstellen transparent zu machen. Darüber hinaus fließen die Modelle in ein Lastenheft nach Vorlage des Verbands der deutschen Automobilindustrie ein.

Das durchgängige Vorgehensmodell wurde anhand des Anwendungsbeispiels Brennstoffzelle vollständig validiert. Bereits in sehr frühen Phasen der Entwicklung ist das vorgestellte Vorgehen in der Lage, Anforderungen an ein mechatronisches System im Automobil zu liefern. Anhand zweier weiterer Beispiele wurden weitere Aspekte des Gesamtverfahrens und der Einzelmethode beleuchtet. Das vorgestellte Vorgehen wurde in mehreren Entwicklungsprojekten erfolgreich eingesetzt und erfüllt sämtliche Anforderungen an ein durchgängiges Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung für die Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil.

Auf Basis des vorgestellten Vorgehens und der Thematik Anforderungserfassung besteht **weiterer Forschungsbedarf**. Das durchgängige Vorgehensmodell wurde speziell auf die Bedarfe der Automobilindustrie hin entwickelt. Inwiefern das Vorgehen eine Blaupause für andere Industriezweige, wie beispielsweise dem Maschinen- und Anlagenbau, darstellen kann und welche Adaptionen nötig sind, ist einer der Forschungsbedarfe. Die Thematik Anforderungserfassung in frühen Phasen der Entwicklung bietet weiteren Forschungsbedarf. Die Phase der Anforderungserhebung ist entgegen der Anforderungsumsetzung in den Vorgehen der Produktentwicklung eher unterrepräsentiert. Insbesondere ein allgemeingültiges Vorgehen zur Erfassung interdisziplinärer Anforderungen aller Stakeholder an ein mechatronisches System bietet ein weitreichendes Untersuchungspotential. Dieses für alle Industrien allgemeingültige Vorgehen sollte unabhängig von der Anwenderexpertise in frühen Phasen der Entwicklung in der industriellen Praxis einsetzbar sein und die weiterführenden Erkenntnisse aus der Validierung des Vorgehens (vgl. Kapitel 5.3) integrieren.

7 Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CONSENS	Conceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems
COSMOD-RE	Scenario and goal based System Development Method
DIN	Das Deutsche Institut für Normung e. V.
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FTA	Fehlerbaumanalyse
GfSE	Gesellschaft für Systems Engineering
HoQ	House of Quality
INCOSE	International Council on Systems Engineering
it's OWL	Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe
OEM	Original Equipment Manufacturer
QFD	Quality-Function-Deployment
REM	Requirements Engineering Reference Model
REMsES	Requirements-Engineering softwareintensiver eingebetteter Systeme
SPES	Software Platform Embedded Systems
SysML	Systems Modeling Language
TEG	Thermoelektrischer Generator
TU	Technische Universität
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UML	Unified Modeling Language
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	Vergleiche
z. B.	zum Beispiel

8 Literaturverzeichnis

- [ABN+06] ALMFEL, 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, Nr. 17, 113-134, 2006
- [AG12] ALBERS, A.; GAUSEMEIER, J.: Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In Smart Engineering Interdisziplinäre Produktentstehung; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012
- [Ahr00] AHRENS, G.: Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen - methodische Voraussetzungen und Anwendung in der Praxis. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000
- [Aka92] AKAO, Y.: QFD-Quality Function Deployment. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1992
- [All07] ALLMANN, C.: Anforderungen auf Kundenfunktionsebene in der Automobilindustrie. In SE 2007 – die Konferenz rund um Softwaretechnik, Hamburg, März 2007
- [All08] ALLMANN, C.: Situations- und szenariobasiertes Anforderungsmanagement in der automotive Elektronikentwicklung. Dissertation, Universität Hannover, 2008
- [AM04] ALEXANDER, I.F.; MAIDEN, N.: Scenarios, Stories, Use Cases – Through the Systems Development Life-Cycle. John Wiley & Sons, London, 2004
- [Ana15] ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 354, Paderborn, 2015
- [AW05] AURUM, A.; WOHLIN, C.: Requirements Engineering: Setting the Context. In: Engineering and Managing Software Requirements. Springer-Verlag GmbH, Berlin, 2005
- [AWS14] ALTINGER, H.; WOTAWA, F.; SCHURIUS, M.: Testing Methods Used in the Automotive Industry: Results from a Survey. In: Proceedings of the 2014 Workshop on Joining AcadeMiA and Industry Contributions to Test Automation and Model-Based Testing (JAMAICA 2014), Seite 1-6, ACM, New York, NY, USA, 2014
- [Bar16] BARDT, H.: Autonomes Fahren. Eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie. In: IW-Trends, 43. Jahrgang., Nr. 2; 2016
- [Bat06] BATHELT, J.: Entwicklungsmethodik für SPS-gesteuerte mechatronische Systeme. Dissertation, Universität Zürich, 2006
- [BBH+09] BRAUN, P.; BROY, M.; HOUDEK, F.; KIRCHMAYR, M.; MÜLLER, M.; PENZENSTADLER, B.; POHL, K.; WEYER, T (Hrsg.): Entwicklung eines Leitfadens für das Requirements Engineering softwareintensiver Eingebetteter Systeme. Technische Universität München, Institut für Informatik, 2009
- [BCZ92] BYRD, T.A.; COSSICK, K.L.; ZMUD, R.W.: A synthesis of research on requirements analysis and knowledge acquisition techniques. In: MIS Quarterly, Vol. 16, No. 1, 1992
- [Ber12] BERKOVICH, M.: Requirements Engineering für IT-gestützte Product Service Systems. Dissertation. Fakultät für Informatik, TU München. 2012
- [Ber95] BEROGGI, G. E. G.: Neue Technologien zur Unterstützung des Risikomanagements : eine Systems-Engineering-Betrachtungsweise zum Entwurf von Risikoinformationssystemen, vdf Hochschul-Verlag an der ETH, Zürich, 1995
- [BFH+12] BROY, M.; FUHRMANN, S.; HUEMER, J.; WEBERS, K.: Anforderungsbasierter Funktionsentwurf im automobilen Entwicklungsprozess. In: ATZ (2012), Nr. 6, S. 472-477, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2012
- [BHL+11] BERKOVICH, M.; HOFFMANN, A.; LEIMEISTER, J.; KRCMAR, H.: Analysis of Requirements Engineering Techniques for IT-enabled Product-Service-Systems. Workshop on Requirements Engineering for Systems and Systems-of-Systems, Trient, 2011
- [BKL+09] BALZERT, H.; KOSCHLE, R.; LÄMMEL, U.; LIGGESMEYER, P.; QUANTE, J.: Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering. Lehrbuch der Software-Technik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2009
- [BO00] BALL, L. J.; ORMEROD, T. C. Ormerod: Putting ethnography to work: the case for a cognitive ethnography of design. In: International Journal of Human-Computer Studies, Band 53, Ausgabe.1, S.147-168, 2000

- [BPK+09] BERENBACH, B.; PAULISH, D.; KAZMEIER, J.; RUDORFER, A.: Software & Systems Requirements Engineering: In Practice, Mcgraw-Hill Professional, 2009
- [Bro06] BROY, M.: Challenges in Automotive Software Engineering. In: Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering, ICSE '06. ACM, New York, NY, USA, 2006
- [Bru07] BRUDNIOK, S.: Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme am Beispiel eines humanoiden Roboters, Karlsruhe, Dissertaion Universität Karlsruhe, 2007
- [BS13] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [BVB12] BONNEMA, G. M.; VEENVLIET, K. T.; BROENINK, J. F.: Systems Design and Engineering – Lubricating Multidisciplinary Development Projects. University of Twente, Twente, 2012
- [CM02] COUGHLAN, J.; MACREDIE, R.D.: Effective Communication in Requirements Elicitation: A Comparison of Methodologies. In: Requirements Engineering Journal, Vol. 7, No. 2, 2002
- [CNY+00] CHUNG, L.; NIXON, B.A.; YU, E.; MYLOPOULOS, J.: Non-Functional Requirements in Software Engineering, Springer Science+Business Media, New York, 2000
- [CVK+15] CORWIN, S.; VITALE, J.; KELLY, E.; CATHLES, E.: The future of mobility; Deloitte University Press; 2015
- [DDH+06] DAVIS, A.; DIESTE, O.; HICKEY, A.; JURISTO, N.: Effectiveness of Requirements Elicitation Techniques: Empirical Results Derived from a Systematic Review. In: 14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06), IEEE, Minneapolis/St. Paul, 2006
- [Dei01] DEIFEL, B.: Requirements Engineering komplexer Standardsoftware. Dissertation, TU München, 2001
- [Dei09] DEIGENDESCH, T.: Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsbericht Band 41, Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruhe, 2009
- [Det08] DETTMERING, J.: Disziplinübergreifendes Datenmanagement im automobilen Entwicklungsprozess. Dissertation, TU München. Sierke Verlag, Göttingen, 2008
- [Deu07] DEUBEL, T.: Anforderungs-, kosten- und wertgetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 39, Saarbrücken, 2007.
- [Die09] DIEHL, H.: Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme, Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Eine Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [DV08] DOS SANTOS SOARES, M.; VRANCKEN, J.: Model-Driven User Requirements Specification using SysML. In: Journal of Software, Vol. 3, Nr. 6 (2008), Seite 57-68, 2008
- [DVF93] DARDENNE, A.; VAN LAMSWEDE, A.; FICKAS, S.: Goal-directed requirements acquisition. In Science of Computer Programming. Ausgabe 03-1993; Elsevier, Amsterdam, 1993
- [Ebe12] EBERT, C.: Systematisches Requirements Engineering, 4. überarbeitete Auflage, dpunkt.verlag, Heidelberg, 2012
- [Ehr03] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung, 2. Auflage, ISBN 3-446-22119-0, Hanser Verlag, 2003
- [Ehr95] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung. Hanser, München, 1995
- [EIL11] EILMANN S.; BEHREND F.; HÜBNER R.; WEITLANDER E.: Interessengruppen/Interessierte Parteien, In: Michael Gessler (Hrsg.): Kompetenzbasiertes Projektmanagement. 4. Auflage. 1, Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement, Nürnberg 2011
- [EKL07] EHRENSPIEL K.; KIEWERT A.; LINDEMANN U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6. Aufl. Springer, Berlin, 2007
- [EU13] EBERLE, C.; URBAN, A.: Die mechatronische Zeichnung. In. ATZextra, Band 18, 2. Ausgabe, S. 18-22, Mai 2013, Springer Fachmedien München GmbH, München, 2013
- [Ew16] edaWorkshop 2016, Elektronik-Design-automotive-Workshop: Session 1, Hannover: www.edacentrum.de/edaworkshop, 11. Mai 2016.
- [FHP+05] FLEISCHMANN, A.; HARTMANN, J.; PFALLER, C.; RAPPEL M.; RITTMANN, S.; WILD D.: Concretization and Formalization of Requirements for Automotive Embedded Software

- Systems Development, In: The Tenth Australian Workshop on Requirements Engineering (AWRE), Melbourne, Australia, K. Cox, J.L. Cybulski et.al (ed.), 2005
- [FLK+05] FÜRSTENAU, B.; LANGERFERMANN, J.; KLAUSER, F.; BORN, V: Erfahrungswissen sichern und aufbereiten – Zur effizienten Gestaltung von Wissensmanagementprozessen bei der BMW AG im Projekt „Werksaufbau Leipzig“. In: Wirtschaftsinformatik 2005 : eEconomy, eGovernment, eSociety; at Heidelberg, 2005
- [FMS11] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A practical guide to SysML, Second Edition: The Systems modeling language. Morgan Kaufmann, Waltham, 2. Auflage, 2011
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipiellösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fra09] FRANKE, H.-J.: Grundlagen der Produktentwicklung und Konstruktion; Skript zur Vorlesung; Technische Universität Braunschweig; 2009
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GBK+06] GEISBERGER, E.; BROY, M.; KATZMEIER, J., RUDORFER, A.; BERENBACH, B.; PAULISCH, D.: Requirements Engineering Referenzmodell. Technische Universität München, Institut für Informatik, 2006
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D., CZAJA, A. M.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Studie, wentker druck GmbH, 2013
- [Gei05] GEISBERGER, E.: Requirements Engineering eingebetteter Systeme – ein interdisziplinärer Modellierungsansatz, Dissertation TU München, 2005
- [Gei06] GEISINGER, D.: Markt- und zielkostenorientierte Produktentwicklung mit TRIZ. In: Innovation mit TRIZ – Konzepte, Werkzeuge, Praxisanwendungen, Hrsg.: Gundlach, Carsten; Nähler, Horst, Symposion Publishing, Düsseldorf, 2006
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GH86] GLASS, A.L.; HOLYOAK, K. J.: Cognition. Random House, New York, 1986
- [Gla88] KOSSLYN, S.M.: Imagery in Learning, In: Gazzaniga, M. (Hrsg.): Perspectives in Memory Research, The MIT Press, Cambridge, 1988
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U.: Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Hanser Verlag, München, 2012
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [GS08] GRUBE, P.; SCHMID, K.: Selecting Creativity Techniques for Innovative Requirements Engineering. Third International Workshop on Multimedia and Enjoyable Requirements Engineering - Beyond Mere Descriptions and with More Fun and Games, Barcelona, 2008.
- [GW89] GAUSE, D.; WEINBERG G.: Exploring Requirements: Quality Before Design, Dorset House Publishing Co Inc., New York, 1989
- [Hal62] HALL, A. D.: A Methodology for Systems Engineering, Van Nostrand, Michigan, 1962
- [Han03] HANSELMANN, H.: Vom Modell zum Serieneintrag. In: Electronic Automotive III/2003
- [HD03] HICKEY, A.M.; DAVIS, A.M.: Elicitation technique Selection: how do experts do it. The 11th IEEE international Requirements Engineering Conference, Monterey Bay, 2003
- [Hil11] HILLHOUSE, B.: Managing Complexity in Automotive Product Development; Automotive IESF; 2011
- [Hil12] HILLENBRAND, M.: Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen. Dissertation, Institut für Technik der Informationsverarbeitung, Karlsruher Institut für Technologie, Steinbuch Series on Advances in Information Technology, Band 4, 2012
- [HJD11] HULL, E.; JACKSON, K.; DICK, J.: Requirements Engineering, Springer London, 2011
- [HKD+06] HERFELD, U.; KREIMEYER, M.; DEUBZER, F.; FRANK, T.; LINDEMANN, U.; KNAUST, U.: Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und

- Simulation in der Karosserieentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006
- [Hof14] HOFFMANN, A.: Anforderungsmuster zur Spezifikation Soziotechnischer Systeme - Standardisierte Anforderungen der Vertrauenswürdigkeit und Rechtsverträglichkeit. Dissertation, Kassel, 2014
- [Hua01] HUANG, M.: Funktionsmodellierung und Lösungsfindung mechatronischer Produkte. Dissertation. Universität Karlsruhe, 2001
- [Hum95] HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 9, Paderborn, 1995
- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; WECK DE, O. L.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli, Zürich, 2012
- [HWF+08] HOOD, C.; WIEDEMANN, S.; FICHTINGER, S.; PAUTZ, U.: Requirements Management: The Interface Between Requirements Development and All Other Systems Engineering Processes. Berlin : Springer, 2008
- [Jes08] JESSE, S.: Tutorium: Erhebung von Produktanforderungen durch den Requirements Engineer. In: Herzwurm, G.; Mikusz, M. (Hrsg.): Industrialisierung des Software Management - Tagungsband zur GI-Fachtagung Software-Management, Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 195-204, 2008
- [Jun06] JUNG, C.: Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung. Dissertation, TU-München, 2006.
- [Kai13] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2013
- [Kal98] KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998
- [Kar16-ol] KARIUS, A.: Brennstoffzellen: Audi erteilt Ballard Power Großauftrag. Unter: <https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/brennstoffzellen-audi-erteilt-ballard-power-grossauftrag-275.html>, 01.12.2016
- [KBS97] KALLENBACH, E.; BIRLI, O.; SAFFERT, E.; SCHÄFFEL, C.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. In: Tagung Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Moers, 10.–12. März 1997, VDI Berichte 1315, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997, S. 1/14
- [KKP90] KELLER, S.; KAHN, L.; PANARA, R.: Specifying Software Quality Requirements with Metrics. In Thayer, R. (Hrsg.), Merlin, D. (Hrsg.): Tutorial: System and Software Requirements Engineering, IEEE Computer Society Press, 1990
- [KNL14] KASSAB, M.; NEILL, C.; LAPLANTE, P.: State of practice in requirements engineering: contemporary data. Springer, London, 2014
- [Kön13] KÖNIGS, S.: Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2013
- [Krü90] KRÜGER, M.: Testen von Software als analytische Massnahme der Soft-ware- Qualitätssicherung. Doktorarbeit, Universität Ulm, Fakultät für Ma-thematik und Wirtschaftswissenschaften, 1990
- [KS03] KOSSIAKOFF, A.; SWEET, W.: Systems Engineering – Principles and practice. Wiley- Interscience, Hoboken, N.J, 2003
- [KS98] KOTONYA, G.; SOMMERVILLE, I.: Requirements Engineering: Processes and Techniques (1 ed.), Wiley & Sons, 1998
- [Lin07] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, 3., korrigierte Auflage, 2007
- [Mie98] MIETZEL, G.: Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens. Hogrefe-Verlag, Göttingen, 5. Auflage, 1998
- [MT14] MERKER G. P.; TEICHMANN R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- [Mul04] MULLER, G.: CAFCR: a multi-view method for embedded systems architecting; balancing genericity and specificity, Dissertation, Technical University of Delft, 2004
- [Neg06], NEGELE, H.: Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung. Herbert Utz Verlag, München, 2. Auflage, 2006
- [Neh14] NEHUIS, F.: Methodische Unterstützung bei der Ermittlung von Anforderungen in der Produktentwicklung. Dissertation, TU Braunschweig, 2014

- [Obe00] OBERMANN, K.: Mechatronik – Softwarewerkzeug wird standardwerkzeug der Produktentwicklung. Engineering: Mikroelektronik und Mechanik werden künftig zur untrennbaren Einheit, In: VDI-Nachrichten, 19. Mai 2000
- [Ott96] OTTO, K.: Forming Product Design Specifications. Proceedings, ASME-Engineering Information Management Symposium 1996, Irvine/CA, USA; 1996
- [Par10] PARTSCH, H.: Requirements-Engineering systematisch - Modellbildung für softwaregestützte Systeme. Springer-Verlag, zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage, 2010
- [Pat82] PATZAK, G.: Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme – Grundlagen, Methoden, Techniken. Springer, Berlin, New York, 1982
- [PB97] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, 4. Auflage, 1997
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHOUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [PHA+07] POHL, K., HÖNNINGER, H., ACHATZ, R., BROY, M. (Hrsg.): Model-Based Engineering of Embedded Systems. The SPES 2020 Methodology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, 2012
- [Poh07] POHL, K.: Requirements Engineering: Grundlagen, Prinzipien, Techniken, dpunkt-Verlag, Heidelberg, 2007
- [Poh96] POHL, K.: Process-Centered Requirements Engineering. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, 1996
- [Pri10] PRINZ, A.: Struktur und Ablaufmodell für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten. Dissertation, TU Braunschweig, 2010
- [Pug96] PUGH, S.: Creating Innovative Products Using Total Design: The Living Legacy of Stuart Pugh, Editors: Don Clausing and Ron Andrade, (Reading, MA: Addison- Wesley, Inc.), 1996
- [RDK+16] ROSENBERGER, M.; DELLNER, M.; KLUGE, M.; TARANTIK, K.: Fahrzeugintegration eines thermoelektrischen Generators. In: Motortechnische Zeitschrift 04/2016, Springer Vieweg / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2016
- [Rei08] REIB, T.: Traceability - Aktuelle Herausforderungen in der Systementwicklung im Automobilsektor, Institut für Informatik, Technische Universität München, München, 2008
- [Rei14] REIB, T.: Ein Referenzmodell für die Serienentwicklung mechatronischer Systeme in der Automobilindustrie. Dissertation, Fakultät für Informatik, Technische Universität München, Audi-Dissertationsreihe, Band 86, Culiver Verlag, Göttingen, 2014
- [RM12] RUMSFELD, D.; MAYERS, R.: DoD News Briefing - Secretary Rumsfeld and Gen. Myers; Federal news service INC., WASHINGTON, D.C, 2012
- [Ros77] ROSS, D.T.: Structured analysis (SA): A language for communicating ideas. In: IEEE Transactions on software engineering, 1977
- [Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskataloge. Springer, Berlin, Band 1, 3. Auflage, 2000
- [Rot94] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen I. Konstruktionslehre (Band 1 : Konstruktionslehre). (2 ed.), Springer-Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [RR07] ROBERTSON, S.; ROBERTSON, J.: Mastering the Requirements Process. Addison-Wesley Longman, Amsterdam, 2007
- [RSH07] RUPP, C.; SIMON, M.; HOCKER, F.: Requirements Engineering und Management. Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2007
- [Sch02] SCHIENMANN, B.: Kontinuierliches Anforderungsmanagement. Addison-Wesley, München, 2002
- [Sch03] SCHMITZ, G.: Mechatronik im Automobilbau II: Aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile. Expert-Verlag, Renningen, 2003
- [Sch08] SCHEDL, S.: Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Forschungsberichte IWB, Band 229, München, 2008
- [Sch12] SCHEIDT, A.: Die Drei Dimensionen der Automobilen Vernetzung. In: ATZagenda, Band 1, Ausgabe 1; 2012
- [Sch13] SCHÖTTLE, M.: MTZ-Konferenz Virtual Powertrain Creation, In: Motortechnische Zeitschrift 12/2013, Springer Vieweg / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2013

- [SG08] SEIFFERT, U., GOTTHAR, R.: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz; ATZ-MTZ-Fachbuch; Vieweg + Teubner Verlag; 2008
- [She96] SHEARD, S. A.: Twelve Systems Engineering Roles. In: INCOSE (Hrsg.): Proceedings of the 6th INCOSE Annual International Symposium, Boston, Massachusetts, USA, 1996
- [Sik10] SIKORA, E.: Ein modellbasierter Ansatz zur verzahnten Entwicklung von Anforderungen und Architektur über mehrere Abstraktionsstufen hinweg. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2010
- [SK14] SCHRAMM D.; KOPPERS, M.: Das Automobil im Jahr 2025 - Vielfalt der Antriebstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2014.
- [SLM07] SCHULLER, J.; LANNOLJE, M.; MEYS, M.: Entwurf und Realisierung des Sicherheitskonzepts der Audi Dynamiklenkung. VDI Berichte, 1971:249–274, 2007.
- [SMM+98] SUTCLIFFE, A.; MAIDEN, N.; MINOCHA, S.; MANUEL, D.: Supporting scenario-based requirements engineering. In: IEEE Transactions on Software Engineering, Ausgabe 12-98; IEEE Computer Society Press, 1998
- [Som12] SOMMERVILLE, I.: Software Engineering, Pearson Studium, München, 9. Auflage, 2012
- [Suh93] SUHM, A.: Produktmodellierung in wissensbasierten Konstruktionssystemen auf Basis von Lösungsmustern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, Reihe Konstruktionstechnik, Verlag Shaker, Aachen, 1993
- [TF00] THOMKE, S.; FUJIMOTO, T.: The effect of “front-loading” problem-solving on product development performance. In: Journal of Product Innovation Management, Ausgabe 17, 2000
- [Tho98] THOMKE, S.: Simulation, learning and R&D performance: Evidence from automotive development. Research Policy; Band 27; Ausgabe 3; 1998
- [Tuu03] TUUNANEN, T.: A new perspective on requirements elicitation methods. In: Journal of Information Technology Theory and Application, Vol. 5, No. 3, 2003
- [UE03] ULRICH, K.; EPPINGER, S.: Product Design and Development (3 ed.), McGraw-Hill Professional, 2003
- [UH80] URBAN, G.; HAUSER, J.: Design and Marketing of New Products; Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.; 1980
- [Ulr95] ULRICH, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy; Band 24; Ausgabe 3; 1995
- [Van01] VAN LAMSWEERDE, A.: Goal-Oriented Requirements Engineering: A Guided Tour. In: Fifth IEEE International Symposium on Requirements Engineering, IEEE, Toronto, Ont., 2001
- [Vog15] VOGELSANG, A.: Model-based Requirements Engineering for Multifunctional Systems. Dissertation, TU München, 2015
- [Wal05] WALLENTOWITZ, H.: Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen; Schriftenreihe Automobiltechnik des IKA an der RWTH Aachen; 2005
- [Wei06] WEILKIENS, T.: Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design. Dpunkt-Verlag, Heidelberg, 2006
- [Wie03] WIEGERS, K. E.: Software Requirements - Practical Techniques for gathering and managing requirements throughout the product development cycle. Microsoft Press, Redmond, Washington, Second Edition Auflage, 2003.
- [Win98] WINKELHAGE, J.: Dienstleister, die beim Denken helfen. In: FAZ, 28. März 1998, Nr. 74, S. 15
- [WW03] WEBER, M.; WEISBROD, J.: Requirements Engineering in Automotive Development: Experiences and Challenges; IEEE Software January/February 2003
- [ZC05] ZOWGHI, D.; COULIN, C.: Requirement Elicitation: A Survey of Techniques, Approaches, and Tools. In: Engineering and Managing Software Requirements, S. 19-46, Springer Berlin Heidelberg, 2005

Normen und Richtlinien

- [Aut10] Automotive SPICE Process Assessment / Reference Model. Version 3.0, 2010
- [DIN25424] DIN 25424-2 Fehlerbaumanalyse, Ausgabe 1990-04, Beuth Verlag, Berlin, 1990

- [IEC61508] IEC: IEC 61508, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, 1997
- [IEEE1233] IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications, IEEE Std 1233, IEEE Press, Piscataway/New Jersey, 1998
- [IEEE610.12] IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology, IEEE Std 610.12-1990, IEEE Press, Piscataway/New Jersey, 1990
- [IEEE830] IEEE Guide to Software Requirements Specification, ANSI/IEEE Std 830-1984, IEEE Press, Piscataway/New Jersey, 1984
- [INC12] INCOSE: INCOSE Systems Engineering Handbuch – Deutsche Übersetzung. GfSE, 2012
- [ISO16355] Anwendung von statistischen und verwandten Methoden für neue Technologie und für den Produktentwicklungsprozess - Teil 1: Allgemeine Grundsätze und Perspektive der QFD-Methode, 2015
- [ISO26262] ISO/FDIS 26262, Roadvehicles- Functional Safety, 2011
- [OMG17] OMG: Systems Modeling Language (OMG SysML™) – Version 1.5, 2017
- [VDA06] VDA-Band 4 Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz - Produkt- und Prozess-FMEA, 2. Auflage, 2006
- [VDA07] VDA-Band Komponentenlastenheft - Automotive Standardstruktur. 1. Auflage, 2007
- [VDI2206] Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004
- [VDI2221] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1993.
- [VDI2222] Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, 1997.
- [VDI2422] Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung, 1994
- [VDI2422] Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik, 1994.
- [VW80010] VW80010, Volkswagen-Norm, Stand 10/2014.
- [VW80108] VW80108, Volkswagen-Norm, Stand 11/2013.

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A1 Testlandkarte Volkswagen AG	1
--------------------------------------	---

A1 Testlandkarte Volkswagen AG

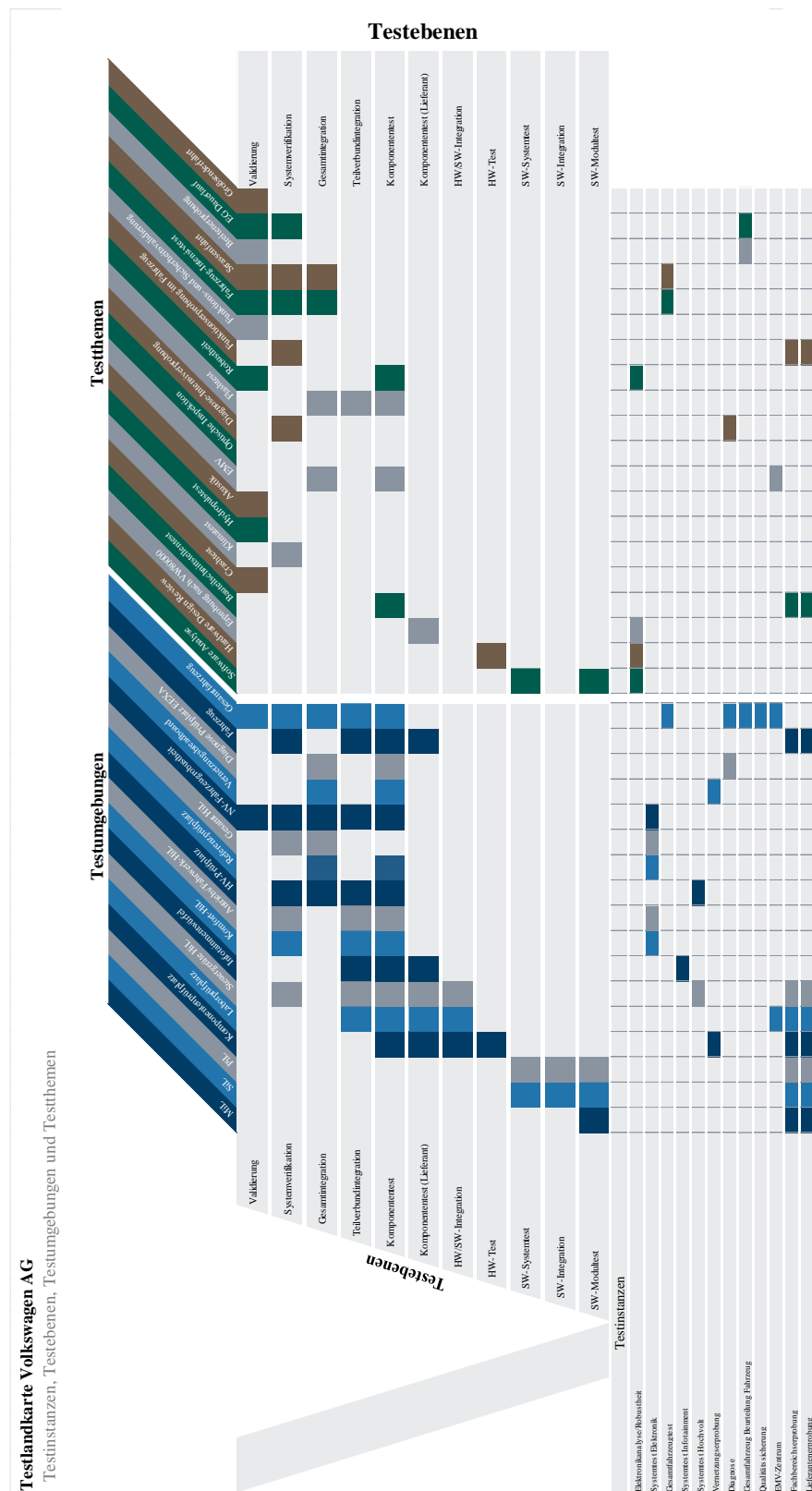


Bild A-1-1: Testlandkarte Volkswagen AG